

# 接收机钟跳对单站 GPS 测速的影响及改正方法

郑 凯<sup>1</sup> 郭博峰<sup>1,2</sup> 张小红<sup>1</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079  
2 中国地震局第一监测中心,天津,300180

**摘 要:**分析了各类钟跳与时标、载波相位观测值之间的关系,给出了顾及各类钟跳的导出多普勒值构造方法。试验结果表明,30 s 采样率的静态数据,钟跳对速度的影响可达 cm/s 级,而 1 s 采样率的静态数据,钟跳影响可达 dm/s 级;对于 5 s 采样率的动态车载数据,顾及钟跳影响的点位速度内符合精度为 0.5 cm/s,而不顾及钟跳的情况下,精度达到了 25 cm/s。  
**关键词:**GPS;接收机钟跳;导出多普勒值;单站;测速  
**中图法分类号:**P228 **文献标志码:**A

目前,利用 GPS 技术获取高精度运动载体速度的方法主要有位置微分法、历元间差分法<sup>[1]</sup>和利用多普勒观测值直接求解法等 3 种方法。位置微分法测速精度易受 GPS 定位误差的影响;历元间差分法求得的速度是历元中间时刻的平均速度;而多普勒观测值可认为该历元的瞬时相位变化率,求得的是瞬时速度,因此,在实际应用中普遍采用多普勒测速法<sup>[1-3]</sup>。随着美国 SA 政策的取消,GPS 卫星轨道和卫星钟差精度大幅提高,使得利用单台 GPS 接收机确定运动载体的速度成为可能<sup>[4]</sup>。

利用多普勒观测值求解运动载体的速度,关键在于多普勒观测值的获取。研究表明,原始多普勒观测值测量噪声比导出多普勒观测值的测量噪声大<sup>[5]</sup>。因此,为获得高精度的载体速度,通常选用导出多普勒观测值进行速度求解。由于接收机钟的不稳定性,随着测量时间的推移,钟差会产生漂移。为保持接收机时标与 GPS 系统时间同步,多数接收机都采用插入周期性的钟跳进行调整<sup>[6]</sup>。文献[7-8]分别采用相位修正法和多项式插值法修正相位观测值。对此类偏差,Zhang 等则认为是由采样时标标称值和实际时间不一致引起,故在构造多普勒值时对时标进行了修正(本文称之为时标修正法)<sup>[9]</sup>。

用于高精度测速的 GPS 接收机多为大地型接

收机,经常会有 ms 级钟跳。文献[10]将 ms 级钟跳分为 4 类。而这 4 类钟跳对构造导出多普勒观测值的影响还鲜有详细的研究,因此,本文首先分析相位修正法和时标修正法的精度,然后推导出能顾及各类钟跳的统一的导出多普勒值构造模型,最后通过算例验证了该统一模型的有效性和可靠性。

## 1 单站导出多普勒值测速度原理

若各项误差均可通过模型改正或可以忽略其对速度估计的影响,则多普勒观测方程可简化为:

$$\lambda \dot{\varphi}_m^j(t) = e_m^j \cdot [\dot{\mathbf{r}}^j(t - \tau_m^j) - \dot{\mathbf{r}}_m(t)] + c \cdot \delta \dot{t}_m(t) + \dot{\epsilon}_m^j \tag{1}$$

式中, $\dot{\mathbf{r}}^j$ 、 $\dot{\mathbf{r}}_m$  分别为  $j$  号卫星的速度向量和接收机的速度向量; $\delta \dot{t}_m$  为接收机的钟速; $c$  为光速; $e_m^j$  为站星间的方向余弦; $\dot{\epsilon}_m^j$  为测量噪声的变化率。

其中卫星位置、速度以及卫星钟差钟速可利用广播星历计算得到,接收机位置可通过标准单点定位解算得到,因此,待求量仅剩  $\dot{\mathbf{r}}_m(t)$  和  $\delta \dot{t}_m(t)$ 。一般采用一阶相位中心差分法<sup>[3]</sup>构造导出多普勒观测值:

$$\dot{\varphi}_T = \frac{\varphi_{T+\Delta T} - \varphi_{T-\Delta T}}{2 \times \Delta T} \tag{2}$$

