



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: 基于载波相位差分的多频多 GNSS 测速精度评估
作者: 耿涛, 丁志辉, 谢新, 吕逸飞
DOI: 10.13203/j.whugis20200226
收稿日期: 2020-05-14
网络首发日期: 2021-02-22
引用格式: 耿涛, 丁志辉, 谢新, 吕逸飞. 基于载波相位差分的多频多 GNSS 测速精度评估. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200226>



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.whugis20200226

引用格式:

耿涛, 丁志辉, 谢新, 等. 基于载波相位差分的多频多 GNSS 测速精度评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版,

DOI:10.13203/j.whugis20200226 (GENG Tao, DING Zhihui, XIE Xin, et al. Accuracy Assessment of

Multi-frequency and Multi-GNSS Velocity Estimation With Time Differenced Carrier Phase Method[J].

Geomatics and Information Science of Wuhan University, DOI:10.13203/j.whugis20200226)

基于载波相位差分的多频多 GNSS 测速精度评估

耿涛¹ 丁志辉¹ 谢新¹ 吕逸飞¹

¹ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

摘要: 基于载波相位历元间差分测速方法, 建立了 GNSS 单点测速的数学模型, 分析了其误差源, 并结合实测数据对多 GNSS 系统各频点及其无电离层组合、不同系统组合的测速精度进行了对比分析。实验结果表明: 不同系统不同频点的测速精度有所差异, BDS 的 B1I、B1C、B3I、B2a 频点和 Galileo 的 E1、E5a、E6、E5b、E5 频点的测速精度相当, 水平方向优于 1.5 mm/s, 高程方向优于 3 mm/s; BDS 的 B2I 和 GPS 的 L1、L2、L5 频点的测速精度相当, 水平方向在 1.5~2 mm/s, 高程方向在 3~4 mm/s; GLONASS 的 G1、G2 频点测速精度最差, 水平方向在 3~4 mm/s, 高程方向在 5~5.5 mm/s; 双频无电离层组合由于放大了观测值噪声, 其测速精度低于单频。此外, 多 GNSS 组合增加了可见卫星数, 降低了 PDOP 值, 能够显著提高测速精度。相对于单 GPS 系统, GPS/BDS/GLONASS/Galileo 组合测速精度在水平方向提高 40%, 高程方向提高 46%; 在截止高度角 40° 时, 水平方向速度优于 1 cm/s、高程方向优于 2 cm/s 下的测速可用率由 48% 提高到 98%。

关键词: GNSS; 测速; 载波相位历元间差分; 多频

中图分类号: P228

文献标识码: A

速度是描述载体运动状态的重要参数之一, 在航空重力测量、无人驾驶、惯性导航系统等领域都需要高精度速度测量。传统的测速手段是借助于多普勒频移和激光, 全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的出现, 提供了一种新的测速手段。GNSS 测速以其高精度、实时性、廉价、全时段等优势, 成为一种主流定位测速方法。

利用 GNSS 测定载体速度的主要方法有位置差分测速、原始多普勒观测值测速、伪距差分测速和载波相位差分测速 (Time-Differenced Carrier Phase, TDCP)^[1-2]。位置差分测速是对定位结果进行差分来获得速度信息, 标准定位服务 (Standard

Positioning Service, SPS) 精度为米级, 测速精度仅在 dm/s^[3]; 精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 精度可以到 cm 量级, 测速精度可达 mm/s 量级, 但 PPP 需要高精度的实时轨道和钟差产品, 且并非每时每刻都能获得稳定可靠的定位结果^[4], 满足不了实时高精度测速需求。原始多普勒观测值测速精度一般为 cm/s 量级^[5], 然而很多低成本的接收机不支持输出原始多普勒观测值。伪距差分测速方法是利用相邻历元间伪距观测值差分获得速度, 测速精度与伪距精度、载体的观测环境和运动状态有关, 最高可达 dm/s 量级^[2]。TDCP 方法是对相邻历元间的载波相位观测值进行差分, 历元差分后显著削弱了电离层、对流层的影响, 在连续无周跳条件

收稿日期: 2020-05-14

项目资助: 国家自然科学基金(41674004; 41974036); 湖北省自然科学基金 (2019CFA051)

第一作者: 耿涛, 博士, 教授, 主要研究方向为 GNSS 卫星精密定轨定位, gt_gengtiao@whu.edu.cn

通讯作者: 谢新, 博士, xiexin@whu.edu.cn

下也消除了载波相位的整周模糊度，且只需要广播星历，利用单台接收机就可以实现 mm/s 实时测速精度^[6-7]，在实时地震监测^[8-9]、海啸预警^[10]等方面得到了广泛应用。

GNSS 主要包括 GPS、北斗 (BDS)、Galileo、GLONASS 等系统。截止 2020 年 5 月，GPS 在轨卫星共 32 颗，发射 L1、L2、L5 频点信号。北斗在轨卫星共 44 颗，其中 BDS-2 卫星提供 B1I、B2I、B3I 三个频点的公开服务信号，BDS-3 卫星提供 B1I、B1C、B2a、B3I 频点公开服务信号。Galileo 在轨卫星共 26 颗，所有卫星均发射 E1、E6、E5、E5a、E5b 频点信号。GLONASS 在轨卫星共 24 颗，不同于 GPS 的码分多址，GLONASS 采用频分多址，每颗卫星发射不同频率的信号，随着 GLONASS 现代化，后续发射卫星在原来频分多址信号 G1、G2 的基础上计划增加码分多址的 G3、G1a、G2a 信号^[11]。

目前，基于载波相位差分的 GNSS 测速研究大多是针对 GPS、BDS-2 单系统某一频点或双频无电离层组合的精度分析^[12-14]，也有学者对 GPS/GLONASS^[15]、GPS/BDS-2 双系统组合测速进行了探讨^[16-17]。近年来，多频多 GNSS 发展迅速，特别是中国 BDS-3 和欧盟 Galileo 系统，最近三年均经历了全球组网卫星的密集发射阶段，且都可播发四个频点及以上的导航信号。当前对新卫星、新频点的 BDS-3 测速、多 GNSS 组合测速以及 GNSS 不同频点的测速精度对比等方面研究较少。因此，有必要进一步对如今飞速发展的多频多 GNSS 测速精度进行全面评估。

