

引文格式: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),2023,48(2):206-213.DOI:10.13203/j.whugis20200226



Citation: 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, 2023, 48(2):206-213.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,建立了全球卫星导航系统(global navigation satellite system, 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(BeiDou navigation satellite system)的B1I、B1C、B3I、B2a频点和Galileo(Galileo positioning system)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(global navigation satellite system)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(position dilution of precision)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: 全球卫星导航系统(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

收稿日期:2020-07-23

DOI:10.13203/j.whugis20200226

文章编号:1671-8860(2023)02-0206-08

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: Objectives: Using the real GNSS (global navigation satellite system) observation data, the accuracy and performance of velocity determination at each GNSS frequency point and multi-GNSS are tested and evaluated. Methods: 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. Results: The results show that the accuracy of velocity determination at different frequency is different, the velocity estimation at B1I, B1C, B3I frequency points in BDS (BeiDou navigation satellite system) 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 (position dilution of precision) value, and can significantly im-

基金项目: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_gengtao@whu.edu.cn

通讯作者:谢新,博士。xiexin@whu.edu.cn

prove the velocity measurement accuracy. **Conclusions:** 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 cutoff, 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: global navigation satellite system (GNSS); velocity estimation; time-differenced carrier phase (TDCP); multi-frequency

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,标准定位服务精度为米级,测速精度仅在dm/s^[3];精密单点定位精度可以到厘米量级,测速精度可达mm/s量级,但精密单点定位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(global positioning system)、BDS(BeiDou navigation satellite system)、Galileo(Galileo positioning system)、GLONASS(global navigation satellite system)等系统。截至2020-05, 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,2018—2020年均经历了全球组网卫星的密集发射阶段,且都可播发4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,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,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

载波相位观测方程为:

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

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:

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

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:

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

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 V :

$$V = \Delta \mathbf{r} / (t_j - t_{j-1}) \quad (6)$$

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:

$$v_i = [-\mathbf{e}_r^{s_i} \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{r} \\ c \cdot \Delta \delta t_r \end{bmatrix} - l_i \quad (7)$$

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)和式(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。

1) 卫星位置误差和接收机位置误差。该误

差主要是通过接收机到卫星的单位方向矢量 \mathbf{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, 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, 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。

3) 卫星钟差。广播星历中卫星钟差大约为 5 ns, 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映真实测速情况, 需要对周跳进行探测和修复。

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、PTGG、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/E6、BDS-2 B1I/B2I/B3I、BDS-3 B1I/B1C/B2a/B3I 频点的信号。

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, 相对论和卫星群延时间(timing group delay, TGD)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, 表示如下:

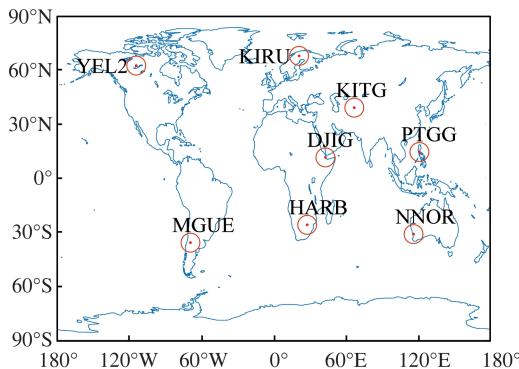


图 1 测站分布图

Fig.1 Distribution of Selected Stations

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

式中, e 表示卫星高度角。

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 方向均方根误差 (root mean square error, RMSE) 评估测速精度,