式中, $\dot{\varphi}_T$  为  $T$  时刻的导出多普勒观测值; $\varphi_{T+\Delta T}$ 、

收稿日期:2016-06-13  
项目资助:中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH16053);国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20130141110001);国家测绘地理信息局公益性行业科研专项(201512002)。  
第一作者:郑凯,博士生,主要从事 GNSS 精密测速、测加速度及应用。zhengkai@whu.edu.cn  
通讯作者:张小红,博士,教授。xzhzhang@sgg.whu.edu.cn

$\varphi_{T-\Delta T}$  分别为  $T$  时刻后一历元和前一历元的载波相位观测值,  $\Delta T$  为 GPS 观测数据的采样间隔。

## 2 接收机钟跳对测速的影响

钟跳的发生会影响载波相位观测值和接收机时标的一致性<sup>[10]</sup>, 因此, 在利用导出多普勒观测值确定运动载体速度时, 必须顾及钟跳对导出多普勒观测值的影响。

### 2.1 接收机钟跳对伪距和相位观测值的影响

钟跳按数值量级可分为 ms 级和  $\mu$ s 级钟跳, 本文重点分析 4 类 ms 级钟跳对测速的影响, 如表 1 所示。

表 1 接收机钟跳分类  
Tab. 1 Four Types of Clock Jump

类型	时标	伪距观测值	相位观测值
1	阶跃	连续	连续
2	阶跃	阶跃	连续
3	连续	阶跃	连续
4	连续	阶跃	阶跃

图 1 给出了钟跳对采样时标的影响示意图, 类型 1~4 分别对应 4 类钟跳,  $t_i$ 、 $T_i$  为第  $i$  历元的接收机采样时标, 其中  $t_i$  表示非整秒采样时标 (发生时标阶跃),  $T_i$  表示整秒时刻。黄色部分表示采样时标与整秒时刻之差。绿色部分表示接收机钟差, 为更清晰地表述, 类型 1~2 中并未画出钟差。对于类型 3~4, 其红色部分表示钟差达到阈值, 而对于类型 2, 其红色部分表示采样时标调整为整秒时刻相应的偏差大小。Kim 指出接收机钟跳对载波相位观测值的影响可表示为<sup>[6]</sup>:

$$\varphi(t+\tau_R)\approx\varphi(t)+\dot{\varphi}(t)\times\tau_R+c\times\tau_R\quad(3)$$

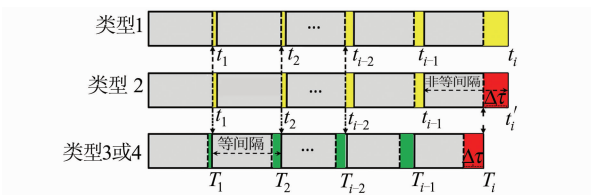


图 1 接收机钟跳对采样时标的影响

Fig. 1 Effect of Receiver Clock Jumps on Time-tag

式中, 对应于表 1 中第 4 类钟跳,  $\varphi$  是相位观测值 (换算成距离);  $\dot{\varphi}$  是相位变化率;  $\tau_R$  为钟跳值;  $c$  为真空中的光速。该过程可描述为: 由于石英钟的不稳定, 随着测量的进行, 通过伪距解得的钟差逐渐偏离 GPS 系统, 在  $T_i$  时刻所得钟差超过阈值, 此时对接收机内部时钟进行大小为  $\tau_R$  (ms) ( $\tau_R$  为整数) 的修正  $\bar{t}_i = T_i - \tau_R$ , 从而将接收机时钟与 GPS 系统时的偏差控制在限差内, 但不改变

采样时标  $T_i$ , 因此, 采样时标是等间隔的, 同时调整伪距和相位观测值:

$$\begin{cases} \rho(\bar{t}_i) = \rho(T_i) + c \times \tau_R \\ \varphi(\bar{t}_i) \approx \varphi(T_i) - \dot{\varphi}(T_i) \times \tau_R + c \times \tau_R \end{cases}\quad(4)$$

式中,  $\dot{\varphi}(t) \times \tau_R$  与卫星运行速度相关, 记为相异偏差;  $c \times \tau_R$  为所有相位都包含的公共偏差。即此时伪距和相位观测值对应的实际时刻是  $\bar{t}_i$ 。

第 3 类钟跳与第 4 类钟跳类似, 不同在于相位中并未加入  $c \times \tau_R$ , 即  $\varphi(\bar{t}_i) \approx \varphi(T_i) - \dot{\varphi}(T_i) \times \tau_R$ 。此时相位并非连续, 其包含了相异偏差  $\dot{\varphi}(T_i) \times \tau_R$ 。

