

GPS/GLONASS/BDS 多模融合伪距单点定位模型精度分析

王涛

(安徽理工大学 测绘学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: GNSS 伪距单点定位速度快且不存在整周模糊度问题, 其原理简单易于编程实现, 所以在进行 GNSS 数据处理时, 经常用到该方法。本文以 GPS、GLONASS、BDS 多模融合为例, 简单介绍多模融合存在的坐标统一、时间基准统一问题, 再详细介绍多模融合伪距单点定位原理以及解算模型, 基于 Visual Studio2010 平台, 编写 GPS、GLONASS、BDS 多模融合的伪距单点定位及单点测速程序。结合相关算例, 对该程序多系统伪距单点定位的精度以及单点测速精度进行分析。

关键词: GPS/GLONASS/BDS; 伪距单点定位; 单点测速; 精度

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2017)03-0032-06

0 引言

随着中国卫星导航的发展, 多模融合定位成为未来 GNSS 的重要发展方向, 多模融合可以很好地增加测站接收卫星数目, 形成更好的空间几何布局, 从而降低精度稀释因子(DOP), 提高导航定位的稳定性和可靠性^[2]。伪距单点定位速度快且不存在整周模糊度问题, 而且其原理简单易于编程实现, 所以在进行 GNSS 数据处理时, 经常用到该方法^[3]。此前众多学者对 GPS/BDS、GPS/GLONASS 和 GPS/BDS/GLONASS 的研究已取得了丰硕的成果, 张辉等^[4]对 GPS/BDS 系统组合的可见性和定位精度进行了仿真; 唐卫明等^[5]利用实测数据对 GPS/BDS 系统组合模拟不同遮挡环境下的可见卫星数、PDOP 值以及三维导航可用性进行了研究; 李鹤峰等^[6]利用实测数据验证了 GPS/BDS/GLONASS 组合导航算法的正确性; 何俊等^[7]根据 MGEX 网中的 13 个不同区域的监测站数据, 研究了 GPS、BDS、GLONASS 在全球不同地区的可见性以及组合定位时的随机模型, 但对于组合系统的单点测速问题, 还是值得研究的。

为此, 本文先介绍 GPS、GLONASS、BDS 多模

融合的时空统一问题, 再详细介绍伪距单点定位解算模型及单点测速模型, 基于 Visual Studio2010 平台, 编写 GPS、GLONASS、BDS 多模融合的伪距单点定位程序。结合唐家会煤矿的实测数据, 对该程序多系统伪距单点定位的精度及单点测速精度进行分析。

1 GPS、GLONASS、BDS 多模融合伪距单点定位解算

1.1 时空基准统一

截止 2016 年 9 月底, GPS 有 31 颗卫星在轨运行^[8], GLONASS 有 24 颗卫星在轨运行^[9], 我国已成功发射了 23 颗北斗卫星^[10]。GPS、GLONASS 和 BDS 采用的时间基准虽互有差异, 但都与世界时(UT)、国际原子时(AIT)以及世界协调时(UTC)存在着密切联系。任一瞬间 GPST 与 AIT 间均有一常量偏差(19 s); GLONASS 与国际原子时没有固定的整秒偏差, 是不连续的时间系统; BDT 与协调世界时 UTC(NTSC)的时间偏差小于 100 ns。但在实际应用 GNSS 多模融合导航定位时, 以 GPST 为基础, 将 GLONASS 与 BDT 转化成 GPST^[6]。

收稿日期: 2017-03-06

资助项目: 国家自然科学基金(批准号 41474026); 安徽国土资源厅科技项目(编号: 2011-K-22, 2011-K-18); 安徽理工大学研究生创新基金(编号: 2017CX2056); 淮南矿业(集团)有限责任公司项目(编号: HNKY-JTJS(2013)-28)

联系人: 王涛 E-mail: 854554251@qq.com

$$GPST = GLONASST_{\text{星历}} + 1 s \times n - 19, \quad (1)$$

$$BDT = GPST - 14 s, \quad (2)$$

其中, n 为 UTC 与 AIT 之间的调整参数, 2012 年 7 月 1 日以后, 该调整参数 n 为 35, 2015 年 7 月 1 日以后 n 为 36.