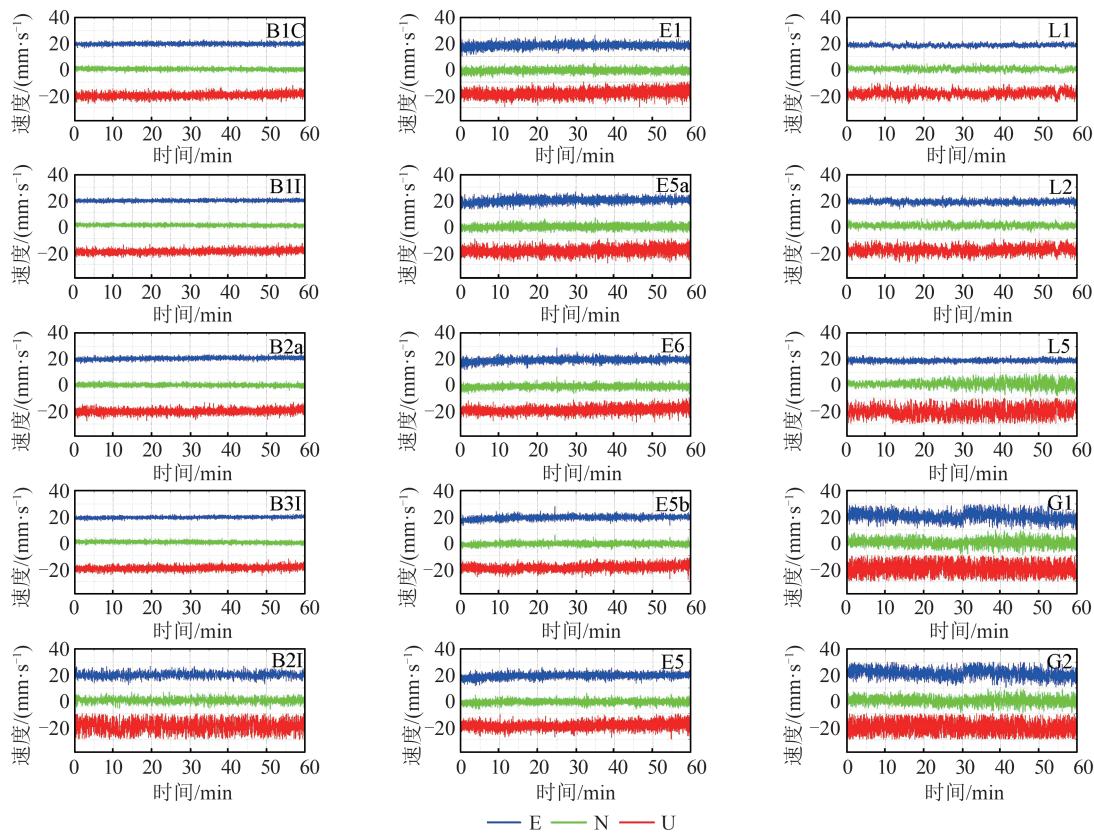


图 2 TDCP 各频点测速结果

Fig.2 TDCP Velocity Estimation at Different Frequencies

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

计算公式如下:

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

式中, N 为观测历元个数; V 表示速度。将速度大于 2 cm/s 的历元视为粗差剔除(剔除率<1%), 不参与测速 RMSE 值的计算。

2.2 GNSS 多频测速精度

本次实验采用 HARB 测站 2020-04-09 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 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 08:00~09:00 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。

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。

对 HARB 测站 24 h 的 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 分量的测速 RMSE 见表 1。

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RMSE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。

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,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2020-04-09的24 h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可知,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、

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	RMSE/(mm·s ⁻¹)		
				E	N	U
BDS	B1C	1 575.420	3.5	1.4	1.6	3.3
	B1I	1 561.098	2.4	1.0	1.1	2.5
	B2a	1 176.450	3.4	1.9	2.0	3.4
	B3I	1 268.520	2.4	1.1	1.1	2.5
	B2I	1 207.140	4.0	2.4	2.5	4.1
GPS	L1	1 575.420	2.3	1.2	1.3	3.0
	L2	1 227.600	2.3	1.4	1.6	3.5
	L5	1 176.450	4.0	2.2	2.2	4.3
GLO-NASS	G1	$1\ 602+k\times 9/16, k=-7+8+\dots+12$	3.0	3.1	2.6	5.1
	G2	$1\ 246+k\times 7/16, k=-7+8+\dots+12$	3.3	3.5	3.0	5.2
	E1	1 575.420	3.4	1.8	1.5	3.5
Galileo	E5a	1 176.450	3.4	1.8	1.8	3.5
	E6	1 278.750	3.4	1.6	1.4	3.3
	E5b	1 207.140	3.4	2.0	2.0	3.5
	E5	1 191.795	3.4	1.5	1.6	3.1