第 1 类钟跳是在接收机钟差的限差内通过持续调整接收机时标来实现, 实质相当于改变了数据的采样频率。因此, 伪距、载波相位观测值和采样时标  $t_i$  是对应的。

第 2 类钟跳一般发生在整点时刻 (例如 01:00:00、02:00:00、…), 接收机通过插入第一类钟跳之前累计的时标阶跃与伪距阶跃来实现, 而未对载波相位调整:

$$\begin{cases} t_i = t'_i - \tau_R \\ \rho(t'_i) = \rho(t'_i) - c \times \tau_R \end{cases}\quad(5)$$

因此, 载波相位观测值对应的观测时刻是  $t'_i$ , 且对包含第一类和第二类钟跳的数据而言, 其采样时标不等间隔。

### 2.2 顾及各类钟跳的多普勒值构造方法

采用一阶相位中心差分法构造多普勒观测值, 关键在于将相位观测值和其真实的采样时标对应起来。假设前两个观测历元连续且未发生钟跳现象, 记作  $\varphi(t_{i-1})$ 、 $\varphi(t_i)$ , 第 3 个历元发生钟跳, 其载波相位观测值记作  $\varphi'(t_{i+1})$ 。

对第 1 类钟跳而言, 载波相位观测值和采样时标是对应的, 导出多普勒观测值为:

$$\dot{\varphi}\left(\frac{t_{i+1}+t_{i-1}}{2}\right)=\frac{\varphi'(t_{i+1})-\varphi(t_{i-1})}{t_{i+1}-t_{i-1}}\quad(6)$$

第 2 类钟跳, 载波相位观测值对应的时刻为  $\bar{t}_{i+1} = t_{i+1} + \tau_R$  因此, 在构造导出多普勒值时需考虑钟跳, 即

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}\left(\frac{\bar{t}_{i+1}+t_{i-1}}{2}\right) &= \\ &= \frac{\varphi'(t_{i+1})-\varphi(t_{i-1})}{(t_{i+1}-t_{i-1})+\text{round}(\delta t_{i+1}-\delta t_{i-1})} \end{aligned}\quad(7)$$

式中,  $\delta t$  为利用标准单点定位计算得到的钟差, 受定位误差的影响, 钟跳值 ( $\delta t_{i+1} - \delta t_{i-1}$ ) 并非恰好整 ms, 而是一个非常接近某个整数的值, 通过大量算例表明与整数的偏差小于 0.05 ms,  $\text{round}()$  为四舍五入函数, 对  $(\delta t_{i+1} - \delta t_{i-1})$  取最接近的

整数。若不存在钟跳,  $\delta t$  为一个接近 0 的极小值,  $\text{round}(\delta t_{i+1} - \delta t_{i-1})$  取整后仍为 0, 故式(7)仍适用于第一类钟跳。

第 3 类和第 4 类钟跳, 载波相位观测值进行了补偿, 与之对应的时刻为  $\bar{t}_{i+1} = t_{i+1} + \tau_R$ , 令  $\Delta t = (t_{i+1} - t_{i-1}) + \text{round}(\delta t_{i+1} - \delta t_{i-1})$ , 则导出多普勒值为<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(\frac{\bar{t}_{i+1} + t_{i-1}}{2}) &= \frac{\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_{i-1})}{\Delta t} + \\ &\frac{\varphi'(t_{i+1}) \times \Delta \tau_R}{\Delta t} + \frac{c \times \tau_R}{\Delta t} = \frac{\varphi'(t_{i+1}) - \varphi(t_{i-1})}{\Delta t} \end{aligned} \tag{8}$$

其中, 第 3 类钟跳不包含式(8)中的第 3 项公共偏差  $\frac{c \times \tau_R}{\Delta t}$ 。由式(6)~式(8)可见, 顾及 4 类钟跳的导出多普勒值构造方法可统一表示为:

$$\dot{\varphi}(\frac{\bar{t}_{i+1} + t_{i-1}}{2}) = \frac{\varphi'(t_{i+1}) - \varphi(t_{i-1})}{(t_{i+1} - t_{i-1}) + \text{round}(\delta t_{i+1} - \delta t_{i-1})},$$

$\bar{t}_{i+1} = t_{i+1} + \tau_R$

(9)

2.3 速度参数估计

针对式(1)测速观测方程, 表现矩阵为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L}$$

(10)