将 CGCS2000 和 PZ90 坐标系归化到 WGS-84 坐标下, 文献[11]指出: CGCS2000 和 WGS-84 是相容的, 在坐标系的实现精度范围内, CGCS2000 和 WGS-84 是一致的, 可以认为 CGCS2000 定位成果同属于 WGS-84 坐标系成果。WGS-84 与 PZ90 之间的转换可以采用布尔萨 7 参数表示^[6]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1 + m) \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_x & -\epsilon_y \\ -\epsilon_x & 1 & \epsilon_x \\ \epsilon_y & -\epsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{PZ90}}, \quad (3)$$

式中: $\Delta X = -0.47$; $\Delta Y = -0.51$; $\Delta Z = -1.56$; $\epsilon_x = 0.076 \times 10^{-6}$; $\epsilon_y = 0.017 \times 10^{-6}$; $\epsilon_z = 1.728 \times 10^{-6}$; $m = 22 \times 10^{-9}$.

1.2 数学模型

文献[3]研究了 GPS 伪距单点定位, 并给出了 GPS 伪距单点定位原理和数学解算模型。笔者对于伪距单点定位原理就不赘述了, 只是在文献[3]的数学解算模型的基础上改写成 GPS、GLONASS、BDS 多模融合的伪距单点数学解算模型, 多系统融合解算时不同系统之间视为等权, 同系统间高度角定权。

单系统伪距定位待估参数有三个坐标分量和一个接收机钟差, 双系统组合伪距定位待估参数有三个坐标分量和两个接收机钟差, 而三系统组合伪距定位待估参数有三个坐标分量和三个接收机钟差。所以线性化伪距观测方程为

$$\mathbf{R}_k^j = \begin{bmatrix} l^1 & m^1 & n^1 & -1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^a & m^a & n^a & -1 & 0 & 0 \\ l^{a+1} & m^{a+1} & n^{a+1} & 0 & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^{a+b} & m^{a+b} & n^{a+b} & 0 & -1 & 0 \\ l^{a+b+1} & m^{a+b+1} & n^{a+b+1} & 0 & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^{a+b+f} & m^{a+b+f} & n^{a+b+f} & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ c\delta t_k^{\text{GPS}} \\ c\delta t_k^{\text{GLO}} \\ c\delta t_k^{\text{BDS}} \end{bmatrix}$$

$$= \rho_k^j - c\delta t^j + \delta \rho_{\text{ion}}^j + \delta \rho_{\text{trop}}^j, \quad (4)$$

式中: a, b, f 分别表示 GPS、GLONASS、BDS 的卫星个数; $\delta t_k^{\text{GPS}}, \delta t_k^{\text{GLO}}, \delta t_k^{\text{BDS}}$ 分别表示 GPS、GLONASS、BDS 的接收机钟差; ρ_k^j 为伪距观测量; $\delta \rho_{\text{ion}}^j$ 为电离层延迟; $\delta \rho_{\text{trop}}^j$ 为对流层延迟; δt^j 为卫星钟差; $l^j = (X^j - X_0)/R_k^j, m^j = (Y^j - Y_0)/R_k^j, n^j = (Z^j - Z_0)/R_k^j$,

$$R_k^j = \sqrt{(X^j - X_0)^2 + (Y^j - Y_0)^2 + (Z^j - Z_0)^2}$$

将式(4)改写成矩阵形式:

$$\mathbf{A}\delta\mathbf{X} = \mathbf{L}. \quad (5)$$

当观测卫星数大于伪距定位待估参数时, 可用最小二乘法求解, 式(5)改写成误差方程形式:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\delta\mathbf{X} - \mathbf{L}, \mathbf{P}. \quad (6)$$

将权 $\mathbf{P}$ 定为高度角定权, 所以根据最小二乘法求得改正数 $\delta\mathbf{X} = -(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{L}$,

$$\begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} \text{ 就可以求出接收机坐标 } (X_k, Y_k, Z_k).$$