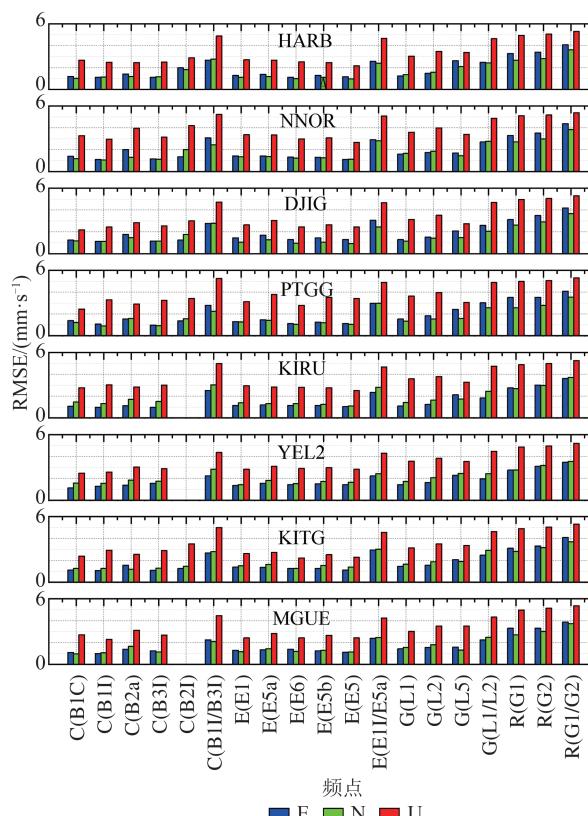


图3 北斗(C)、Galileo(E)、GPS(G)和GLONASS(R)各单频点及典型双频无电离层组合测速结果

Fig.3 Results of Velocity Estimation Using BDS/Galileo/GPS/GLONASS Single-Frequency and Dual-Frequency Ionospheric Combination Observations
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,高程方向在 3~4 mm/s。GLONASS 的 G1、G2 测速精度最差,水平方向在 3~4 mm/s,高程方向在 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 RMSE 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 RMSE 比单频分别大 0.9 mm/s 和 1.3 mm/s;GLONASS 无电离层组合测速 RMSE 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 2020-04-09 的 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, 3 系统组合 GPS/BDS/Galileo、GPS/BDS/GLONASS 和 4 系统组合 GPS/BDS/Galileo/GLONASS。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;4 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,是由于 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。3 系统和 4 系统组合能进一步提高测速精度,相比单 GPS 测速,4 系统组合测速精度在水平和高程方向分别提高 40% 和 46%。

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 2020-04-09 的 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 h 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。

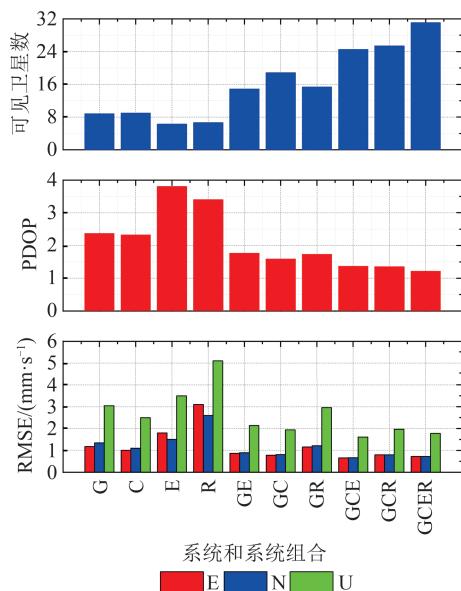


图 4 GPS(G)、北斗(C)、Galileo(E) 和 GLONASS(R) 单系统和多系统可见卫星数、PDOP 值以及测速精度对比

Fig.4 Comparison of Visible Satellite Number, PDOP Values, and Velocity Estimation Accuracy in GPS/BDS/Galileo/GLONASS Single- and Multi-GNSS System Solutions

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。

表 2 不同截止高度角的 GPS 和 4 系统组合测速可用率

Tab.2 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

可用率计算公式如下:

$$P = N_{\text{达标}} / N_{\text{总}} \quad (10)$$

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。

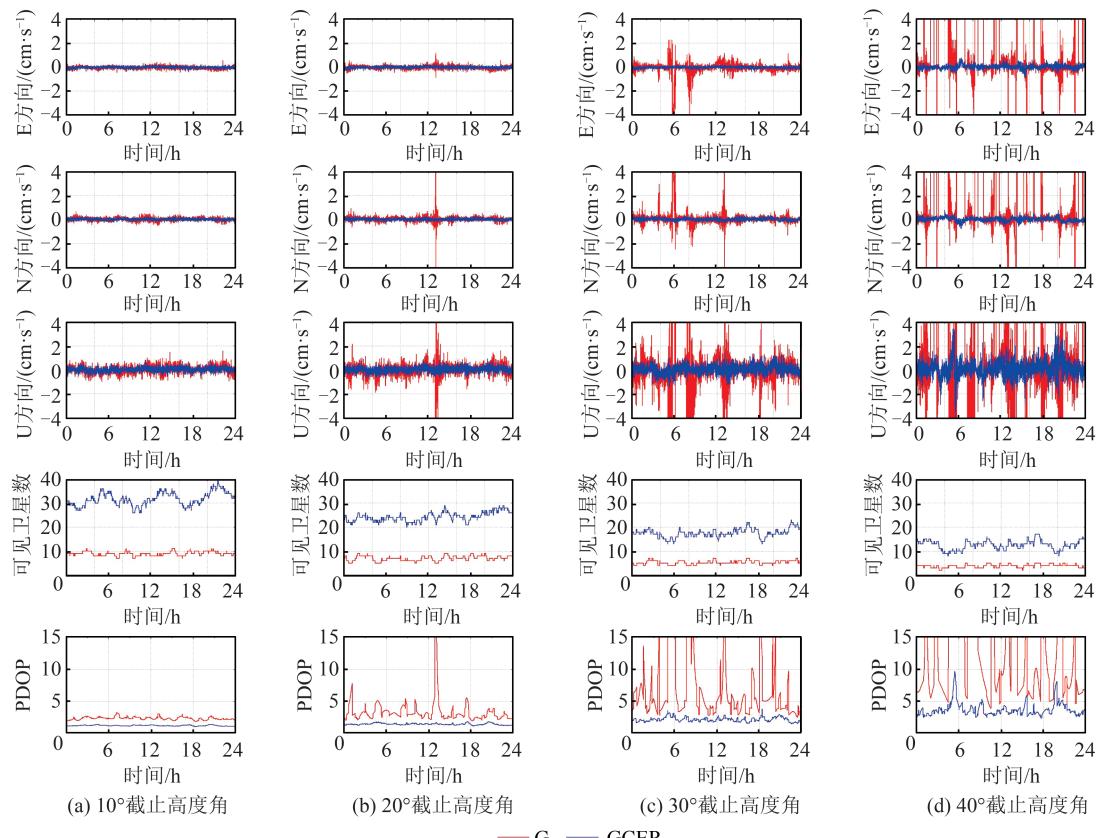


图5 不同截止高度角的GPS和4系统组合测速对比

Fig.5 Comparison of Velocity Estimation in Single- and Multi-system Modes Under Different Elevation Cutoffs

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4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,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 结语

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。

本文还研究了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° ~ 40° 条件下GPS和4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 Shunli, Ding Wei, et al. Comparative Analysis on Velocity Determination by GPS Single Point [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2017, 5(1): 81–85. (孙伟, 段顺利, 丁伟, 等. GPS 单点测速方法的比较分析[J]. 导航定位学报, 2017, 5(1): 81–85.)
- [2] Wu Fumei, Xiao Yun. Velocity Determination Based on GPS Derived Pseudoranges [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, 等. 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*, 2017, 17(6): E1233.
- [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, 等. 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.
- [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 & 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] Falck C, Ramatschi M, Subarya C, et al. Near Real-Time GPS Applications for Tsunami Early Warning Systems [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(2): 181–189.
- [11] IGS Staff. GNSS Constellations [DB/OL]. (2020-03-20)[2020-05-08]. <http://mgex.igs.org/index.php#Constellations>.
- [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, 等. 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, et al. 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, 等. 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] He Kaifei. GNSS Kinematic Position and Velocity Determination for Airborne Gravimetry [D]. Berlin, Germany: Technische Universität Berlin, 2014.
- [16] Geng T, Xie X, Fang R X, 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*, 2016, 43(1): 161–167.
- [17] Wang Xiaolong, Wang Zhenjie, Ji Shengyue, et al. Single Station Velocity Estimation: GPS vs BDS [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2015, 3(3): 39–42. (汪晓龙, 王振杰, 姬生月, 等. 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.)
- [18] Wang F H, Zhang X H, Huang J S. Error Analysis and Accuracy Assessment of GPS Absolute Velocity Determination without SA [J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2008, 11(2): 133–138.