



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: 利用中国 VGOS 站开展国际联测的 EOP 精度仿真分析
作者: 钟胜坚, 舒逢春, 李金岭, 吴德, 何旋, 童锋贤
DOI: 10.13203/j.whugis20210204
网络首发日期: 2021-06-06
引用格式: 钟胜坚, 舒逢春, 李金岭, 吴德, 何旋, 童锋贤. 利用中国 VGOS 站开展国际联测的 EOP 精度仿真分析. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210204>



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.whugis20210204

引用格式：

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, DOI: 10.13203/j.whugis20210204 (ZHONG Shengjian, SHU Fengchun, LI Jinling, et al. Simulated Analysis of EOP Measurement Accuracies with participation of Chinese VGOS Stations in International Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210204)

利用中国 VGOS 站开展国际联测的 EOP 精度仿真分析

钟胜坚^{1,2} 舒逢春^{2,3} 李金岭² 吴德^{2,4} 何旋² 童锋贤²

1 上海大学机电工程与自动化学院, 上海, 200444

2 中国科学院上海天文台, 上海, 200030

3 空间导航与定位技术重点实验室, 上海, 200030

4 中国科学院大学, 北京, 100049

摘要：甚长基线干涉测量技术(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)是测量 EOP (Earth Orientation Parameters, EOP) 的主要空间测地技术之一, 中国正在建设名为 VLBI 全球观测系统 (VLBI Global Observing System, VGOS) 的新一代测地 VLBI 站, 通过国际联测优化站网构型是实现高精度 EOP 测量的必由之路。本文以 3 个国内 VGOS 站为核心站, 通过引入 2 个国外站构建 5 站联合观测网, 分析评估了不同站网构型的 EOP 测量能力。针对每个站网构型, 通过调整 4 个约束条件的权重因子批量生成相应的观测纲要, 采用蒙特卡洛仿真方法选择最优的观测纲要, 评价指标为 EOP 解算值的可重复性。仿真结果表明, 由国内站、南非哈特比站以及澳大利亚霍巴特站组成的网型 EOP 测量能力最强, 相对于国内 3 站组成的网型, dUT1 测量精度提高 5.7 倍, 极移的 X、Y 分量的测量精度分别提高 2.8 倍和 18.3 倍。仿真结果可为后续开展高精度 EOP 组网观测提供参考依据。

关键词：VLBI; 地球定向参数 (EOP); VGOS; 蒙特卡洛仿真

甚长基线干涉测量技术 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 是测量地球定向参数 (Earth Orientation Parameters, EOP) 的现代空间测地技术之一^[1-2]。EOP 是实现天球参考架与地球参考架之间相互转换的参数, 包括两个章动参数、两个极移参数以及一个世界时 (UT1) 参数, 这些参数对于揭示地球自转的动力学机制有着极其重要的科

研价值^[3-4]。在深空探测领域, EOP 的精度水平直接影响探测器的导航定位精度。在全球卫星导航方面, 直接影响卫星的轨道精度, 从而间接影响用户的定位精度^[5-6]。

近年来, 中国深空探测逐步开展, 北斗卫星导航系统开始提供全球服务, 这都要求中国拥有高精度的 EOP 快速服务能力。中国 VLBI 网 (China VLBI Network, CVN)^[7-8] 由位于上海、北京、昆明和乌鲁木齐的 4 个

资助项目：国家自然科学基金 (12073065)

第一作者：钟胜坚, 硕士, 研究方向为空间大地测量。zhongshengjian@126.com

通讯作者：舒逢春, 博士, 研究员。sfc@shao.ac.cn

VLBI 站和上海 VLBI 数据处理中心组成, 主要用于中国深空探测器的导航定位, 仅上海站和乌鲁木齐站参加了国际 VLBI 大地测量与天体测量服务组织(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS)开展的 EOP 国际联测, 每次观测持续 24 小时, 其中上海每年参加 30 次左右, 乌鲁木齐每年不到 10 次, 没有形成独立自主的 EOP 测量业务运行能力。

IVS 正在推进 VLBI 全球观测系统(VLBI Global Observing System, VGOS)的建设^[9-10], 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。上海 VLBI 相关处理机是 IVS 处理机之一, 目前承担着亚太空间地球动力学(Asia-Pacific Space Geodynamics, APSG)^[11]和亚洲大洋洲 VLBI 网(Asia-Oceania VLBI, AOV)^[12-13]等观测计划的组织协调和数据相关处理任务, 也将承担 VGOS 数据的相关处理。中国正在北京、上海和乌鲁木齐建设 VGOS 测站, 系统建设后, 将成为国际 VGOS 观测网的重要组成部分。虽然 VGOS 站越来越多, 但目前 IVS 开展的 VGOS 观测的站网构型并不理想, 台站集中在北半球。此外, VGOS 的数据记录速率高达 8 Gbps, 使得数据传输和相关处理存在瓶颈。因此, 利用尽可能少的 VGOS 站, 通过优化台站观测网络的几何构型实现高精度的 EOP 测量, 是目前迫切需要解决的问题。

在 VGOS 系统的设计和建设阶段, 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^[9,14-15]。针对中国 VGOS 站建设, 范昊鹏等利用蒙特卡洛仿真^[16-17]分析了国内 10 台站 VGOS 网^[6]的 EOP 测量能力, 如果采用相同的站网构型, VGOS 观测网的 EOP 测量精度比传统 S/X 频段观测网提升约 4 倍^[8]。Schartner 等采用批量生成观测纲要结合蒙特卡洛仿真的方法, 基于 6 台站观测网、12 台站观测网和 18 台站观测网分析了新建 VGOS 站的站址选择对