对式(4)关于时间求导, 就可以得到单点测速方程^[12]:

$$\dot{\mathbf{R}}_k^j = \begin{bmatrix} l^1 & m^1 & n^1 & -1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^a & m^a & n^a & -1 & 0 & 0 \\ l^{a+1} & m^{a+1} & n^{a+1} & 0 & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^{a+b} & m^{a+b} & n^{a+b} & 0 & -1 & 0 \\ l^{a+b+1} & m^{a+b+1} & n^{a+b+1} & 0 & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^{a+b+f} & m^{a+b+f} & n^{a+b+f} & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \dot{\delta t}_k^{\text{GPS}} \\ \dot{\delta t}_k^{\text{GLO}} \\ \dot{\delta t}_k^{\text{BDS}} \end{bmatrix} = \dot{\delta \rho}_{\text{trop}}^j - \dot{\delta t}^j + \dot{\delta \rho}_{\text{ion}}^j \quad (7)$$

与单点定位类似, 对于测速的观测方程, 卫星的速度以及卫星钟速是为已知量, 接收机位置可以通过伪距单点求得, 其余速度误差可以进行相应的改正或量级很小的忽略不计。对于测速的观测量 $\dot{\mathbf{R}}_k^j$, 可以通过接收机输出的原始多普勒观测值获得^[13], 也可通过相应载波相位观测值的一阶中心差分来获得, 称之为导出多普勒^[12]。本文采用原始多普勒观测值^[13]:

$$\lambda D = l(V_X - V^X) + m(V_Y - V^Y) + n(V_Z - V^Z) + c \cdot dt_k - c \cdot dt^j, \quad (8)$$

式中: λ 为载波相位的波长; D 为卫星的多普勒观

测值; (V_x, V_y, V_z) 为接收机的速度; (V^x, V^y, V^z) 为卫星的速度; dt_k 和 dt^i 分别为接收机和卫星钟差的变化率。

本文使用的是 GPS 的 L1、L2 频率、BDS 的 B1、B2 频率、GLONASS 的 G1、G2 频率进行伪距单点定位,电离层改正一般采用双频观测消除^[3],对流层路径延迟选用简化 Hopfield 模型^[14],考虑地球自转改正和相对论效应。对于测速,对流层和电离层延迟变化率及加速度,在采样率为 1 s 时可以忽略不计,但考虑相对论效应的影响。

2 程序实现及精度分析

2.1 程序实现

根据上述的 GPS、GLONASS、BDS 多模融合的伪距单点定位原理和相关改正模型,基于 Visual Studio2010 平台,编写了 GPS、GLONASS、BDS 多模融合的伪距单点定位程序,程序设计流程如图 1 所示。

2.2 算例分析

本文数据来源于 2016 年 5 月 29 日在内蒙古自治区鄂尔多斯市的唐家会煤矿自动化监测系统,选取了测站 CTJH 和 CTJC 站在北京时间 2016 年 5 月 29 日 9 点 54 分至 2016 年 5 月 29 日 14 点 00 分的观测数据,采样间隔 1 s,两测点周围空旷,观测条件良好,截止高度角设置为 10° 。

1) 可见卫星数和 PDOP 值

当观测卫星数较多时,卫星可以形成较好的空

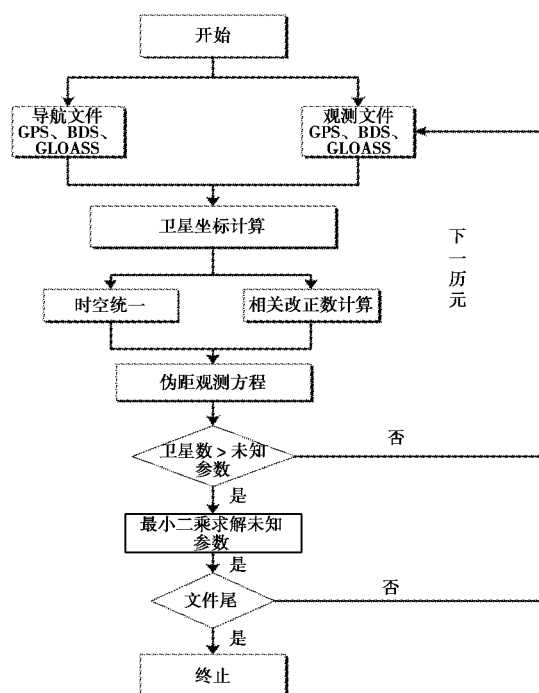


图 1 GPS、GLONASS、BDS 多模融合的伪距单点定位流程图

间几何分布,有利于降低位置精度因子,即 $PDOP$ 值,有利于提高定位精度^[11]。根据程序计算结果, GPS、BDS、GLOANSS 及多系统融合的可见卫星数和 $PDOP$ 值如图 2 所示(图中只给出了 CTJH 站的结果,CTJC 站结论一致),表 1 示出了两站可见卫星数均值和 $PDOP$ 值均值以及 $PDOP$ 在(1, 3)之间的分布情况。