本文首先给出了基于 TDCP 方法的多频多 GNSS 测速数学模型，并对测速误差源进行了分析，然后分别对 GPS、BDS (包括 BDS-2、BDS-3)、Galileo、GLONASS 各频点的单频测速、双频无电离层组合测速以及不同系统组合测速精度进行了分析比较，最后分析了多 GNSS 组合测速相对于单系统在不同截止高度角情况下的优势。

1 TDCP 测速原理与误差分析

1.1 TDCP 测速原理

载波相位观测方程如式 (1) 所示：

$$\lambda \varphi_{r,f}^s = \rho_r^s + c \cdot (\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s - I_{r,f}^s - \lambda N_{r,f}^s + \varepsilon_{r,f}^s \quad (1)$$

式中，上标 s 和下标 r 分别表示卫星和接收机； f 表示载波频率； λ 表示波长； φ 表示载波相位观测值； ρ 表示卫星到接收机的几何距离； c 表示光速； δt^s 、 δt_r 分别表示卫星钟差和接收机钟差； I 、 T 分别表示电离层延迟和对流层延迟； N 表示模糊度； ε 表示多路径和观测噪声的综合影响。假设前后观测历元未发生周跳，将式(1)进行历元间差分得：

$$\lambda \Delta \varphi_{r,f}^s = \Delta \rho_r^s + c \cdot (\Delta \delta t_r - \Delta \delta t^s) + \Delta T_r^s - \Delta I_{r,f}^s + \Delta \varepsilon_{r,f}^s \quad (2)$$

式中， Δ 表示历元间差分算子。在没有周跳发生的情况下，历元间差分消除了载波相位的模糊度参数。 $\Delta \rho_r^s$ 表示前后历元的卫地距之差，表示如下：

$$\Delta \rho_r^s = \rho_r^s(j) - \rho_r^s(j-1) = \mathbf{e}_r^s(j) \cdot [\mathbf{R}^s(j) - \mathbf{r}(j)] - \mathbf{e}_r^s(j-1) \cdot [\mathbf{R}^s(j-1) - \mathbf{r}(j-1)] \quad (3)$$

式中， j 、 $j-1$ 代表两个相邻历元； $\mathbf{e}_r^s = \frac{\mathbf{R}^s - \mathbf{r}}{|\mathbf{R}^s - \mathbf{r}|}$ 表示接收机位置到卫星位置的单位方向矢量； \mathbf{R}^s 、 \mathbf{r} 分别表示卫星和接收机的坐标向量。又有 $\mathbf{r}(j) = \mathbf{r}(j-1) + \Delta \mathbf{r}$ ，其中 $\Delta \mathbf{r}$ 为接收机前后历元位置变化量，故 $\Delta \rho_r^s$ 可以表示如下：

$$\Delta \rho_r^s = -\mathbf{e}_r^s(j) \cdot \Delta \mathbf{r} + \mathbf{e}_r^s(j) \cdot [\mathbf{R}^s(j) - \mathbf{r}(j-1)] - \mathbf{e}_r^s(j-1) \cdot [\mathbf{R}^s(j-1) - \mathbf{r}(j-1)] \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (2) 中，可将误差方程写为：

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} -\mathbf{e}_r^s & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{r} \\ c \cdot \Delta \delta t_r \end{bmatrix} - l$$

$$l = \lambda \Delta \varphi_{r,f}^s - \mathbf{e}_r^s(j) \cdot [\mathbf{R}^s(j) - \mathbf{r}(j-1)] + \mathbf{e}_r^s(j-1) \cdot [\mathbf{R}^s(j-1) - \mathbf{r}(j-1)] + c \cdot \Delta \delta t^s - \Delta T_r^s + \Delta I_{r,f}^s \quad (5)$$

式中， l 表示观测值与计算值之差，待求参数包括接收机位置变化量 $\Delta \mathbf{r}$ 和前后历元钟差变化量 $\Delta \delta t_r$ 。当可见卫星数达到 4 或以上时，可以由最小二乘法求得 $\Delta \mathbf{r}$ ，从而求得历元 j 和历元 $j-1$ 的平均速度 vel 。

$$vel = \frac{\Delta r}{t_j - t_{j-1}} \quad (6)$$

当进行多 GNSS 系统测速时，多系统组合测速误差方程可以写为：

$$v_i = \begin{bmatrix} -e_r^{s_i} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta r \\ c \cdot \Delta \delta t_r \end{bmatrix} - l_i \quad (7)$$

式中，下标 i 可以换成 G 、 C 、 E 、 R ，分别代表 GPS、BDS、Galileo、GLONASS 系统（为了方便后续结果分析，系统组合用相应的字母组合代替，如 GC 代表 GPS/BDS 组合， $GCER$ 代表 GPS/BDS/Galileo/GLONASS 组合），需要注意的是，定权过程中可以根据不同系统的观测值精度给予相应的权重。

1.2 误差分析

由式（2）和（4）可知，TDCP 测速误差主要来源于卫星位置误差、接收机位置误差、卫星钟差、对流层延迟误差、电离层延迟误差和载波相位观测值噪声。下面对这些误差项进行分析。

1) 卫星位置误差和接收机位置误差

卫星位置误差和接收机位置误差主要是通过接收机到卫星的单位方向矢量 e 来影响测速精度^[18]。卫星位置误差为 10 m 时，对测速的影响不超过 1.6 mm/s，目前广播星历的轨道误差在 1 m 左右^[19]，因此卫星位置误差对测速影响小于 1 mm/s。同样，研究表明只要接收机位置误差不超过 10 m，由此产生的测速误差在 mm/s 量级^[20]，而 10 m 的接收机位置精度通过伪距单点定位很容易达到。

