

基于多普勒测速的 GPS 单历元动态定位算法

李 昕¹ 郭际明¹ 章 迪¹ 杨 飞¹

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:在传统的 GPS 单历元动态定位参数估计中,由于先验约束信息较少,模糊度求解和定位性能往往较低。据此,研究了多普勒测速在 GPS 单历元动态定位中的应用,提出了一种附有 GPS 多普勒测速信息约束的坐标更新方法,即利用移动载体先验坐标和多普勒测速信息预测当前历元坐标。考虑到该方法进行坐标更新的精度较高和传统单点定位坐标更新的稳健性较强等特点,在此基础上给出了相应的单历元整周模糊度参数求解策略,进一步提高了该方法的定位性能。试验结果表明,所提出的算法相对于传统的无速度信息坐标约束的 GPS 单历元动态定位算法,其模糊度浮点解精度、模糊度固定率和平均定位精度均有了进一步提高,尤其是在观测卫星数较少、卫星几何结构较差的情况下更为明显。

关键词:多普勒测速;单历元;动态定位;模糊度求解

中图分类号:P228 **文献标志码:**A

GPS 单历元动态定位^[1-5]求解的坐标、模糊度等参数在历元之间均相互独立,避免了周跳探测和模糊度错误传递等问题,因此相对于传统的滤波解,单历元解更具抗干扰能力。但由于动态定位中单历元求解参数较多,先验约束信息较少,导致模糊度固定率往往较低,尤其是在卫星信号遮挡严重的市区等环境。目前,市场上的大多数 GPS 接收机均能接收到多普勒观测值信号,但其在定位中的作用往往被忽略。研究表明,利用 GPS 原始多普勒观测值单点测速可以获得 cm/s 级的精度^[6]。因此,研究如何有效利用多普勒观测值并将其测速功能应用于 GPS 单历元动态定位中很有必要。

单历元动态定位通常利用卡尔曼滤波进行参数估计,在滤波之前,坐标更新是一个重要问题,包括三维坐标分量值和对应方差阵的确定。目前,应用较多的是利用单点定位结果进行坐标更新,但精度较低。采用多普勒测速信息进行坐标更新,其主要原理是通过求解上一历元的坐标信息和多普勒测速信息来进行当前历元的坐标更新。该方法相对于单点定位坐标更新,理论上具有更高的精度^[7],其最关键的是如何有效地利用速度信息,即确定载体动态模型中预报值的随机模型。文献[8]利用速度信息更新坐标时,将标准

方差设置为一个常数(如 10 cm),但在大多数情况下 GPS 多普勒测速精度优于 5 cm,所以该方法在约束坐标时稍显保守。文献[9]分析了锁频环(frequency-locked loop, FLL)跟踪信号的测量噪声,将 GPS 多普勒测速精度给定一个较小值,但对于不同类型的接收机或者接收机载体处于高动态等情况下,该方法并不能真正自适应地反映多普勒测速的精度,在动态定位坐标更新时可能会偏离实际情况。

因此,本文利用 GPS 多普勒观测值求解接收机速度参数和方差阵,结合上一历元的坐标参数和方差阵来实现当前历元坐标更新;详细介绍了 GPS 动态定位模糊度解算策略,并对比分析了本文算法与传统算法的模糊度解算性能以及最终定位精度。

1 基于多普勒测速的 GPS 单历元动态定位方法

在利用卡尔曼滤波进行参数估计时,初始状态的给定精度能够直接影响状态参数的估计精度。在 GPS 单历元动态定位中,相对于传统的利用单点定位进行载体坐标参数更新方法,本文提出了一种更为精确的更新策略,即利用多普勒测

速信息约束进行坐标更新,在此基础上进行模糊度状态参数估计,并给出了相应的数据处理策略。

1.1 基于 GPS 多普勒测速信息的坐标参数更新
多普勒测速的数学模型可表示为:

$$\dot{\rho}^i = (v^i - v_u) e^i + \dot{b} + \epsilon^i \tag{1}$$

式中, $\dot{\rho}^i$ 表示多普勒频移,单位为 m; v^i 表示卫星 i 的运动速度,可根据导航文件计算得出,单位为 m/s; v_u 表示待估计的用户速度,3 个方向分量依次为 v_{ux} 、 v_{uy} 、 v_{uz} ; e^i 表示接收机和卫星连线的方向余弦; \dot{b} 表示接收机钟差变化率; ϵ^i 表示由卫星钟差、电离层误差、对流层误差等变化引起的误差项,单位为 m,一般情况下可以忽略。