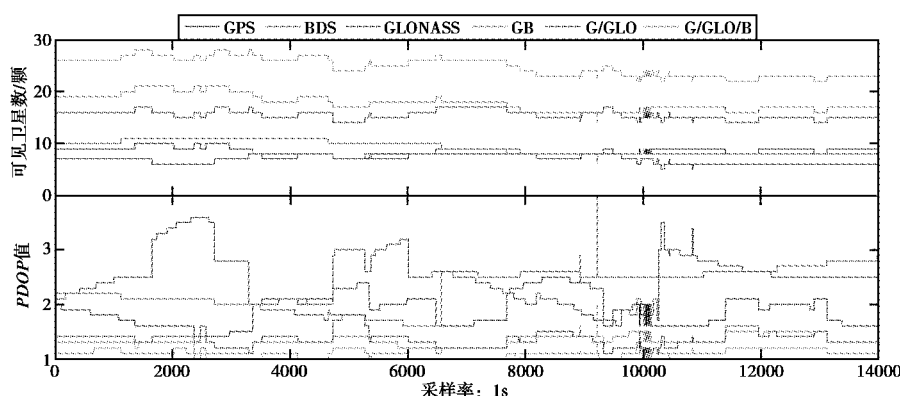


图 2 可见卫星数和 $PDOP$ 值

表 1 两站可见卫星数均值和 PDOP 值均值以及 PDOP 在(1,3)之间的分布情况

测站	模式	GPS	BDS	GLONASS	G/B	G/GLO	G/GLO/B
CTJH	可见卫星数均值	8.56	9.25	6.93	17.82	15.54	24.76
	PDOP 均值	1.89	2.31	2.50	1.32	1.35	1.09
	PDOP 值区间分布 <3	100%	100%	82.6%	100%	100%	100%
CTJC	可见卫星数均值	8.56	8.96	6.86	17.52	15.42	24.37
	PDOP 均值	1.90	2.36	2.48	1.33	1.36	1.10
	PDOP 值区间分布 <3	100%	100%	84.0%	100%	100%	100%

注:G/B 为 GPS/BDS 的缩写,G/GLO 表示 GPS/GLONASS 缩写,G/GLO/B 表示 GPS/GLONASS/BDS 缩写,下文同。

图 2 中,BDS 的可见卫星数均值要大于 GPS,虽然 GLONASS 的可见卫星数均值低于 GPS 和 BDS 系统,但满足了单系统定位时最少 4 颗卫星的要求,组合系统的可见卫星数均值均超过了 15 颗;表 1 中,组合系统的 PDOP 值比单系统低,说明组合系统比单系统拥有更好的空间几何分布,除 GLONASS 外,其余系统的 PDOP 小于 3 的比例均达到了 100%。

2) 定位精度分析

本文所进行的精度分析,是把各历元解算坐标与测站坐标真值的差值转换为站心直角坐标系下的(N,E,U)后,着重对平面内偏差(P 方向)和高程方向偏差(U 方向)进行详细的分析^[12]。图 3 示出了 CTJH 站 GPS、BDS、GLONASS 及其组合系统在平面(P 方向)的定位偏差和 CTJH 站 GPS、BDS、GLONASS 及其组合系统在高程(U 方向)的定位偏差。