2) 电离层和对流层延迟误差

电离层和对流层延迟与区域大气条件和卫星高度角有关，一般情况下大气状态变化非常缓慢，在采样频率为 1 Hz 或者更高的情况下，相邻历元间的电离层和对流层延迟具有很强的相关性，大部分大气延迟都能够通过历元间差分消去，残余误差可以当作噪声处理^[21]。

3) 卫星钟差

广播星历中卫星钟差大约为 5 ns，前后历元钟差变化量 $\Delta \delta t^s$ 量级为 0.001 ns/s^[12]，对测速的影响为 0.3 mm/s。

4) 载波相位观测值噪声

载波相位观测值精度一般在 2~3 mm 左右，当数据采样间隔为 1 s 时，对测速的影响为 1-2 mm/s^[15]。在发生周跳的情况下，载波相位差分将不能反应真实测速情况，需要对周跳进行探测和修复，本文数据处理过程中采用文献[22]所述的周跳处理策略。

通过上述分析以及后续实验测速结果可知，TDCP 测速精度最终能达到 mm/s 量级。

2 测速实验及结果分析

2.1 数据获取和数据处理策略

从 IGS 官网下载全球范围内均匀分布的 8 个测站（HARB、NNOR、DJIG、PPTG、KIRU、YEL2、KITG 和 MGUE）1 Hz 高频数据，测站分布如图 1 所示。除 KIRU、MGUE 和 YEL2 测站接收不到 BDS-2 系统的 B2I 信号，这些测站都能接收到 GPS L1/L2/L5、GLONASS G1/G2、Galileo E1/E5/E5a/E5b/E6、BDS-2 B1I/B2I/B3I、BDS-3 B1I/B1C/B2a/B3I 频点的信号，下文将对 GNSS 上述频点的测速精度进行详细的对比分析。

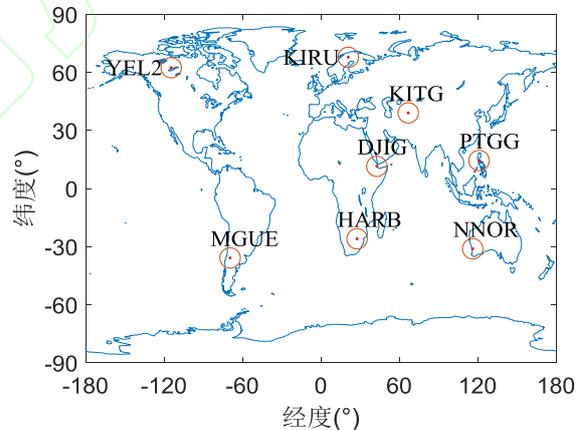


图 1 测站分布图

Fig. 1 Distribution of selected stations

本文在进行载波相位差分测速的数据处理过程中，对流层延迟采用 Saastamoinen 模型进行改正，相对论和 TGD 延迟利用广播星历进行改正，单频数据电离层延迟采用 Klobuchar 模型进行改正，双频数据采用无电离层组合去除电离层延迟，截止高度角设置为 10°。观测值权 p 采用卫星高度角定权，如式（8）所示，其中 e 表示卫星高度角。

$$p = \begin{cases} 1, & e \geq 30^\circ \\ (2 \sin e)^2, & 10^\circ \leq e \leq 30^\circ \end{cases} \quad (8)$$

将静态数据模拟动态进行解算，因此测站的速度真值 $V_{\text{真}}$ 视为 0 mm/s。通过计算测站站心坐标系下速度 $V_{\text{计算值}}$ 的 E、N、U 三个方向 RMS 值评估测速精度，计算公式如下：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (V_{\text{计算值}} - V_{\text{真}})^2} \quad (9)$$