因此,待估计参数包括用户速度分量 v_{ux} 、 v_{uy} 、 v_{uz} 以及接收机钟漂 b 共 4 个参数,可由 4 颗以上的卫星多普勒观测值按照最小二乘估计进行求解,观测值方程为:

$$v = BX - L \tag{2}$$

式中, B 表示设计矩阵; $X = [v_{ux} \ v_{uy} \ v_{uz} \ \dot{b}]$ 为待估参数; v 和 L 分别表示残差向量和观测值向量。根据最小二乘估计准则可求得 X 和对应的方差阵 D ,提取其中三维速度参数 X_v 以及方差阵 D_v 。

根据上一历元解算的坐标参数 $\hat{X}_p(t-1)$ 以及方差阵 $\hat{D}_p(t-1)$ 更新当前历元的三维坐标参数以及方差阵,公式为:

$$\begin{cases} \bar{X}_p(t) = \hat{X}_p(t-1) + X_v \cdot T \\ \bar{D}_p(t) = \hat{D}_p(t-1) + D_v \cdot T^2 \end{cases} \tag{3}$$

式(3)给出了利用多普勒测速信息进行坐标更新的函数模型和随机模型,其中 T 表示 GPS 接收机的数据采样间隔, t 为历元数 ($t > 1$)。

1.2 整周模糊度参数求解

模糊度参数一般利用载波和伪距观测值进行更新,公式为:

$$\begin{cases} \bar{X}_a(t) = P(t) - \lambda \cdot \varphi(t) \\ \bar{D}_a(t) = \sigma_p^2 \cdot I \end{cases} \tag{4}$$

式中, $\bar{X}_a(t)$ 和 $\bar{D}_a(t)$ 分别表示 t 历元更新的模糊度参数值和对应的方差阵; λ 为载波波长; $\varphi(t)$ 为 t 历元对应的载波相位观测值; $P(t)$ 和 $\lambda \cdot \varphi(t)$ 分别表示 $n_s \times 1$ 的伪距和载波非差观测值向量,单位为 m,其中 n_s 为可视卫星数; I 表示 $n_s \times n_s$ 的单位矩阵; σ_p^2 表示伪距噪声,根据经验值给定。

实际数据处理中,需要对初始化的非差模糊度参数进行双差处理,得到 $\Delta \nabla \bar{X}_a(t)$ 和 $\Delta \nabla \bar{D}_a(t)$ 。对于较短基线,忽略电离层、对流层延

迟等误差,动态情况下的定位精度一般为 cm 级。因此在单历元动态定位中,待估参数包括 3 个坐标参数以及 $n_s - 1$ 个双差模糊度参数。利用卡尔曼滤波方法可以得到当前历元更新后的坐标和双差模糊度参数估计值及方差阵,具体方法见文献 [10-12]。当前历元滤波后的双差模糊度参数 $\Delta \nabla \hat{X}_a(t)$ 为浮点解,可以利用经典的 LAMBDA 方法进行模糊度固定 [13-14],该方法的模糊度固定率主要取决于浮点解对应的方差阵精度,即 $\Delta \nabla \hat{D}_a(t)$ 的精度。

由于坐标更新时,引入了多普勒测速,相当于增加了观测值。理论上, $\Delta \nabla \hat{D}_a(t)$ 的精度相对于传统单点定位坐标更新方法应有所提升,但考虑到现实情景中可能会存在多普勒测速误差起伏较大等异常情况,而此时单点定位坐标的更新精度可能更加稳定,因此本文提出一种兼顾二者优势的模糊度求解策略。首先利用多普勒测速信息更新坐标,并将对应的模糊度浮点解进行 LAMBDA 搜索和 Ratio 检验,如果通过 Ratio 检验,则可以得到固定后的模糊度参数和坐标参数,否则采取传统单点定位坐标更新方法;重复进行 LAMBDA 搜索和 Ratio 检验,如果第 2 次也通过 Ratio 检验,则利用传统单点定位坐标更新方法获取最终的模糊度固定解,否则对比两次计算的 Ratio 值来确定最终的模糊度求解方案;如果第 2 次计算的 Ratio 值相对较大,则采用单点定位坐标更新对应的浮点解结果,否则仍采用多普勒测速坐标更新对应的浮点解结果。具体流程见图 1。