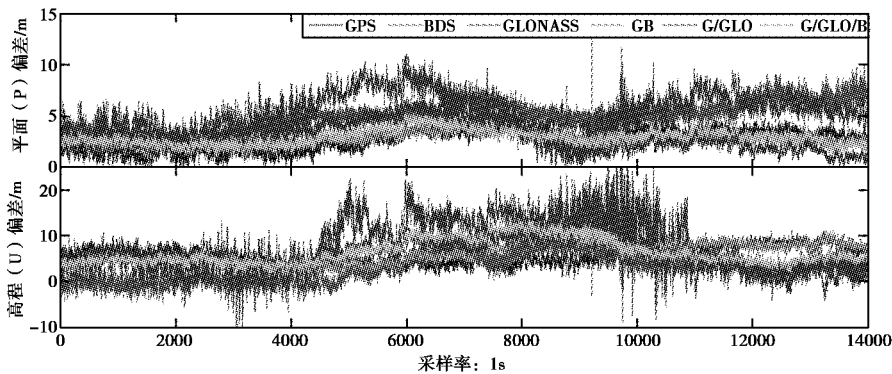


图 3 GPS、BDS 和 GLONASS 及组合系统在平面和高程方向的定位偏差

经计算,GPS、BDS、GLONASS 单系统以及 GPS/BDS、GPS/GLONASS、GPS/GLONASS/BDS 等组合系统在测量期间内平面(P)方向内定

位偏差 RMS 值、高程(U)方向上定位偏差 RMS 值如表 2 所示。

表 2 测量期间内 P、U 方向内定位偏差 RMS 值

方向	GPS	BDS	GLONASS	G/B	G/GLO	G/GLO/B
P/m	1.15	1.42	1.96	1.96	1.33	1.74
U/m	1.92	3.15	6.06	2.25	2.61	2.66

GPS 在平面(P)方向内和高程(U)方向上的定位偏差都小于 BDS、GLONASS 单系统以及 GPS/BDS、GPS/GLONASS、GPS/GLONASS/BDS 等组合系统,这是因为 BDS 和 GLONASS 的测距精度都比 GPS 略差,但组合系统在平面(P)方向内和高程(U)方向上的定位结果相比 BDS 和 GLONASS 单系统都有所提高。

3) 测速精度分析

由于 CTJH 站和 CTJC 站的观测数据是静态数据,但通过静态数据模拟动态数据的方法,可以将测站的速度真值视为零。得到 CTJH 站 GPS、BDS、GLONASS 及组合系统的单点测速的结果,如图 4 所示(CTJC 站与 CTJH 站结果一致)。

统计了 2 个测站的单点测速结果,得到各测站单点测速的均方根误差 RMS 如表 3 所示。

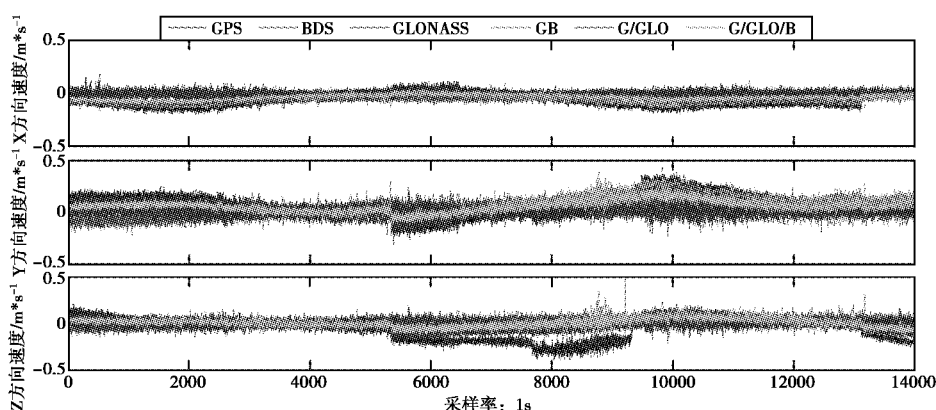


图 4 GPS、BDS、GLONASS 及组合系统单点测速结果

表 3 测站静态测速结果统计/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

测站	方向	GPS	BDS	GLONASS	G/B	G/GLO	G/GLO/B
CTJH	X	62.6	27.7	25.1	35.4	38.7	27.6
	Y	113.2	65.7	44.6	78.8	78.0	57.1
	Z	122.6	48.2	38.8	53.2	73.3	45.0
CTJC	X	60.2	24.9	21.5	33.6	37.0	26.2
	Y	109.3	59.0	39.5	77.2	75.9	55.9
	Z	123.6	42.9	34.9	52.5	73.3	44.5