EOP 测量精度的影响, 发现在南半球尤其是在南美洲南部地区建站能够较大地提升 EOP 测量精度^[2,18]。

本文采用 Schartner 等人提出的方法, 从中国实际情况出发, 以 3 个国内 VGOS 站为核心站, 通过引入 2 个国外站进行 5 站联合观测仿真, 以此分析评估不同站网构型的 EOP 测量能力, 从而为后续开展 EOP 测量的 VGOS 组网观测提供参考。针对不同站网构型, 本文利用 VieSched++ 软件^[19]通过调整 4 个约束条件的权重因子批量生成相应的观测纲要, 并基于这些观测纲要采用蒙特卡洛方法进行数据仿真, 以 EOP 解算参数的可重复性(repeatability)作为评价指标, 比较各个网型的 EOP 测量能力。在国际上, 可重复性通常定义为解算参数的标准差^[2], 本文也采用相同的定义。

1 VGOS 站网构型

依靠国内在建的 VGOS 站可以实现 EOP 的独立自主测量, 但国际水平的 EOP 高精度测量仍然需要通过国际联测实现。本仿真实验以国内的上海站(Sh)、北京站(Bj)和乌鲁木齐站(Ur)为核心站, 为了优化站网构型, 在南-北方向, 从澳大利亚的霍巴特站(Hb)和印度尼西亚的万隆站(Bd)中选择 1 个站, 在东-西方向, 从南非约翰内斯堡的哈特比站(Hr)和美国夏威夷的克奇站(K2)中选择 1 个站。国外站中, Hb 和 K2 站已常规运行, Hr 站还在调试中, Bd 站^[20]虽然还在规划中, 但它的天线参数按标准 VGOS 天线设置。扩展后的观测网由 3 个国内站和 2 个国外站组成, 共有 4 种网型分布, 其地理分布如图 1 所示。为了方便起见, 为各个网型赋予不同的网型代码, 各网型参与台站如表 1 所示, 其中 NET00 表示由 3 个国内站组成的网型, 在文中同样进行仿真, 用于后续的对照。同时, 表 1 中还列出了各网型的平均基线长度。

表 1 EOP 观测网型代码及相关信息

Tab. 1 VGOS Networks Code and Related Information

网型代码	台站代码	平均基线长/(km)
------	------	------------

NET00	Sh Bj Ur	2273.3
NET01	Sh Bj Ur Hr Hb	7179.4
NET02	Sh Bj Ur Hr Bd	5929.3
NET03	Sh Bj Ur K2 Hb	6549.4
NET04	Sh Bj Ur K2 Bd	5527.3

注 Sh-上海站, Bj-北京站, Ur-乌鲁木齐站, Hr-南非哈特比站, Hb-澳大利亚霍巴特站, Bd-印度尼西亚万隆站, K2-美国夏威夷克奇站。

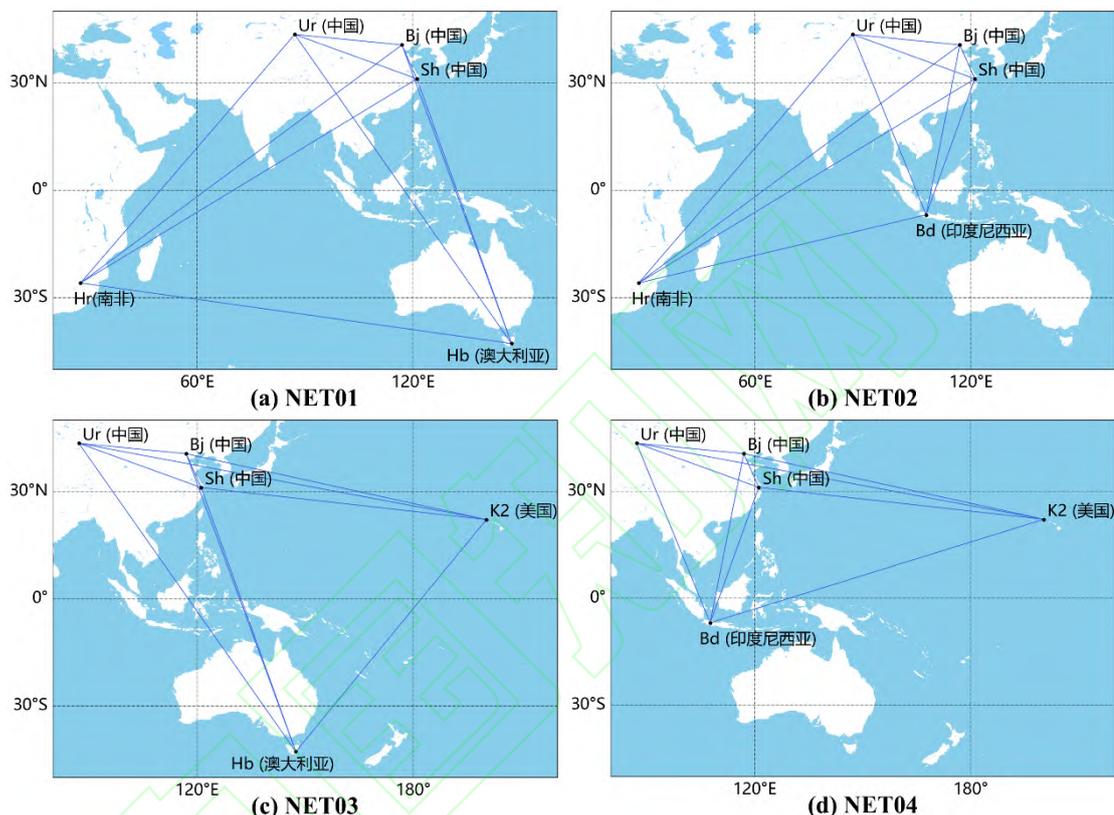


图 1 台站分布及网型示意图

Fig. 1 Antennas Distribution and Networks Diagram

2 仿真分析流程

为了得到最佳的国际联测方案, 本文模拟实际的 EOP 观测, 并采用蒙特卡洛方法对各个网型进行仿真分析。在仿真分析过程中, 涉及到观测纲要的生成及优化、时延测量的仿真以及参数解算等步骤, 同时考虑