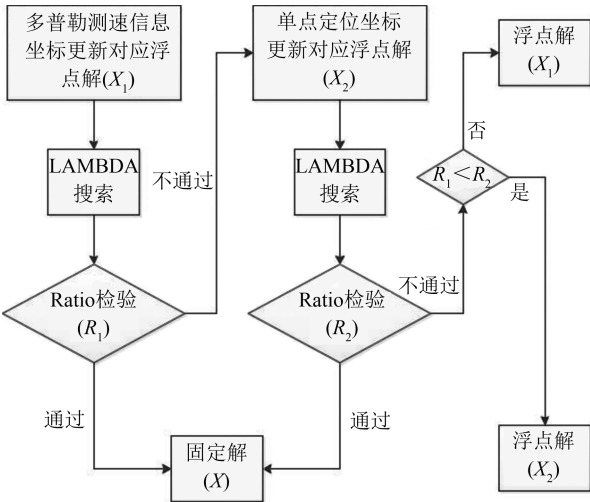


图 1 GPS 单历元模糊度求解策略

Fig.1 GPS Single-Epoch Ambiguity Resolution Strategy

本文的模糊度求解方法采用了 Ratio 二次检验,相对于传统的利用单点定位坐标更新求解模糊度参数的方法,或者只考虑多普勒测速信息进

行坐标更新的 Ratio 单次检验,正常情况下模糊度固定率应该会有所提高,至少不会降低,本文将通过试验数据加以验证。

2 试验与分析

在验证本文方法的有效性之前,首先分析了多普勒测速精度。利用国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS) MGEX (Multi-GNSS Experiment)网中,位于武汉市区的 JFNG 站连续两天的静态观测数据进行多普勒测速试验,观测日期为 2015-09-01—2015-09-02,数据采样间隔为 30 s,共 5 760 个历元。试验结果如图 2 所示。由于是静态观测,理论上速度应该为零,求解的速度值即为多普勒测速精度,从图 2 可以看出 GPS 多普勒测速精度较高,X、Y、Z 分量的速度值均在 5 cm/s 以内。

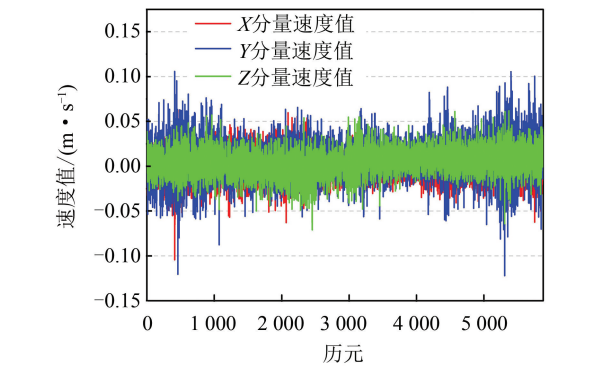


图 2 多普勒测速精度分析

Fig.2 Velocity Determination Accuracy Analysis with GPS Doppler Measurement

本次 GPS 动态试验数据采集于 2015 年 9 月 26 日,基准站架设在武汉大学信息学部友谊广场,流动站沿信息学部校园道路缓慢步行移动,图 3 为试验数据采集情况。接收机类型为 Trimble NetR9,数据采样间隔为 1 s,截止高度角设置为 15°。全程数据采集时间约 15 min,共得到约 900 个历元,基准站和流动站基线距离在 1 km 以内。

图 4 为本次试验可观测到的 GPS 卫星数以及对应的位置精度因子值(position dilution of precision,PDOP),可以发现可视卫星数平均在 10 颗左右,PDOP 值平均在 1.7 左右,在某些历元(如 200)由于校园树木或建筑物等信号遮挡,可视卫星数会有所降低,相应的 PDOP 值有所提高。