从图 4、表 3 可以看出,无论何种系统,采用原始多普勒观测值测速的均方根误差均达到 $\text{dm} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级,但相比 GPS 而言,BDS、GLONASS 和组合系统的 RMS 值更小,达到了 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级;X 方向上的速度曲线较 Y、Z 方向上要平滑,X 方向的测速精度高于 Y、Z 方向;CTJH 站与 CTJC 站测速精度相当,这是因为两站采用相同类型的接收机,且两站之间距离较近。

3 结束语

通过上面的测试分析,可以得出:组合系统可以增加可见卫星数,降低了 PDOP 值,组合系统比单系统拥有更好的空间几何分布;GPS 在平面(P)

方向内和高程(U)方向上的定位偏差都小于 BDS、GLONASS 单系统以及 GPS/BDS、GPS/GLONASS、GPS/GLONASS/BDS 等组合系统,但组合系统在平面(P)方向内和高程(U)方向上的定位结果相比 BDS 和 GLONASS 单系统都有所提高;采用原始多普勒观测值测速,GPS、BDS、GLONASS 及组合系统的均方根误差均达到 $\text{dm} \cdot \text{s}^{-1}$ 水平。

参考文献

- [1] 杨元喜. 导航与定位若干注记[J]. 导航定位学报, 2015,3(3):1-4.
- [2] 吴玲,等. GPS/GLONASS/GALILEO 多星座组合导

- 航系统研究[J]. 中国空间科学技术, 2009(3):23-28.
- [3] 李鹤峰, 党亚民, 王世进, 等. GPS 伪距单点定位程序实现若干问题[J]. 全球定位系统, 2013, 38(2): 33-37.
- [4] 张辉, 周田, 李博, 等. BDS/GPS 组合系统定位性能分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 18-21.
- [5] 唐卫明, 徐坤, 金蕾, 等. 北斗/GPS 组合伪距单点定位性能测试和分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(4): 529-533.
- [6] 李鹤峰, 党亚民, 秘金钟, 等. BDS 与 GPS、GLONASS 多模融合导航定位时空统一[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(4): 73-78.
- [7] 何俊, 袁小玲, 曾琪, 等. GPS/BDS/GLONASS 组合单点定位研究[J]. 测绘科学, 2014, 39(8): 124-128.
- [8] Information And Analysis Center For Positioning Navigation And Timing. GPS Constellation status [EB/OL]. (2015-04) [2017-03-06]. <https://www.glonass-iac.ru/en/GPS/>.
- [9] Information and Analysis Center For Positioning, Navigation and Timing. GLONASS constellation status [EB/OL]. (2016-06) [2017-03-06]. <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>.
- [10] 北斗卫星导航系统. 发射记录[EB/OL]. (2010-01) [2017-03-06]. <http://www.beidou.gov.cn/xtjs.html>.
- [11] 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS-84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2008(5): 1-5.
- [12] 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.
- [13] 唐卫明, 张先春, 惠孟堂, 等. 基于卡尔曼滤波的北斗伪距单点定位算法研究[J]. 测绘通报, 2016(10): 6-8.
- [14] 余学祥, 王坚, 刘绍堂, 等. GPS 测量与数据处理[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.

作者简介

王涛 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为 GNSS 导航与数据处理。

Precision Analysis of Single Point Positioning Model with GPS/GLONASS/BDS

WANG TAO

(School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: GNSS pseudorange point positioning speed and there is no ambiguity problem, its principle is simple and easy to realize, so in GNSS data processing, this method is often used. Based on GPS, GLONASS, BDS multi-mode as an example, introduces the existing multi-mode coordinate unification, unified time benchmark problem then introduces the pseudorange point positioning principle and calculation model, based on the Visual Studio2010 platform, written in GPS, GLONASS, BDS multi-mode pseudorange single point positioning procedures and absolute velocity determination. Combined with relevant examples, pseudorange point positioning accuracy and absolute velocity determination were analyzed.

Keywords: GPS/GLONASS/BDS; pseudo range single point positioning; absolute velocity determination; accuracy