式中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -e_x^1 & -e_y^1 & -e_z^1 & 1 \\ -e_x^2 & -e_y^2 & -e_z^2 & 1 \\ \vdots & & \vdots & \\ -e_x^n & -e_y^n & -e_z^n & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \dot{\varphi}_r^1 - e_r^1 \cdot \dot{r}^1 + c \times \delta \dot{t}^1 \\ \lambda_1 \dot{\varphi}_r^2 - e_r^2 \cdot \dot{r}^2 + c \times \delta \dot{t}^2 \\ \vdots \\ \lambda_1 \dot{\varphi}_r^n - e_r^n \cdot \dot{r}^n + c \times \delta \dot{t}^n \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ c \times \delta \dot{t}_r \end{bmatrix}。$$

其中,  $\dot{\varphi}_r^i$  为根据式(7)计算得到的多普勒值, 只有当第 4 类钟跳发生时,  $\mathbf{L}$  中才会含有系统误差  $\Delta L = c \times \tau_R / \Delta t$ 。由于  $\Delta L$  与  $c \delta \dot{t}_r$  线性相关, 在采用经典最小二乘法求解参数过程中两项无法分离,

此时所估参数  $\mathbf{X} = [V_x, V_y, V_z, (c \delta \dot{t}_r - \Delta L)]^T$ , 即系统误差  $\Delta L$  被参数钟速所吸收, 但不会对  $[V_x, V_y, V_z]^T$  产生影响<sup>[9]</sup>。

3 算例验证

为分析 4 类钟跳对测速的影响, 本文设计了静态和动态两组实验, 每组分别采用常规  $2 \times \Delta T$  构造的导出多普勒观测值和顾及钟跳的导出多普勒值进行速度求解。

3.1 静态模拟动态实验

选取 GENO、INEG、CAGL 和 MAL2 测站 4 个 IGS 测站 2011-04-10 共 1 d 的数据, 分别对应 1~4 钟跳。由于测站静止, 故速度真值为 0, 并将速度结果转换至 E/N/U 方向。

图 2 分别表示 4 个测站的速度时序图, 横坐标表示历元个数, 红色点线表示利用常规方法构造多普勒值得到的速度序列, 蓝色点线表示利用本文方法构造的多普勒值得到的速度序列。由于 GENO 测站时标阶跃较多, 为清晰地显示结果只截取前 130 历元的结果。当不顾及钟跳影响时, 4 个测站的速度均有明显的异常值。对于 30 s 采样率的数据, 钟跳引起的水平方向上测速误差在 3 cm/s 内, 高程方向在 6 cm/s 内, 而 1 s 采样率的数据, 水平方向误差在 20 cm/s 内, 高程方向在 30 cm/s 左右。

表 2 统计了 4 个测站与钟跳时刻相关的速度序列的均方根(RMS)信息作为精度评定依据。

(1) 顾及钟跳影响的情况下, 对 30 s 采样率的数据, 其水平方向测速精度为 0.1~0.2 cm/s, 高程方向测速精度为 0.3~0.5 cm/s; 而对 1 s 采样率的数据而言, 水平和高程方向测速精度均为 0.2 cm/s 左右。

(2) 不顾及钟跳影响的情况下, 30 s 采样率的数据, 其水平方向测速精度约为 2 cm/s, 高程方向精度约 1~3 cm/s; 而对 1 s 采样率的数据, 其水平和高程方向测速精度分别为 4~11 cm/s 和 16 cm/s。可见采样率越高速度受钟跳的影响越

表 2 与钟跳时刻相关的速度精度统计表

Tab. 2 The Statistics of Velocity Accuracy with GPS Receiver Clock Jump Epoch for Static Tests

测站	不顾及钟跳(RMS)/(cm·s <sup>-1</sup> )			顾及钟跳(RMS)/(cm·s <sup>-1</sup> )		
	E	N	U	E	N	U
30 s	GENO	0.72	0.45	0.93	0.17	0.21
	INEG	1.46	1.00	3.37	0.10	0.12
	CAGL	1.72	0.92	2.04	0.14	0.18
1 s	MAL2	11.83	4.14	16.32	0.17	0.11