湿大气延迟、钟差以及系统热噪声三类主要误差的影响^[8-9,18]。由于这三类误差难以建立精确的误差模型, 且对解算参数的精度影响不确定。所以, 国际上通常采用蒙特卡洛方法分析不同的误差对参数解算精度的影响, 通过足够多次实验, 来获得用于表征解算值精度的可重复性值。

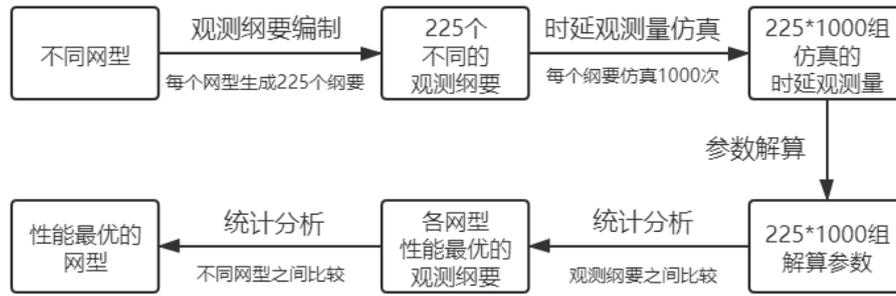


图 2 EOP 测量数据仿真解算流程图

Fig. 2 Flow Chart of EOP Observational Data Simulation and Parameters Estimation

EOP 观测数据仿真解算流程如图 2 所示，仿真过程主要包括三个部分：

(1) 根据不同网型分别生成相应的观测纲要。对于每一个网型，根据不同的策略生成 225 个不同的观测纲要，4 个不同网型共可生成 900 个不同的观测纲要；

(2) 在获得观测纲要后，根据每个观测纲要生成仿真的“时延观测量”。为了使结果具有统计特性，本文采用蒙特卡洛方法，对每一个观测纲要进行 1000 次仿真。也就是说，对于每一个网型，要进行 $225 \times 1000 = 225000$ 次仿真，对于 4 个不同网型，需要仿真 900000 次，即得到 900000 组不同的“时延观测量”，每组“时延观测量”都包含 24 小时观测数据；

(3) 对仿真获得的每组“时延观测量”进行参数解算，并对解算结果进行统计分析，以解算参数的可重复性作为评价指标，通过比较得出 EOP 测量能力最强的网型。为了得到最优的网型，本文包含两个比较过程。第一个是在同一网型的不同观测纲要之间，目的是为了找出该网型 EOP 测量能力最强的观测纲要，并以该观测纲要的 EOP 测量能力作为该网型的 EOP 测量能力。第二个比较过程是在不同网型之间，通过比较不同网型的 EOP 测量能力，筛选出最优的网型。

2.1 观测纲要编制

观测纲要文件包含观测站的位置、天线参数、终端参数、观测频率设置和一系列观测片段 (scan) 等具体信息。本文利用 VieSched++ 软件批量生成观测纲要的功能^[19]，通过调整不同约束条件的权重组合，生

成一系列对应不同观测策略的观测纲要文件。

本文采用的约束条件包括“天空覆盖”、“观测数量”、“观测时长”和“空闲时间”^[19,21]，其权重因子的组合表示为 $(\omega_{sky}, \omega_{nobs}, \omega_{dur}, \omega_{idle})$ ，每个约束条件的权重因子可取值 0.00、0.33、0.66 或者 0.99。其中，“天空覆盖”约束条件使得所观测的射电源能够较为均匀的分布在天区，这有助于解算湿大气延迟，进而提高参数解算精度。

“观测数量”约束条件可增加观测数量，以提高冗余度。“观测时长”包括天线对射电源的观测时间、天线校准时间以及转动时间等，该约束条件可缩短 scan 持续的时间，但由于 VGOS 观测对射电源观测时长固定在 30 s，所以只能压缩优化天线转动时间，以此获得更多的观测量，提高冗余度。“空闲时间”约束条件可减少各个天线的闲置时间，让天线尽可能多地加入到观测中^[18-19]。这四个约束条件和四个不同权重共有 256 种组合。但是，权重组合注重各权重因子之间的比例关系，如权重因子组合 (0, 0, 0, 0.33) 与 (0, 0, 0, 0.66) 对编制观测纲要的影响是相同的，故认为是相同组合。经统计，共有 225 个不同效果的组合，即能够生成 225 个不同的观测纲要。

2.2 时延观测量仿真

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，其中部分误差可以通过双频观测、实际测量或者精准建模等方法在很大程度上消除影响。但天顶湿大气延迟、

钟差以及系统热噪声由于其极强的随机性, 目前不能采取有效手段消除其影响, 已经成为 VLBI 观测中影响最大的几类误差源^[9,14]。虽然射电源结构也是 VLBI 观测中的一类主要误差, 但由于模型限制等原因, 在本文中尚未考虑。

在仿真过程中, 模拟实际观测, 根据已有的观测纲要, 对观测纲要中每个 scan 中

$$(\tau_{obs} - \tau_{cal}) = (zwd_2 \cdot mfw_2 + clock_2) - (zwd_1 \cdot mfw_1 + clock_1) + wn \quad (1)$$

式中 zwd_1 、 zwd_2 分别表示两个站的天顶湿大气延迟; mfw_1 、 mfw_2 分别表示湿大气延迟映射函数^[4,22]。在本仿真实验中, 采用 $1/\sin(el)$ 作为映射函数, 其中 el 表示 VLBI 站观测射电源的地平高度角^[19]; $clock_1$ 、 $clock_2$ 分别表示两个站的钟差, wn 表示观测过程中系统的热噪声^[9]。