式中， N 为观测历元个数； V 表示速度。需要注意的是，将速度大于 2 cm/s 的历元视为粗差剔除（剔除率小于千分之一），不参与测速 RMS 值的计算。

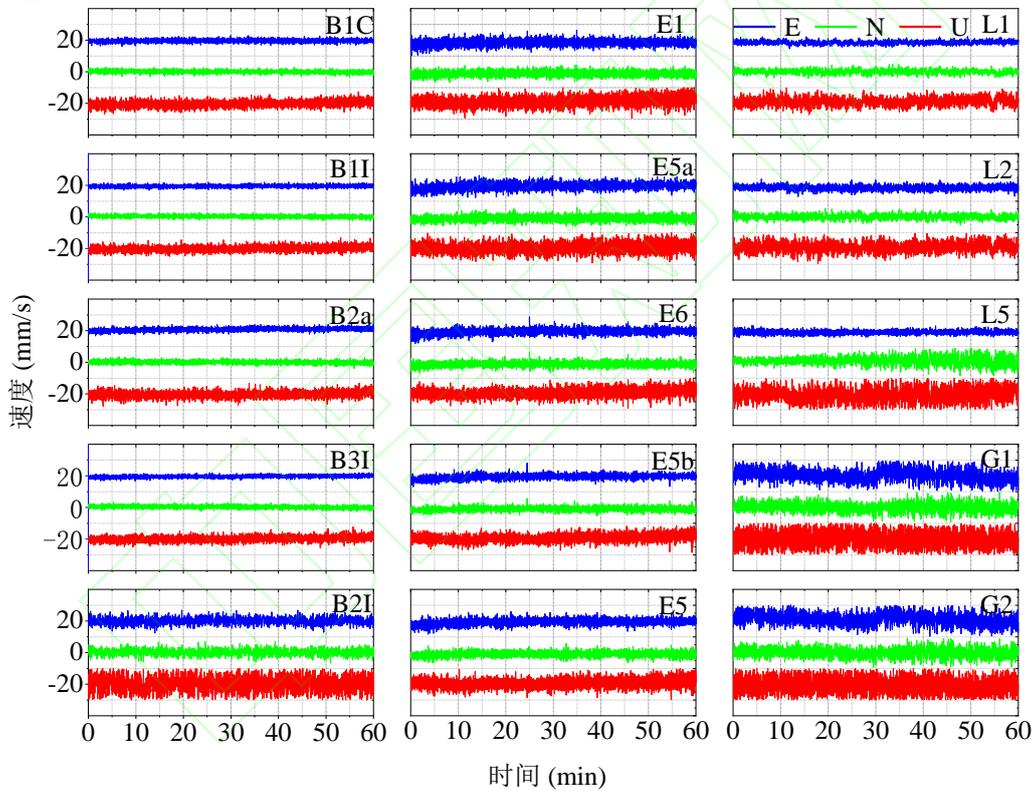


图 2 TDCP 各频点测速结果

Fig. 2 TDCP velocity estimation at different frequency

从图 2 中可以看出，所有频点的测速时间序列都在 0 mm/s 上下波动，且相比于 E 和 N 方向，U 方向的波动更加明显。BDS 系统 B2I 频点速度波动比 BDS 其他频点大，Galileo 的 5 个频点测速精度相差不大，GPS 系统 L5 频点的测速波动比另外两个频点稍大，GLONASS 两个频点测速精度比其他 GNSS 系统波动幅度大。

2.2 GNSS 多频测速精度

本次实验采用 HARB 测站 2020 年 4 月 9 日的的数据，数据时长为 24 h，采样率为 1 Hz。为了对比基于 TDCP 方法的 GNSS 系统各频点的测速精度，采用 2.1 节中的数据处理策略，对 HARB 测站可接收到的所有频点数据进行处理，得到了 E、N、U 方向的速度时间序列。为了显示方便，图 2 仅给出了 8 点到 9 点时间段速度时间序列，其中将 E 方向测速序列向上平移 20 mm/s，N 方向测速序列向下平移 20 mm/s。需要说明的是，下文中的 BDS 测速结果指的是 BDS-2+BDS-3 的结果。

对 HARB 测站 24 小时 GNSS 测速结果进行统计，各频点平均 PDOP (Position Dilution of Precision) 值以及 E、N、U 三个分量的测速 RMS 见表 1 所示。

从表 1 可以发现相同系统有些频点的 PDOP 值有所不同，这是由于 BDS-2 和 BDS-3 卫星都发射 B1I 和 B3I 信号，而 B1C 和 B2a 信号只由 BDS-3 卫星提供，B2I 信号只由

BDS-2 卫星提供, 且 HARB 测站在南非, 观测到的 BDS-3 卫星比 BDS-2 卫星多, 所以 B1I 和 B3I 频点 PDOP 值最好, B1C 和 B2a 频点其次, B2I 频点最差。所有 GPS 卫星都提供 L1 和 L2 信号, 而只有 Block II-F 和 Block III-A 卫星新增了 L5 信号, 导致 L1 和 L2 频点 PDOP 值比 L5 频点好。对于 Galileo, 所有卫星均发射 E1、E5a、E6、E5b、E5 信号, 各频点 PDOP 值相同。对于 GLONASS, 虽然所有卫星均能提供 G1 和 G2 信号, 但是由于 HARB 测站接收机在接收信号时缺失部分卫星 (R06、R10、R24) 的 G2 观测值数据, 导致 G2 频点的 PDOP 值比 G1 频点大。

从表 1 可知, 基于 TDCP 方法的 GNSS 测速精度在水平和高程方向均可达到 mm/s 量级。除 B2I 频点, BDS 系统测速精度在水平方向优于 2 mm/s, 高程方向优于 3.5 mm/s; GPS 系统 L1 和 L2 频点测速精度较高, 水平方向优于 2 mm/s, 高程优于 3.5 mm/s, 而 L5 频点水平和高程方向 RMS 值分别为 2.2 mm/s 和 4.3 mm/s; GLONASS 系统测速精度最差, 水平方向精度在 3~4 mm/s, 高程方向在 5 mm/s 左右; Galileo 系统 5 个频点的测速精度相近, 水平方向优于 2 mm/s, 高程优于 3.5 mm/s。

表 1 HARB 测站多频多 GNSS 测速精度

Tab.1 Accuracy of multi-frequency and multi-GNSS velocity estimation at HARB station

导航系统	频点	频率 (MHz)	PDOP	RMS (mm/s)		
				E	N	U
BDS	B1C	1575.42	3.5	1.4	1.6	3.3
	B1I	1561.098	2.4	1.0	1.1	2.5
	B2a	1176.45	3.4	1.9	2.0	3.4
	B3I	1268.52	2.4	1.1	1.1	2.5
	B2I	1207.14	4.0	2.4	2.5	4.1
GPS	L1	1575.42	2.3	1.2	1.3	3.0
	L2	1227.60	2.3	1.4	1.6	3.5
	L5	1176.45	4.0	2.2	2.2	4.3
GLONASS	G1	$1602+k \times 9/16$ $K=-7 \dots +12$	3.0	3.1	2.6	5.1
	G2	$1246+k \times 7/16$ $K=-7 \dots +12$	3.3	3.5	3.0	5.2
Galileo	E1	1575.42	3.4	1.8	1.5	3.5
	E5a	1176.45	3.4	1.8	1.8	3.5
	E6	1278.75	3.4	1.6	1.4	3.3
	E5b	1207.14	3.4	2.0	2.0	3.5
	E5	1191.795	3.4	1.5	1.6	3.1