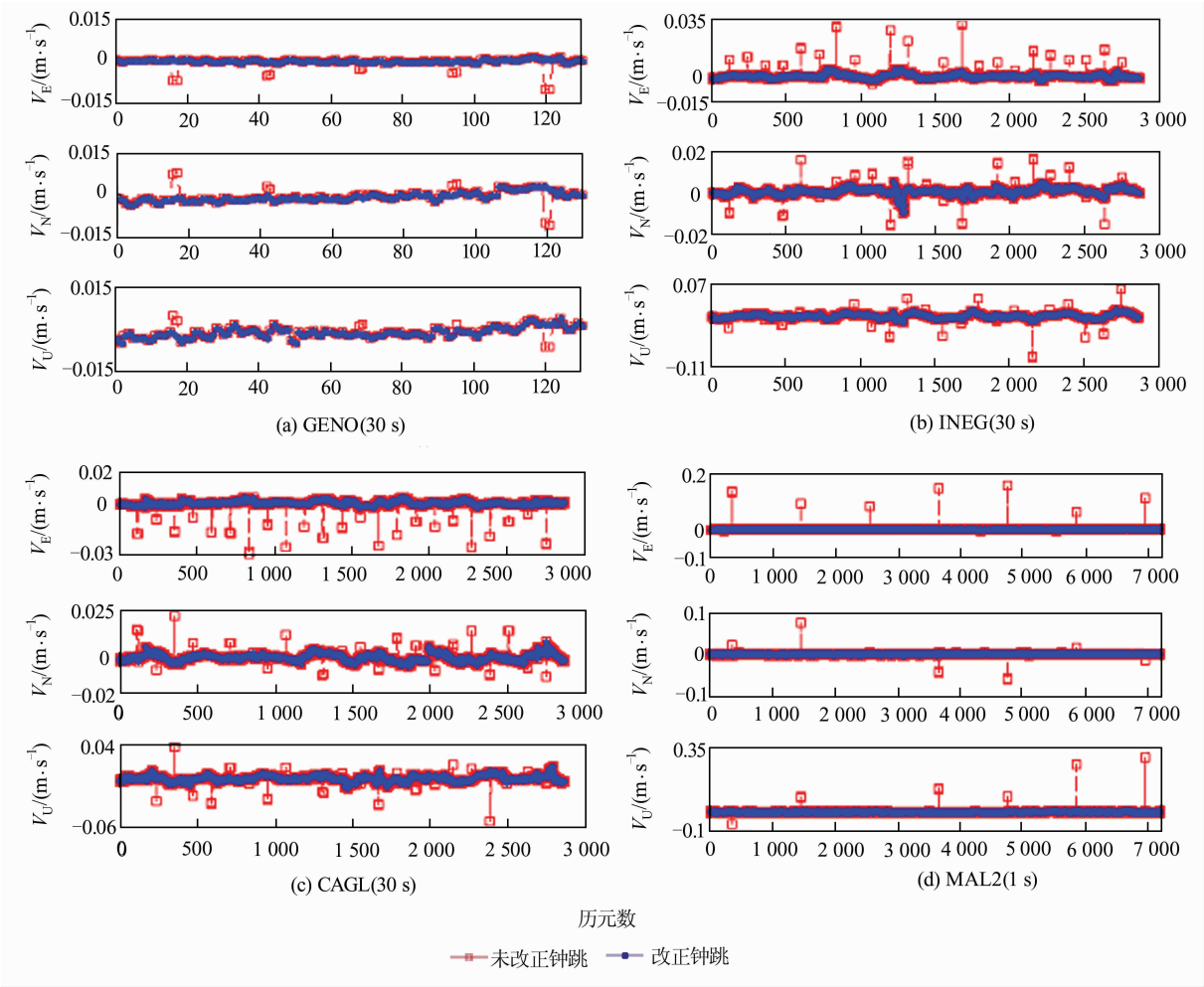


图 2 GENO、INEG、CAGL、MAL2 测站 E/N/U 速度结果比较

Fig. 2 Results of Velocity on East/North/Up Component of GENO, INEG, CAGL, MAL2

大,这是由于每颗卫星的相异偏差是固定值,而导出多普勒值和采样间隔成反比,因此,采样率越小相异偏差对速度的影响越大。

3) 对比顾及和不顾及钟跳的情况,可见顾及钟跳影响后的测速精度得到了明显提高。尤其对 1 s 采样率的数据而言,精度提高了几十倍。

3.2 动态实验

在实地进行车载 GPS 动态试验,数据采样率为 0.2 Hz,历时超过 400 min,接收机类型为 ASHTECH Z-XII。汽车运行轨迹如图 3 所示。其中绿色曲线表示汽车在水平方向上的运行轨迹,蓝色曲线上的点表示该位置的高程值。内符合精度评定公式为:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{p} \mathbf{v}}{r}}, \sigma_i = \sigma_0 \sqrt{Q_i},$$
$$\sigma_{3D\_m} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sigma_i^2}$$