在蒙特卡洛仿真过程中, 我们利用每个观测纲要生成 1000 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, 以便于评估各观测纲要或各网型的 EOP 测量能力。

(1) 湿大气延迟

的所有基线进行时延观测仿真, 在仿真过程中加入湿大气延迟、钟差以及热噪声产生的误差。进一步利用仿真的“观测时延 τ_{obs} ”和“理论时延 τ_{cal} ”求差, 得到用于参数解算的“时延观测残差 $\tau_{obs} - \tau_{cal}$ ”。由于理论时延将在解算过程中作为初始值被扣除, 故在本文中, $\tau_{obs} - \tau_{cal}$ 即表示以上三种误差的综合影响^[9,14]。其模型如式(1)所示。

大气湍流导致大气折射率在空间和时间上发生变化, 影响电磁波在大气中传播路径与速度, 从而导致信号延迟^[23]。由于大气湍流的随机性, 尚不能对其精准建模, 使得湿大气延迟成为 VLBI 观测中最大的偶然误差源之一。本文采用 Nilsson 等^[24]提出的模型进行天顶湿大气延迟仿真。表 2 列出了仿真实验中采用的模型参数, 其中 C_n 表示大气折射因子结构常数, H 表示有效湿大气高度, dH 表示数值积分的高度步长, $dhseg$ 表示相关间隔, ve 、 vn 分别表示东向风速和北向风速。 $wzd0$ 表示基准天顶湿大气延迟。

表 2 仿真中采用的天顶湿大气模型参数

Tab. 2 The Parameters of the Zenith Wet Atmosphere Delay Model Used in the Simulation

参数名	数值	单位
大气折射因子结构常数: Cn	1.80e-7	$m^{-1/3}$
有效湿大气高度: H	2000	m
数值积分高度步长: dh	200	m
相关间隔: dhseg	2	h
东向风速: ve	8	m/s
北向风速: vn	0	m/s
基准天顶湿大气延迟: wzd0	150	mm

(2) 钟差

VLBI 站氢原子钟的稳定性易受温度等外界因素的影响,使得钟差表现出随机漫步的特性,影响参数解算中钟差的建模与解算精度,不利于测量精度的提高。在本文中,采用随机漫步和综合随机漫步模型对时钟随机误差进行仿真分析^[25],时钟的 Allan 标准差 (Allan Standard Deviation, ASD) 为 $1.0e - 14s@50 \text{ min}$ 。

(3) 热噪声

在传统的 S/X 频段测地 VLBI 观测中,由于天线灵敏度和观测带宽的限制,时延测量的热噪声典型值约为 32 ps ^[17]。VGOS 站采用超宽带接收系统,观测带宽提高了 1 个量级,时延测量的热噪声可以降低到 4 ps 左右^[9,14]。当前的 VGOS 实际观测表明其时延测量误差设置为 4 ps 是合理的。故本文仿真过程中的时延测量误差设置为 4 ps ,即期望为 0,标准差为 4 ps 高斯白噪声。

2.3 参数解算

对于 24 小时的 EOP 组网观测,观测时间长,观测数量较多,其解算参数也相对较多。本文采用最小二乘和分段线性拟合进行参数解算,针对每组仿真的观测数据,解算

参数主要包括 EOP 和站坐标,并对所有台站施加无整体平移及无整体旋转约束。钟差参数每 60 分钟解算一次,天顶湿大气延迟每 20 分钟解算一次,东西方向和南北方向的大气梯度每 60 分钟解算一次^[2,18-19]。

2.4 统计分析

如图 2 所示,本仿真实验有两个比较过程。一是在同一网型不同观测纲要之间比较,二是不同网型之间的比较。在该类仿真实验中,国际上通常采用解算参数的可重复性作为其测量精度的指标。在本文中,解算参数的可重复性定义为 1000 次仿真对应的 1000 个参数估计值的标准差。此外,本文还考虑到解算参数的平均形式误差 (mean formal error),即 1000 次仿真实验对应的 1000 个形式误差 (formal error) 的平均值。

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^[6],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 (RMS_EOP) 作为该次仿真对 EOP 测量能力的评价指标,其计算方式如式(2)所示。

$$RMS_EOP = \sqrt{\frac{REP_dUT1^2 + REP_XP^2 + REP_YP^2}{3}} \quad (2)$$

式中 RMS_EOP 表示一个观测纲要对应的解算参数的可重复性值的均方根。 REP_dUT1 表示同一个观测纲要经过 1000 次仿真后得到的 1000 个不同 $dUT1$ 值的可重复性值，即标准差， REP_XP 、 REP_YP 分别表示 1000 个不同极移 X 分量 (XP) 和 Y 分量 (YP) 值的可重复性值。通过第一个比较过程，筛选出各个网型最优的观测纲要，即该观测纲要对应的 RMS_EOP 最小。将该 RMS_EOP 作为该网型的 EOP 测量能力指标，参与到第二个比较过程。在第二个比较过程中，比较各个网型对应的 RMS_EOP ，筛选出 EOP 测量能力最强的网型。

3 结果与讨论

3.1 仿真结果分析

根据上一节的仿真方法，对表 1 列出的

表 3 各网型解算结果对比

Tab. 3 Comparison of Estimation Results of Different networks

网型代码	ω_{sky}	ω_{nobs}	ω_{dur}	ω_{idle}	RMS_EOP/(μas)	比例因子
NET00	0.99	0.99	0.33	0.33	563.18	1
NET01	0.99	0	0.33	0.33	58.37	9.6
NET02	0.66	0	0	0.99	66.34	8.5
NET03	0.99	0	0.33	0	76.42	7.4
NET04	0.66	0	0	0.99	86.81	6.5