为了验证本文算法的有效性,对此次动态试验数据采集以下 3 种方法进行处理。

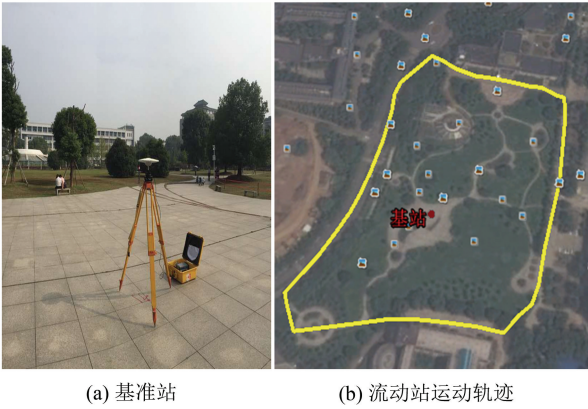


图 3 试验数据采集

Fig.3 Test Data Acquisition

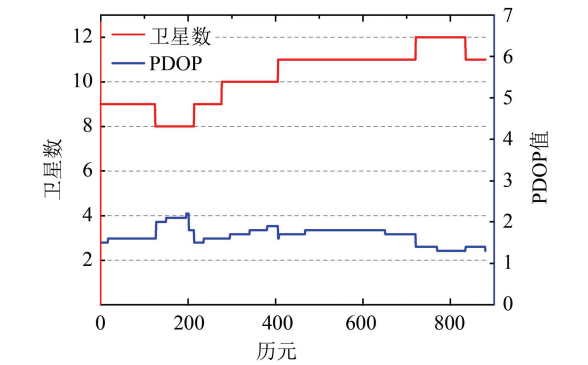


图 4 可视卫星数和 PDOP 值

Fig.4 Visible Satellite Number and PDOP Value

方法 1:传统单点定位坐标更新,标准方差设置为先验值 10 m。

方法 2:多普勒测速信息坐标更新,标准方差设置为先验值 10 cm/s。

方法 3:多普勒测速信息坐标更新,其标准方差是依据 § 1.2 的方法进行确定,模糊度求解策略如图 1 所示。

由于第 1 个历元无法获取先验速度信息,所以方法 2 和方法 3 在初始历元均采用单点定位更新坐标,后续历元则采用多普勒测速信息更新坐标。

分别采用以上 3 种方法处理此次试验数据,对应的单历元 Ratio 值计算结果如图 5 所示。可以发现,方法 2 对应的 Ratio 值较方法 1 整体有所提高,但没有方法 3 相对于方法 1 的 Ratio 值提升幅度大。这是因为方法 2 在利用多普勒测速信息进行坐标更新时,标准方差给定为 10 cm/s,而从图 2 可以看出,多普勒测速精度大多数优于 5 cm/s,所以采用方法 2 进行坐标更新时较为保守,没有充分利用多普勒测速信息。结合图 4 的卫星数和 PDOP 值可以看出,在卫星数相对较少

的历元(如 200),Ratio 值的提高幅度非常明显;而在卫星数相对较多的历元(如 800),Ratio 值的提升幅度则不是很明显。

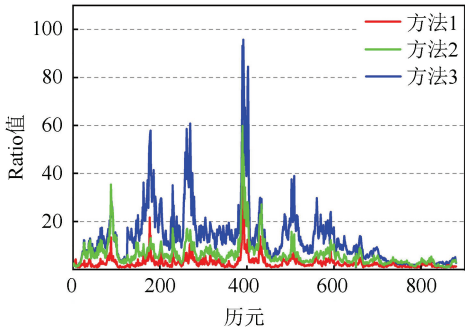


图 5 3 种方法对应的 Ratio 值

Fig.5 Ratio Values Computed by the Three Methods

为了体现 § 1.2 中模糊度求解采用 Ratio 二次检验方法的优越性,计算了利用多普勒测速信息进行坐标更新时仅进行 Ratio 单次检验对应的 Ratio 值,并和方法 1、方法 3 对应的 Ratio 值序列进行对比。可以发现,方法 3 中绝大部分历元 Ratio 二次检验对应的 Ratio 值和单次检验对应的 Ratio 值相同,经过统计,只有前 10 个历元中出现了异常,如图 6 所示。其中,红色部分表示方法 1 对应的前 10 个历元 Ratio 值序列,蓝色部分代表方法 3 对应的 Ratio 值序列,绿色部分代表上述 Ratio 单次检验对应的 Ratio 值序列。可以发现,在第 5、6、7 个历元时,Ratio 单次检验对应的 Ratio 值(小于 3)反而要低于传统单点定位坐标更新对应的 Ratio 值,这是由于第 4 个历元的浮点解定位结果出现较大偏差,加上多普勒测速出现一定偏差,直接影响到后面几个历元的坐标更新精度。按照图 1 的模糊度求解策略,即进行了 Ratio 二次检验,最终采用了单点定位坐标更新的浮点解结果,其对应的 Ratio 值序列如图 6 中蓝色部分所示。