(11)

式中,  $\sigma_0$  为标准中误差;  $r$  为自由度;  $v$  为该历元观测量残差(此处观测量为导出多普勒值);  $p$  为权

阵,  $\sigma_i$  和  $Q_i$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向速度的中误差和相应的协因数;  $\sigma_{3D\_m}$  为点位速度的内符合精度。

图 4 为车载速度序列,红色和蓝色点线分别为传统方法和本文方法求解得到的点位速度内符合精度序列,绿色点线代表时标阶跃序列。由图 4 可知,利用本文方法计算得到的点位速度内

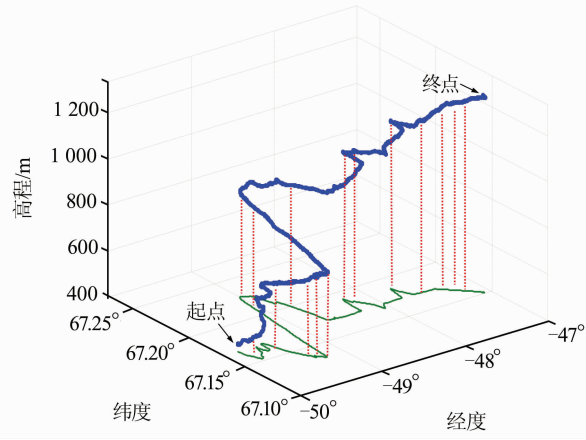


图 3 汽车运动轨迹

Fig. 3 Vehicle Trajectory

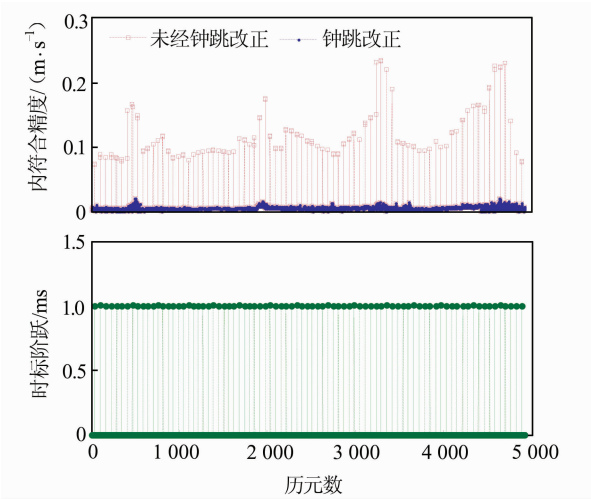


图 4 顾及第一类钟跳影响的车载速度中误差序列(5s)  
Fig. 4 Results of Velocity Standard Deviations and the GPS Receiver Clock Jumps

符合精度优于 0.5 cm/s,而传统方法在时标阶跃历元解得的点位速度内符合精度达到了 25 cm/s 左右。载体运动的整个过程共发生了 82 次时标阶跃,若不对钟跳加以考虑将严重影响速度结果。

参 考 文 献

[1] van Graas F, Soloviev A. Precise Velocity Estimation Using a Stand-alone GPS Receiver[J]. *Navigation*, 2004, 51(4): 283-292

[2] Hebert C J, Keith J, Ryan S, et al. DGPS Kinematic Carrier Phase Signal Simulation Analysis for Precise Aircraft Velocity Determination[C]. The ION GPS-97, Albuquerque, NM, 1997

[3] Zhang Xiaohong, Guo Bofeng. Real-time Tracking the Instantaneous Movement of Crust During Earthquake with a Stand-alone GPS Receiver[J]. *Chinese Journal Geophysics*, 56(6): 1 928-1 936(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*, 56(6): 1 928-1 936)

[4] Zhang J, Zhang K, Grenfell R, et al. On Real-time High Precision Velocity Determination for Stand-alone GPS Users [J]. *Survey Review*, 2008, 40 (310): 366-378

[5] Serrano L, Kim D, Langley R B. A Single GPS Receiver as a Real-time, Accurate Velocity and Acceleration Sensor[C]. The ION GNSS, Long Beach, California, 2004