5 个网型进行了仿真分析，采用 RMS_EOP 作为评价指标，评估各网型的 EOP 测量能力，统计对象为各网型 RMS_EOP 最佳的观测纲要。表 3 展示了各网型最优观测纲要对应的不同约束条件的权重以及 RMS_EOP 的数值，其中，比例因子表示各网型相对于 NET00 的 RMS_EOP 提升的倍数。从表中可以看出，不同网型约束条件权重比例不同，但总体上“天空覆盖”权重较大。另外，相对于由国内三站组成的网型，加入两个国外站的网型 EOP 测量能力普遍提高，尤其是由国内三站、南非哈特比站和澳大利亚霍巴特站组成的 NET01 网型，其 EOP 测量能力为 NET00 的 9.6 倍，分别是 NET02、NET03、NET04 的 1.1 倍、1.3 倍和 1.5 倍。因此，在高精度 EOP 测量中，开展国际联测和优化站网构型非常重要。

图 3 从观测数量、EOP 估计参数的平均形式误差和可重复性方面对不同 VGOS 网型的测量能力进行了比较, 其中国内三站

具有较高的 dUT1 测量能力。相对于由国内三个 VGOS 台站组成的网型 NET00, 网型 NET01 和 NET02 对 dUT1 的测量能力分别

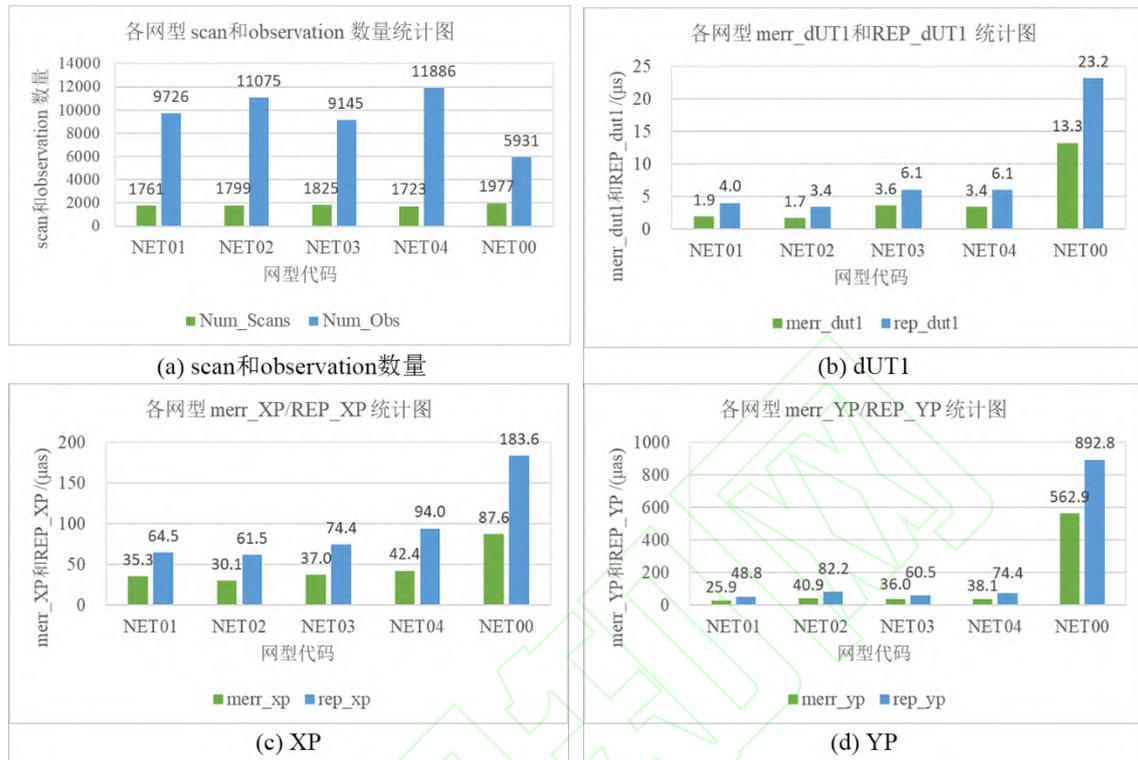


图 3 各网型 EOP 精度指标统计图

Fig. 3 Statistical Diagram of EOP Accuracy for Each Network

组成的网型 NET00 作为参照。从图 3 (a) 可以发现, 5 个网型的 scan 数量基本一致, 但 5 台站观测网 (NET01~04) 的观测数量比国内 3 台站观测网增加 1 倍左右。这是由于有多于 2 站同时对一个射电源进行观测, 能够产生更多的观测数。图 3 (b)、图 3 (c) 和图 3 (d) 分别展示了各网型测量 dUT1、XP 和 YP 参数的平均形式误差和可重复性值。从图 3 (b) 可以看出, 网型 NET01 和 NET02

提高 5.7 和 6.7 倍。通常来讲, dUT1 的测量精度和基线的东西方向上的跨度呈正相关关系。从图 3 (c)、(d) 中可以发现, 相对而言, NET02 具有最高的 XP 测量能力, 而 NET01 具有最高的 YP 测量能力。相对于由国内三台 VGOS 天线组成的网型 NET00, 网型 NET01 测量 dUT1、XP 和 YP 三个 EOP 分量的精度分别提高 5.7 倍、2.8 倍和 18.3 倍。

3.2 与 VGOS 实测结果的比较分析

2020 年, IVS 共组织了 24 次 VGOS 观测, 但目前只有部分观测完成了相关处理。我们下载了 IVS 数据中心公开释放的 5 组最新 vgosDB 数据, 利用 nuSolve 软件^[26]进行了 EOP 参数解算。同时, 根据上述实际观测采用的观测纲要文件, 剔除了其中未参与观测或者参数解算的台站, 按照上节所述的方法对修改后的观测纲要进行了蒙特卡洛仿真。为了保证对比结果的一致性, 在实测