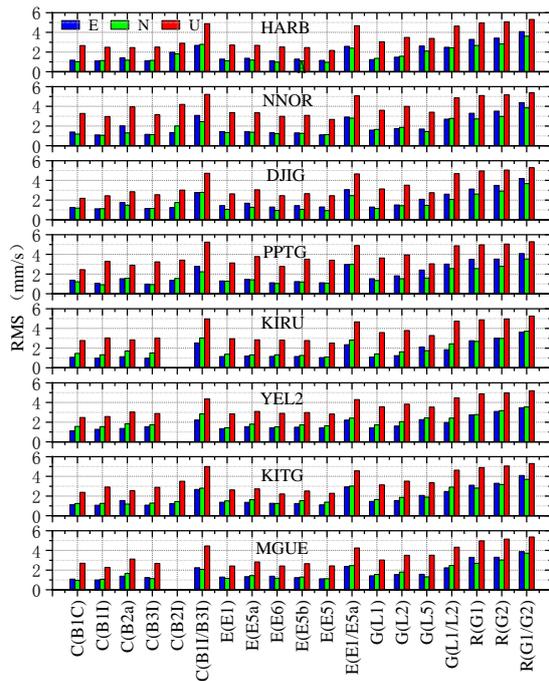


图 3 GNSS 各系统单频和双频无电离层组合测速结果

Fig. 3 Velocity RMS of GNSS single-frequency and dual-frequency ionospheric combined

为了排除 PDOP 的影响，对于 PDOP 值小于 3 的频点，通过控制卫星数的方式（卫星数控制到 8~10 颗左右），使尽可能多历元的 PDOP 值在 2~3 之间，并将这些历元筛选出来；对于 PDOP 值大于 3 的频点，直接筛选出 PDOP 值在 2~3 之间的历元，从而将所有频点 PDOP 平均值控制到 2.5 左右，以进一步评估多频多 GNSS 的测速精度。利用图 1 中 8 个测站 2020 年 4 月 9 日的 24 小时数据得到了测速结果，如图 3 所示。另外为了对比单频和双频无电离层组合测速精度，BDS 系统的 B1I、B3I 组合，GPS 系统的 L1、L2 组合，GLONASS 系统的 G1、G2 组合，Galileo 系统的 E1、E5a 组合测速精度也在图 3 中展示。

从图 3 可以看出，8 个测站相同频点相同方向的测速精度相差不大，并且水平方向优于高程方向。在 PDOP 值相近的情况下，不同系统不同频点的测速精度主要由测量噪声主导。其中，BDS 系统 B1I、B1C、B3I、B2a 频点和 Galileo 的 E1、E5a、E6、E5b、E5 频点的测速精度相当，水平方向优于 1.5 mm/s，高程方向优于 3 mm/s。BDS 系统 B2I

和 GPS 的 L1、L2、L5 频点的测速精度相当，水平方向在 1.5~2 mm/s，高程在 3~4 mm/s。GLONASS 的 G1、G2 测速精度最差，水平方向在 3~4 mm/s，高程在 5~5.5 mm/s。采用双频无电离层组合测速时，由于组合观测值噪声的增大，导致各 GNSS 系统精度都要比单频测速精度低，其中 BDS 和 Galileo 的双频无电离层组合测速 RMS 比单频水平方向大 1.4 mm/s，高程方向大 2 mm/s；GPS 无电离层组合测速水平和高程方向 RMS 比单频分别大 0.9 mm/s 和 1.3 mm/s；GLONASS 无电离层组合测速 RMS 比单频水平方向大 0.8 mm/s，高程方向大 0.4 mm/s。

2.3 多 GNSS 系统测速精度

选取了 2020 年 4 月 9 日 HARB 测站 1 Hz 的高频观测数据，采用 TDCP 方法对不同 GNSS 系统及其组合进行了测速精度评估实验，结果如图 4 所示。实验方案包括单系统 GPS、BDS、Galileo、GLONASS，双系统组合 GPS/BDS、GPS/Galileo、GPS/GLONASS，三系统组合 GPS/BDS/Galileo、GPS/BDS/GLONASS 和四系统组合 GPS/BDS/Galileo/GLONASS。其中，GPS 采用 L1 频点，BDS 采用 B1I 频点，Galileo 采用 E1 频点，GLONASS 采用 G1 频点。由于 GLONASS 的测速精度比其他系统低，组合测速过程中 GPS: BDS: Galileo: GLONASS 的权设为 1: 1: 1: 0.5。

从图 4 中可以看出，单 GPS 系统测速时平均可见卫星数为 8 颗，平均 PDOP 值在 2.3 左右；双系统组合后，平均可见卫星数增加到 16 颗，平均 PDOP 值在 1.5 左右；四系统融合后，平均可见卫星数增加到 31 颗，平均 PDOP 值小于 1.2。因此多系统组合可以显著增加可见卫星数，降低 PDOP 值，有利于提高测速精度。相比单 GPS 系统，GPS/Galileo 组合和 GPS/BDS 组合的测速精度在水平和高程方向分别提高 24% 和 33%，而 GPS/GLONASS 组合提高不是很明显，可能由于 GPS 测速精度本来就很高，联合精度不是很高的 GLONASS 已无法显著提高测速精度，如果定权不当反而有可能降低组合测速精度，后续还将进一步研究各系统定权方法。三系统和四系统组合能进一步提高测速精度，

相比单 GPS 测速，四系统组合测速精度在水平和高程方向分别提高 40% 和 46%。

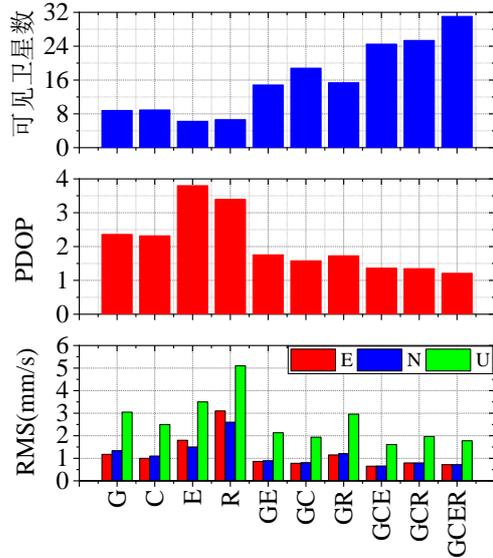


图 4 单系统和多系统测速结果

Fig. 4 Comparisons of RMS, PDOP and visible satellites in single- and multi-system solutions