[6] Kim D, Langley R B. Instantaneous Real-time Cycle-slip Correction for Quality Control of GPS Carrier-Phase Measurements[J]. *Navigation*, 2002, 49 (4): 205-222

[7] Kennedy S L. Precise Acceleration Determination from Carrier-phase Measurements[J]. *Navigation*, 2003, 50(1): 9-19

[8] Zhang J. Precise Velocity and Acceleration Determination Using a Standalone GPS Receiver in Real time[D]. Melbourne: RMIT University, 2007

[9] Zhang X, Guo B, Guo F, et al. Influence of Clock Jump on the Velocity and Acceleration Estimation with a Single GPS Receiver Based on Carrier-Phase-derived Doppler[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 549-559

[10] Guo F, Zhang X. Real-time Clock Jump Compensation for Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(1): 41-50

Research of Clock Jump Effect on Velocity Estimation  
with a Single GPS Receiver

ZHENG Kai<sup>1</sup> GUO Bofeng<sup>1,2</sup> ZHANG Xiaohong<sup>1</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China  
2 First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

**Abstract:** In this paper, we first analyze the influence of four types of clock jump categorized according to their impact on GNSS observables to time tag and carrier phase measurements. Then we make a comparison of two mainstream methods. The results indicate that, the precision of carrier-phase corrected method is mainly depended on the precision of carrier phase, while the precision of time-tags corrected method is mainly affected by clock jump value. Then, we make an in-depth discussion about time-tags corrected method for the four types clock jumps, and provide an unified formula to construct (下转第 327 页)

版. 2009, 34(11): 1 372-1 376)

# A-GNSS Indoor Positioning Based on Coarse-time Navigation and RAIM Algorithm

HUANG Zhiyong<sup>1,2</sup> ZHAO Dongqing<sup>2</sup> ZHANG Shuangna<sup>3,4</sup> WU Hao<sup>2</sup> TIAN Yijun<sup>2</sup>

- 1 China Aerospace Surveying & Mapping Center, Beijing 102102, China
- 2 School of Mapping and Surveying, Information Engineering University, Zhengzhou 450052 ,China
- 3 Spacet Star Technology CO. Ltd, Beijing 100086, China
- 4 State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology, Beijing 100086, China

**Abstract:** For the existing problem of GNSS receiver in the indoor environment facing for strong signal attenuation, the NLOS propagation and cross correlation effects, this text proposes a coarse time navigation and RAIM algorithm to solve the problem of AGNSS indoor positioning and use BDS data to verify the reliability of the method. The experiment showed that the coarse time navigation algorithm is able to provide successive and reliable positioning results. It can also be used in weak signal environments. RAIM algorithm based on a combination FDE can increase the availability of the positioning result and solve the problems of NLOS propagation and cross correlation effects of indoor satellite signals. The AGNSS technology based on coarse time navigation and RAIM algorithm can be applied to indoor positioning, and its simulation result of horizontal RMS is less than 10 m.

**Key words:** assisted-GNSS; assisted-BDS; coarse-time navigation; RAIM ; indoor GNSS

**First author:** HUANG Zhiyong, master, specializes in GNSS data processing and A-GNSS indoor positioning technology. E-mail; Lanruo\_hzy@qq. com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41274045; the Open Research Fund of the Academy of Satellite Application, No. 2014\_CXJJ-DH\_14.

(上接第 308 页)

carrier-phase-derived Doppler measurements. The testing is conducted with static data from IGS stations and kinematic data collected by car campaign by using conventional method and the proposed method. The results show that, receiver velocity suffered significantly from clock jumps, and the impact on static velocity estimation reaches up to cm/s and dm/s for 30s sampling data and 1 s sampling data respectively, and the standard deviation reaches 25 cm/s for kinematic data.

**Key words:** GPS; receiver clock jumps; carrier-phase-derived Doppler measurements; velocity determination; single receiver

**First author:** ZHENG kai, PhD candidate, specializes in date processing GNSS precision velocity and acceleration determination. E-mail; zhengkai@whu. edu. cn

**Corresponding author:** ZHANG Xiaohong, PhD, professor. E-mail; xhzhang@sgg. whu. edu. cn

**Foundation support:** the Spark Program of Earthquake Sciences, No. XH16053; Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China, No. 20130141110001; the Special Scientific Research Fund for Public Welfare Profession of China, No. 201512002.