数据和仿真数据的参数解算过程中均固定台站坐标, 解算钟差、湿大气、大气梯度、dUT1、极移和章动改正等参数。

表 4 列出了 5 次 VGOS 实测数据解算和蒙特卡洛仿真获得的 EOP 参数解算精度, 同时还列出了 VGOS 实际观测和仿真分析中使用的台站数、观测数量和时延拟后残差的加权均方根(WRMS)。其中实测结果采用 EOP 解算参数的形式误差作为比较指标, 蒙特卡洛仿真结果采用 EOP 解算参数的平均形式误差作为比较指标, 相对偏差表示实测

结果和仿真结果的差值与实测结果之比, 即 (实测-仿真)/实测。从表中可以发现, 观测数量和时延拟后残差是影响 EOP 测量精度的重要因素。VO0174 和 VO0202 仿真结果显著优于实测结果, 原因在于实测数据质量相对较差, 例如, VO0174 实际观测的 WRMS

时延残差约 53 ps, 远大于仿真分析得到的时延拟后残差 29.7 ps; 其余 3 次观测的仿真结果与实测结果差异较小, 均在 25% 以内, 表明在观测数据质量正常的情况下, 仿真方法可以用来大致评估实际观测的 EOP 参数解算精度。

表 4 仿真解算精度与实测数据解算精度

Tab. 4 Mean Formal Errors of Simulations and Formal Errors of Actual Observations

观测代码	台站数量	观测数量	WRMS (ps)	dUT1 (μ s)	XP (μ as)	YP (μ as)	备注
VO0147	6	8362	31.11	1.70	37.71	28.76	实测
		8575	28.72	1.54	36.07	27.66	仿真
		-0.03	0.08	0.10	0.04	0.04	相对偏差
VO0174	7	11293	53.36	2.36	55.58	43.56	实测
		12844	29.70	1.37	34.05	25.30	仿真
		-0.14	0.44	0.42	0.39	0.42	相对偏差
VO0202	8	14804	42.86	1.77	44.89	33.14	实测
		15934	28.61	1.27	30.64	22.44	仿真
		-0.08	0.33	0.28	0.32	0.32	相对偏差
VO0219	7	10490	32.74	1.58	40.40	31.72	实测
		12034	28.59	1.39	34.69	25.99	仿真
		-0.15	0.13	0.12	0.14	0.18	相对偏差
VO0287	5	4292	38.18	2.43	62.34	51.39	实测
		5162	27.59	1.98	48.36	41.22	仿真
		-0.20	0.28	0.18	0.22	0.20	相对偏差

需要说明的是, 利用实测数据解算的 EOP 参数只有形式误差, 无法获得通过多次观测实验才能得到的 EOP 可重复性值。而利用蒙特卡洛方法进行 1000 次仿真解算有对应的 1000 组解算参数的形式误差, 所以

在此处采用 1000 组对应解算参数形式误差的平均值作为比较指标。另外, EOP 解算参数的平均形式误差和对应的可重复性有很强的相关性, 均能用于站网构型的测量性能评估^[18]。

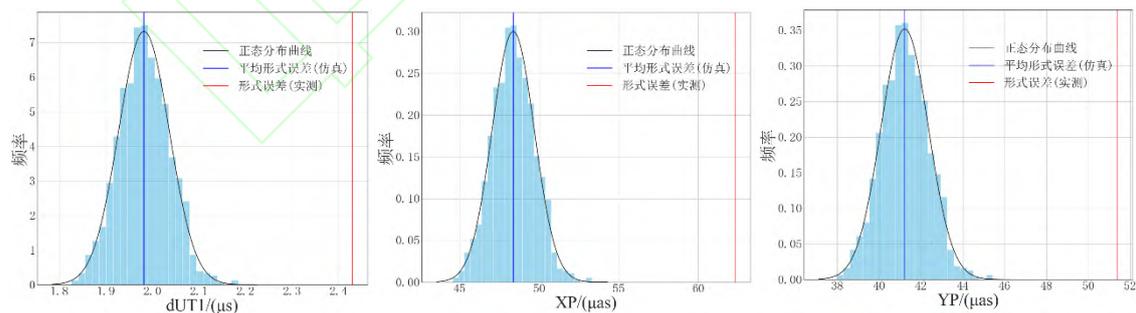


图 4 仿真解算参数形式误差频率直方图和实测数据解算精度

Fig. 4 Frequency Histogram of Formal Errors of Estimated EOP Parameters for Simulated Data and Actual Observations

图 4 展示了 VO0287 观测 dUT1 和极移两个分量形式误差的频率直方图, 统计对象为仿真解算得到的 1000 组 EOP 参数的形式误差。从图中可以看出, 仿真解算得到的

1000 个参数形式误差符合正态分布, 其期望与实测数据解算参数的形式误差相差较小。

为了进一步验证中国 VGOS 台站参与的 5 台站网型的 EOP 测量能力, 将 NET01

仿真解算结果的平均形式误差与表 4 中列出的 IVS 实测数据解算结果的形式误差进行了对比, 其结果如图 5 所示。从图中可以看出, NET01 的 dUT1 测量能力与 IVS 采用的 VGOS 网型相当, 极移的 X 分量、Y 分量测量能力均优于 IVS 采用的 VGOS 网型。整体而言, NET01 的 EOP 测量能力优于当

前 IVS 采用的 VGOS 网型。从站网构型分析, 参加 IVS 观测的 VGOS 台站均集中在北半球, 而 NET01 包含的台站在南北方向分布相对均匀 (北半球三个台站, 南半球两个台站), 故能够利用更少的台站获得更强的 EOP 测量能力。