某些约束条件下，例如城市、峡谷、露天矿井等遮挡环境（这种情况在 GNSS 用户中非常普遍），由于卫星信号受到遮挡，单 GPS 测速的可用性和精度急剧下降。为了更

好地评估多 GNSS 系统组合测速在遮挡环境下的优势，图 5 给出了 2020 年 4 月 9 日 HARB 测站在 10°、20°、30° 和 40° 的截止高度角情况下，GPS 和 GPS/BDS/Galileo/GLONASS 组合 24 小时的可见卫星数、PDOP 值以及 E、N、U 方向速度变化时间序列。在处理粗差过程中，当截止高度角为 10° 时，剔除速度大于 2 cm/s 的粗差历元；当截止高度角为 20°、30°、40° 时，不以 2 cm/s 作为判断粗差标准，而是直接剔除截止高度角为 10° 时的相同粗差历元。

此外，还统计了不同截止高度角情况下，单 GPS 和 GPS/BDS/Galileo/GLONASS 组合测速的可用率，如表 2 所示。可用率计算公式如下：

$$P_{\text{可用率}} = \frac{N_{\text{达标}}}{N_{\text{总}}} \quad (10)$$

式中， P 为可用率； $N_{\text{达标}}$ 代表达标的历元个数，水平方向速度不超过 1 cm/s，高程方向不超过 2 cm/s 视为达标； $N_{\text{总}}$ 代表总历元个数。

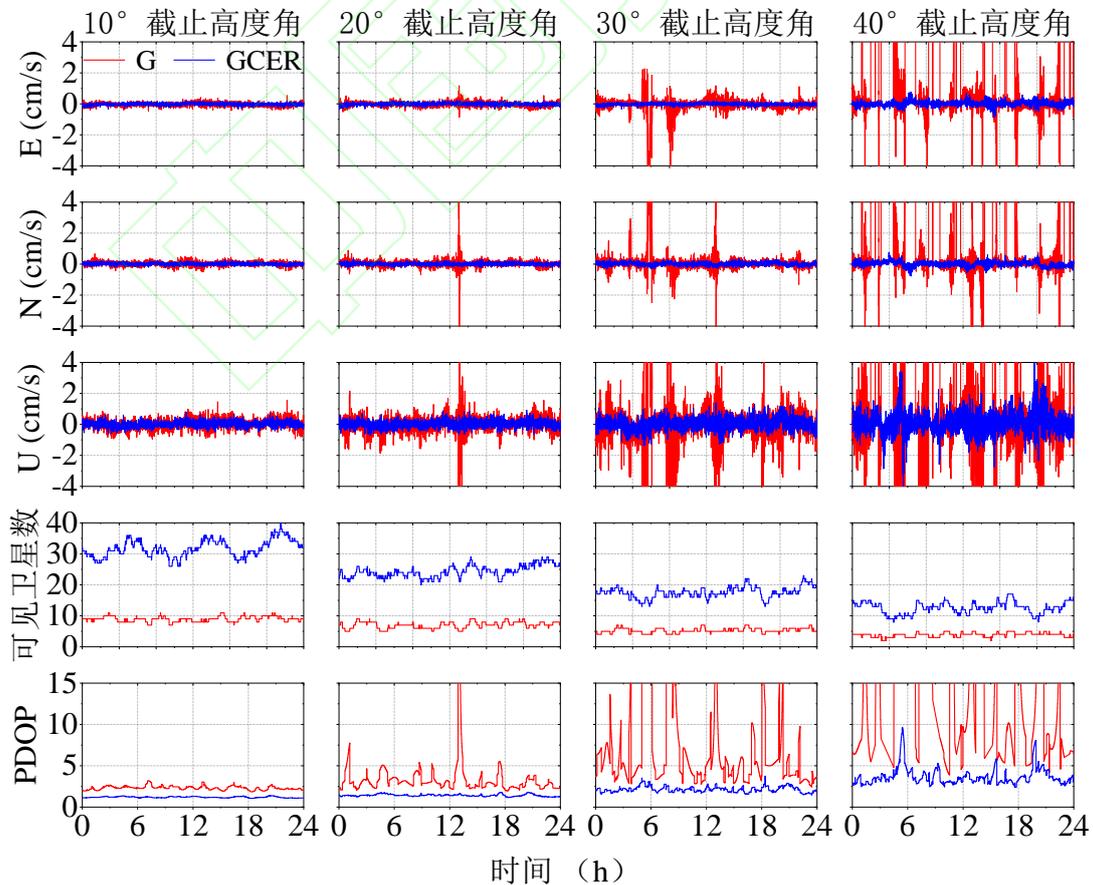


图 5 不同截止高度角情况下 GPS 和四系统组合测速对比

Fig.5 Comparisons of velocity estimation in single- and multi-system modes under different elevation cutoffs

表 2 不同截止高度角情况下 GPS 和四系统组合测速可用率

Tab.2 The availability rates for the single- and multi-GNSS under different elevation cutoffs

截止高度角 (°)	G (%)	GCER (%)
10	100.0	100.0
20	98.7	100.0
30	88.6	100.0
40	48.5	98.1

从图 5 和表 2 可以看出,截止高度角从 10°增加到 40°时,单 GPS 系统可见卫星数从 10 颗降低到 4 颗,甚至以下;PDOP 值从 2-3 增大到 10 以上,GPS 测速精度和可用性受到了极大影响,可用率从 100%下降到 48.5%;而四系统组合可见卫星数由 30 颗以上降低到 10 颗左右,PDOP 值从 1.5 增加到 3-6 之间,即使在 40°截止高度角情况下测速可用率仍保持在 98.1%。

因此,多 GNSS 组合显著增加了可见卫星数,优化了卫星空间几何结构,从而提高了测速精度。相比于单系统,多 GNSS 组合可以设置更高的截止高度角,显著增强在受限环境中 GNSS 测速的可用性。

3 结论与展望

本文基于 TDCP 方法,利用多频多 GNSS 实测数据,对比分析了 GPS、BDS、GLONASS、Galileo 系统各频点以及双频无电离层组合的测速精度。结果表明:1)不同频点的测速精度有所差异,BDS 的 B1I、B1C、B3I、B2a 频点和 Galileo 的 E1、E5a、E6、E5b、E5 频点上的测速精度相当,水平方向优于 1.5 mm/s,高程方向优于 3 mm/s。BDS 的 B2I 和 GPS 的 L1、L2、L5 频点的测速精度相当,水平方向在 1.5~2 mm/s,高程方向在 3~4 mm/s。GLONASS 的 G1、G2 频点测速精度最差,水平方向在 3~4 mm/s,高程方向在 5~5.5 mm/s。2)双频无电离层组合由于放大了观测值噪声,测速精度比单频测速低。

研究了 GNSS 单系统、双系统、多系统组合的测速精度,并分析了截止高度角从 10°

到 40°条件下 GPS 和四系统组合测速精度和可用性。结果表明:1)相比单 GPS 系统,双系统组合水平和高程方向测速精度分别提高 24%和 33%;多 GNSS 系统组合能够进一步提高测速精度,水平和高程方向分别提高 40%和 46%。2)截止高度角越大,可见卫星数越少,PDOP 越大,单 GPS 测速的可用性会急剧下降。相比单 GPS 系统,在 40°截止高度角时,多 GNSS 组合在水平方向优于 1 cm/s、高程方向优于 2 cm/s 下的测速可用率由 48%提高到 98%。

后续将进一步探究多系统组合测速中的定权问题,并且对动态数据进行测试。此外,还将开展基于 TDCP 的 GNSS 测速方法在实时地震监测等方面的应用研究。

参考文献

- [1] SUN Wei, DUAN Sunli, DING Wei, et al. Comparative Analysis on Velocity Determination by GPS Single Point[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2017,5(1):81-85+99(孙伟,段顺利,丁伟,孔莹.GPS 单点测速方法的比较分析[J].导航定位学报,2017,5(1):81-85+99.)
- [2] WU Fumei, XIAO Yun. Velocity Determination Based on GPS Derived Pseudorange[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010,35(9):1034-1038(吴富梅,肖云.利用伪距差分法进行 GPS 测速[J].武汉大学学报(信息科学版),2010,35(9):1034-1038.)
- [3] SONG Xueyuan, LI Jianwen, LI Junzheng, et al. The Influence of Ephemeris and Clock Error to GPS Kinematics Precise Point Positioning[J]. *GNSS World of China*, 2011,36(2):52-56 (宋雪源,李建文,李军正,李俊毅,蒋谢彬.不同星历和钟差产品对 GPS 动态 PPP 定位测速结果比较[J].全球定位系统,2011,36(2):52-56.)
- [4] Xie X, Geng T, Zhao Q, et al. Performance of BDS-3: Measurement Quality Analysis, Precise Orbit and Clock Determination[J]. *Sensors* (Basel, Switzerland),2017,17(6).
- [5] LI Xin, GUO Jiming, ZHANG Di, et al. An Algorithm of GPS Single-Epoch Kinematic Positioning Based on Doppler Velocimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018,43(7): 1036-1041.(李昕,郭际明,章迪,杨飞.基于多普勒测速的 GPS 单历元动态定位算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(7):1036-1041.)
- [6] Freda P, Angrisano A, Gaglione S, et al. Time-differenced Carrier Phases Technique for Precise GNSS Velocity Estimation[J]. *Gps Solutions*,2015, 19(2):335-341.
- [7] Hohensinn R, Geiger A, Willi D, et al. Movement Detection Based on High-Precision Estimates of

Instantaneous GNSS Station Velocity[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2019,145(3): 04019005.1-04019005.14.

[8] ZHANG Xiaohong, GUO Bofeng. Real-time Tracking the Instantaneous Movement of Crust During Earthquake With a Stand Alone GPS Receiver[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013,56(6):1928-1936 (张小红,郭博峰.单站 GPS 测速在实时地震监测中的应用[J].地球物理学报, 2013,56(6):1928-1936.)

[9] PAN Dongyi, CHU Xixing, ZHANG Yize. Earthquake Monitoring Based on The Stand-alone GPS Velocity[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2018,46(4):61-64 (潘东毅,褚锡星,张益泽.利用单站 GPS 测速信息进行地震监测[J].工程勘察,2018,46(4):61-64.)

[10] Flack C, Ramatschi M, Subarya C, et al. Near Real-time GPS Applications for Tsunami Early Warning Systems[J]. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2010,10(2): 181-189.

[11] IGS staff. GNSS constellations [DB/OL]. <http://mgex.igs.org/index.php#Constellations>,2020-03-20/2020-05-08

[12] YI Qinggen, LIN Guoli, XI Yi, et al. High Frequency Speed Measurement Based on BDS Carrier Phase Difference[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019,44(12):116-120 (易清根,林国利,席毅,刘晓飞.北斗载波相位差分的高频测速[J].测绘科学,2019,44(12):116-120.)

[13] WANG Fuhong, ZHANG Xiaohong, HUANG Jinsong. Error Analysis and Accuracy Assessment of GPS Absolute Velocity Determination with SA off[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(6):515-519(王甫红,张小红,黄劲松.GPS 单点测速的误差分析及精度评价[J].武汉大学学报(信息科学版),2007, 32(6):515-519.)

[14] LIU Zhaoying, CHEN Guo, ZHAO Qile, HU Zhigang, QU Lizhong. Principle and Precision Analysis of BDS Absolute Velocity Determination[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014,34(6):114-118(刘朝英,陈国,赵齐乐,胡志刚,屈利忠.BDS 单点测速原理及精度分析[J].大地测量与地球动力学, 2014, 34(6):114-118.)