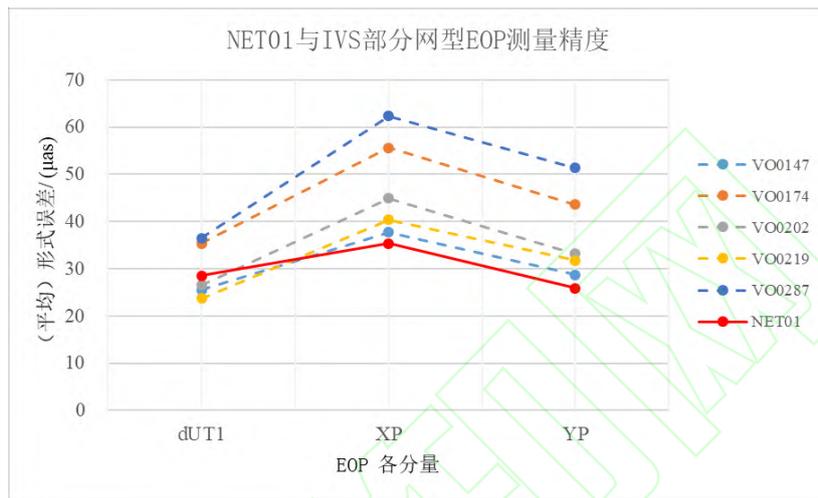


图 5 NET01 与 IVS 各网型 EOP 测量能力对比

Fig. 5 Comparison of EOP Measurement Capability Between NET01 and IVS VGOS Networks

4 总结与展望

本文利用 VieSched++ 软件, 通过调整不同限制条件权重组合的方法生成大量观测纲要, 再利用蒙特卡洛仿真方法对这些观测纲要进行仿真解算, 对利用中国 VGOS 站开展国际联测的 EOP 测量能力进行了仿真分析。针对分布在非洲、东南亚、澳大利亚以及夏威夷的四个 VGOS 台站, 通过一定的组合方式使之与国内的上海、北京和乌鲁木齐三个 VGOS 台站进行组网, 形成 4 个不同的网型。对这些网型进行 24 小时 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、钟差以及热噪声三类主要误差的影响, 统计分析各网型的 EOP 测量能力。

仿真结果表明, 由我国 VGOS 台站参与的国际 5 台站观测网 EOP 测量能力均远远优于国内 3 台站观测网, 其中, 由上海站、北京站、乌鲁木齐站、南非的哈特比站以及澳大利亚的霍巴特站组成的网型, EOP 总体测量能力提高约 9 倍, 分别是其他 3 个网型

的 1.1 倍、1.3 倍和 1.5 倍。相对于由国内 3 台 VGOS 天线组成的网型, 该网型测量 dUT1、XP 和 YP 三个 EOP 分量的精度可分别提高 5.7 倍、2.8 倍和 18.3 倍。此外, 通过与 IVS 组织开展的 VGOS 观测结果对比, 发现该网型 EOP 测量能力优于 IVS 当前所用网型, 说明了优化 EOP 观测网型的重要性。

中国 3 站 VGOS 观测网建成后, 将具备 EOP 的自主测量能力, 但测量精度无法达到国际水准。通过国际联测提高 EOP 测量精度, 有助于促进 EOP 的应用研究。随着 VGOS 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将进一步增加。采用本文所使用的仿真方法, 可为中国后续开展高精度 EOP 组网观测提供参考依据。

致谢: 感谢维也纳技术大学的 Matthias Schartner 博士在 VGOS 仿真分析过程中提供的帮助及建议。本文利用的 VGOS 观测实测数据来源于 IVS 数据中心的公开数据, 由 IVS 组织实施观测, 美国麻省理工学院海斯塔克天文台和德国波恩马普射电天文研究

所完成相关处理。

参 考 文 献

- [1] Sovers 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.
- [2] Schartner M, Böhm J. Optimizing schedules for the VLBI global observing system[J]. *Journal of geodesy*, 2020, 94(1): 1-10.
- [3] Zhang Zhibin, Wang Guangli, Liu Xiang, et al. Analysis of EOP Determination via Chinese VLBI Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 911-915 (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)
- [4] Nothnagel A. Very long baseline interferometry[M]// *Mathematische Geodäsie/Mathematical Geodesy*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2020: 1257-1314.
- [5] Liu Shan hong, Yan Jianguo, Ye Mao, et al. Contributions of Chinese VLBI Network to the Low Degree Coefficients of the Jupiter Gravity Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 862-869 (刘山洪, 鄢建国, 叶茂, 等. 中国 VLBI 观测网对木星低阶重力场解算的贡献[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(6): 862-869)
- [6] Li Jinling, Wei Erhu, Sun Zhongmiao, et al. Discussion on Future Configuration Design of Chinese Astrometric and Geodetic VLBI Network [J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 670-673 (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)
- [7] Shu F, Petrov L, Jiang W, et al. VLBI ecliptic plane survey: VEPS-1[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 230(2): 13.
- [8] Fan Haopeng, Sun Zhongmiao. Capability Analysis of the New-Generation VLBI Network in China [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018, 035(2): 141-146 (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)
- [9] 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*, Greenbelt, MD, USA, 2010.
- [10] Haas R, Nothnagel A, Petrachenko B. VGOS-the VLBI Global Observing System of the IVS[J]. *IAU General Assembly*, 2015, 29: 2257511.
- [11] Wang Guangli, Ye Shuhua, Qian Zhihan, et al. Measurements of the VLBI experiments during the first campaign of the Asian-Pacific space geodynamics (APSG) program[J]. *Science in China Series A: Mathematics*, 2001, 44(2):259-264. (王广利, 叶叔华, 钱志瀚, 等. 亚太地区空间地球动力学研究计划(APSG)首期 VLBI 联测结果[J]. *中国科学(A 辑)*, 2000(6): 572-576)
- [12] Kurihara S, Lovell J, Cho J, et al. Foundation of the Asia-Oceania VLBI Group for Geodesy and Astrometry[J]. *IVS 2014 Annual Report*, 2014: 20-25.
- [13] Mccallum L, Wakasugi T, Shu F. Current Activities and Plans of the AOV-Asia-Oceania VLBI Group [C]// *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2018 General Meeting Proceedings: Global Geodesy and the Role of VGOS-Fundamental to Sustainable Development*, 2019: 131-134.
- [14] Niell A, Whitney A, Petrachenko B, et al. VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems[R]. *2005 IVS Annual Report*, pp. 13-40, 2006.
- [15] Sun J, Böhm J, Nilsson T, et al. New VLBI2010 scheduling strategies and implications on the terrestrial reference frames[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(5): 449-461.
- [16] Metropolis N, Ulam S. The monte carlo method[J]. *Journal of the American statistical association*, 1949, 44(247): 335-341.
- [17] Pany A, Böhm J, MacMillan D, et al. Monte Carlo simulations of the impact of troposphere, clock and measurement errors on the

- repeatability of VLBI positions[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(1): 39-50.
- [18] Schartner M, Böhm J, Nothnagel A. Optimal antenna locations of the VLBI Global Observing System for the estimation of Earth orientation parameters[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72(1): 1-14.
- [19] Wresnik J, Böhm J, Schuh H. Monte Carlo Simulations for VLBI2010[C]// *Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Work Meeting*. 2007 (79): 168-174.
- [20] Hidayat T, Munir A, Dermawan B, et al. Radio frequency interference measurements in Indonesia[J]. *Experimental Astronomy*, 2014, 37(1): 85-108.
- [21] Schartner M. Optimizing geodetic VLBI schedules with VieSched++ [D]. *Department für Geodäsie und Geoinformation*, 2019.
- [22] Boehm J, Schuh H. Vienna mapping functions in VLBI analyses [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1).
- [23] Treuhaft R N, Lanyi G E. The effect of the dynamic wet troposphere on radio interferometric measurements [J]. *Radio Science*, 1987, 22(2): 251-265.
- [24] 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*. *Goewissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien*, 2007, 1213: 175-180.
- [25] 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.
- [26] Bolotin S, Baver K, Gipson J, et al. The First Release of nuSolve[C]// *IVS 2012 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2012-217504*. 2012: 222-226.

Simulated Analysis of EOP Measurement Accuracies with participation of Chinese VGOS Stations in International Observations

ZHONG Shengjian^{1,2} SHU Fengchun^{2,3} LI Jinling² WU De^{2,4} HE Xuan²
TONG Fengxian²

1 School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai, 200444, China

2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

3 Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Very Long Baseline Interferometry (VLBI) is one of the main space geodetic techniques for monitoring Earth Orientation Parameters (EOP). China is building three VLBI Global Observing System (VGOS) antennas. In order to improve the EOP measurement accuracies, it is necessary to optimize VGOS observing network by extending the domestic VGOS network to an international network. We set the three Chinese VGOS stations located at Shanghai, Urumqi and Beijing as core stations. By adding two international stations selected from four candidate sites located at Hobart of Australia or Bandung of Indonesia, as well as Johannesburg of

South Africa or Hawaii of USA, we could form four different 5-station VGOS networks. The performance of EOP measurement accuracies for each network were analyzed based on generation of bulk observing schedules and subsequent large-scale Monte-Carlo simulations. We use the repeatability value defined as standard deviation of EOP estimates as an indicator to evaluate the performance of each schedule and each network. We also compared the EOP formal errors of current VGOS observing sessions to our simulation results. The results show: (1) The EOP measurement capability of the expanded 5-station networks are all much better than that of the 3-station domestic network. (2) The optimized 5-station network, which consists of 3 domestic antennas, Johannesburg in South Africa and Hobart in Australia, has the best EOP measurement results. Compared to the 3-station domestic network, the repeatability of dUT1, the pole motion XP and YP components are decreased by a factor of 5.7, 2.8 and 18.3 respectively. (3) The optimized 5-station network could reach equal or even better EOP estimates than that of the current IVS VGOS observing networks. We demonstrated that the EOP measurement accuracies can be improved by optimizing the observing network based on Monte Carlo simulations. The simulation results can be served as a start point for the future development of high-precision EOP observing program in China.

Keywords: VLBI; EOP; VGOS; Monte Carlo simulator

First author: ZHONG Shengjian, master, specializes in space geodesy. E- mail: zhongshengjian@126.com

Corresponding author: SHU Fengchun, PhD, professor. E- mail: sfc@shao.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (12073065)

网络首发:

标题: 利用中国 VGOS 站开展国际联测的 EOP 精度仿真分析

作者: 钟胜坚, 舒逢春, 李金岭, 吴德, 何旋, 童锋贤

收稿日期: 2021-05-01

DOI:10.13203/j.whugis20210204

引用格式:

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, DOI: 10.13203/j.whugis20210204 (ZHONG Shengjian, SHU Fengchun, LI Jinling, et al. Simulated Analysis of EOP Measurement Accuracies with participation of Chinese VGOS Stations in International Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210204)

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:

利用 2006—2015 年 VLBI 数据进行地球定向参数解算与分析

李斐, 邵先远, 曲春凯, 鄢建国, 郝卫峰, 叶茂, 杨轩, 金炜桐
武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(11): 1581-1587
<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20170365>

卫星大地测量学的研究现状及发展趋势

程鹏飞, 文汉江, 刘焕玲, 董杰
武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(1): 48-54
<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180356>