[15] LIU Zhanke, LI Jiancheng, ZHANG Xiaohong, et al. Method and Analysis of Acceleration Determination Using Stand-Alone GPS Receiver for Airborne Scalar Gravimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 661-667 (刘站科,李

建成,张小红,等.单站 GPS 确定航空重力测量载体运动加速度的方法与结果分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2019,44(5):661-667)

[16] Geng T, Xie X, Fang R, et al. Real-time Capture of Seismic Waves Using High-rate Multi-GNSS Observations: Application to the 2015 Mw 7.8 Nepal earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 43(1):161-167.

[17] WANG Xiaodong, WANG Zhenjie, JI Shengyue, et al. Single Station Velocity Estimation: GPS vs BDS[J]. *Journal of Navigation and Positioning*,2015, 3(3):39-42+55(汪晓龙,王振杰,姬生月,陈武.单站 BDS 与 GPS 实时测速方法研究[J].导航定位学报,2015,3(3):39-42+55.)

[18] Fuhong W, Xiaohong Z, Jingsong H. Error Analysis and Accuracy Assessment of GPS Absolute Velocity Determination without SA[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2008, 11(2):133-138.

[19] GENG Tao, SU Xing, XU Xiaolong, et al. Research on Precise and Broadcast Ephemeris Orbit of BeiDou Navigation Satellite System[J]. *Chinese Science Paper*, 2015,10(9):1023-1026+1032 (耿涛,苏醒,许小龙,徐夏炎.北斗卫星导航系统精密定轨和广播星历轨道精度分析[J].中国科技论文,2015,10(9):1023-1026+1032.)

[20] Serrano, L., D. Kim, R. Langley, K. Itani, and M. Ueno. 2004. "A GPS Velocity Sensor: How Accurate Can It Be? - A First Look." In Proc., 2004 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 875-885. Manassas, VA: Institute of Navigation.

[21] Li M, Li W, Fang R, et al. Real-time High-precision Earthquake Monitoring Using Single-frequency GPS Receivers[J]. *Gps Solutions*, 2014, 19(1):27-35.

[22] ZOU Xuan, LI Zongnan, CHEN Liang, et al. A New Cycle Slip Detection and Repair Method Based on Epoch Difference for a Single-frequency GNSS Receiver[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017,42(10):1406-1410.(邹璇,李宗楠,陈亮,宋伟伟,王成,唐卫明.一种历元间差分单站单频周跳探测与修复方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(10):1406-1410.)

Accuracy Assessment of Multi-frequency and Multi-GNSS Velocity Estimation With Time Differenced Carrier Phase Method

GENG Tao¹ DING Zhihui¹ XIE Xin¹ LÜ Yifei¹

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Based on the method of time differenced carrier phase, the mathematical model of multi-GNSS velocity estimation is introduced and the error sources are analyzed. Using the real data, the accuracy and performance of velocity determination at each GNSS frequency point and multi-GNSS are tested and analyzed. The results show that the accuracy of velocity determination at different frequency is different, the velocity estimation at B1I, B1C, B3I, B2a frequency points in BDS and E1, E5a, E6, E5b, E5 frequency points in Galileo have the same precision, with the horizontal direction better than 1.5 mm/s and the vertical direction better than 3 mm/s; the velocity estimation

accuracy at B2I frequency in BDS is the same as that at L1, L2 and L5 frequency points in GPS with the horizontal accuracy of 1.5-2 mm/s and the vertical accuracy of 3-4 mm/s; the velocity estimation accuracy at G1 and G2 frequency in GLONASS is the worst, with 3-4 mm/s in horizontal direction and 5-5.5 mm/s in vertical direction. The accuracy of double frequency ionospheric free combination is lower than that of single frequency due to the amplification of the observation noise. In addition, the combination of multiple GNSS increases the number of visible satellites, reduces the PDOP value, and can significantly improve the velocity measurement accuracy. Compared with the single GPS system, the accuracy of GPS/BDS/GLONASS/Galileo velocity estimation is improved by 40% in horizontal direction and 46% in vertical direction. At 40 °elevation cut-off, the availability rate is improved from 48% to 98% under the condition of the horizontal velocity better than 1 cm/s and the vertical direction better than 2 cm/s.

Key words: GNSS; velocity estimation; TDCP; multi-frequency

First Author: GENG Tao, PhD, professor, mainly specializes in precise GNSS orbit determination and positioning.

E-mail: gt_gengtao@whu.edu.cn.

Corresponding Author: XIE Xin, PhD. E-mail: xiexin@whu.edu.cn

Foundation Support: The National Natural Science Foundation of China (No. 41674004, 41974036) and Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2019CFA051).

网络首发：

标题：基于载波相位差分的多频多 GNSS 测速精度评估

作者：耿涛, 丁志辉, 谢新, 吕逸飞

DOI:10.13203/j.whugis20200226

引用格式:

耿涛, 丁志辉, 谢新, 等. 基于载波相位差分的多频多 GNSS 测速精度评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版,

DOI:10.13203/j.whugis20200226 (GENG Tao, DING Zhihui, XIE Xin, et al. Accuracy Assessment of Multi-frequency and Multi-GNSS Velocity Estimation With Time Differenced Carrier Phase Method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, DOI:10.13203/j.whugis20200226)

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：

单频载波相位移动开窗平滑伪距算法及精度分析

陈正生, 张清华, 崔阳, 李雪瑞, 邝英才

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(7): 964-973

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180324>

GNSS 全球广播电离层模型精度分析

朱永兴, 谭述森, 任夏, 贾小林

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(5): 768-775

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180439>

一种新的利用历元间位置变化量约束的 GNSS 导航算法

郭磊, 王甫红, 桑吉章, 张万威

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 21-27

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190062>