为进一步表明本文方法的优越性,引入模糊度精度因子(ambiguity dilution of precision, ADOP),具体定义参考文献[15]。ADOP 值反映了模糊度浮点解方差阵的精度,一般情况下,ADOP 值越小,表示浮点解精度越高,模糊度固定成功率也越高。图 7 展示了 3 种方法对应的 ADOP 值计算结果,可以看出方法 3 对应的 ADOP 值最小,其次是方法 2,这说明相对于方法 1,方法 3 和方法 2 提高了模糊度浮点解方差阵的精度。值得注意的是,由于式(3)中 $t > 1$,而在第 1 个历元,3 种方法均采用单点定位进行坐标更新,所以 3 种方法的第 1 个历元对应的 ADOP 值

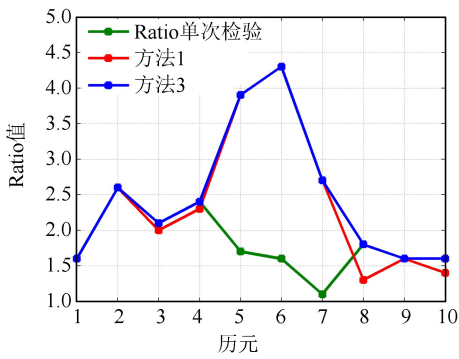


图 6 3 种方法对应的 Ratio 值(前 10 个历元)

Fig.6 Ratio Values Computed by the Three Methods (First 10 Epochs)

相等,随着多普勒速度信息被有效利用,其对应的 ADOP 值也迅速降低。

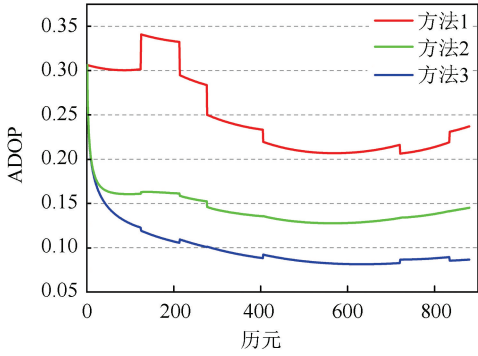


图 7 3 种方法对应的 ADOP 值

Fig.7 ADOP Values Computed by the Three Methods

表 1 统计了本次试验 3 种数据处理方法对应的模糊度解算结果。从表 1 可以看出,方法 3 对应的平均 Ratio 值最高,而平均 ADOP 值最低;相反,方法 1 对应的平均 Ratio 值最低,而平均 ADOP 值最高;方法 2 相对于方法 1 的模糊度固定率提高了 11.2%,方法 3 相对于方法 1 的模糊度固定率提高了 14.8%。

表 1 3 种方法模糊度解算结果对比

Tab.1 Comparison of Ambiguity Resolution Results Computed by the Three Methods

方法	平均 Ratio 值	平均 ADOP 值	模糊度固定率/%
方法 1	3.6	0.24	76.5
方法 2	6.1	0.14	87.7
方法 3	13.1	0.09	91.3

表 2 统计了此次试验 3 种数据处理方法对应的平均定位精度,其中 dX、dY、dZ 分别表示 3 个坐标分量的定位精度。从表 2 可以发现,方法 3 较方法 2 和方法 1 的三维坐标分量的定位精度均有所提高,进一步证明了本文提出的利用多普勒

测速信息进行坐标更新的优越性。

表 2 3 种方法平均定位精度对比/m

Tab.2 Comparison of Average Positioning Accuracies
Computed by the Three Methods/m

方法	dX	dY	dZ
方法 1	0.042 3	0.052 1	0.047 6
方法 2	0.025 2	0.032 0	0.023 4
方法 3	0.014 9	0.020 6	0.013 4

3 结 语

本文研究了多普勒测速在 GPS 单历元动态定位中的应用算法,提出了附有多普勒测速信息约束的动态定位坐标更新方法,并在此基础上给出了单历元模糊度参数求解策略。试验结果表明,本文提出的算法相对于传统无速度信息坐标约束的单历元动态定位算法,提高了模糊度浮点解精度、模糊度固定率和平均定位精度,尤其是在观测卫星数较少、PDOP 值较高的情况下更为明显。由于本文主要通过低动态环境下进行算法验证,下一步研究工作将在高动态或者较复杂的环境下进行。

参 考 文 献

[1] Chen Yongqi. Development of the Methodology for Single Epoch GPS Deformation Monitoring [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1998, 4(4):324-328(陈永奇. 单历元 GPS 变形监测数据处理方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 4(4):324-328)

[2] Teunissen P J G, Odolinski R, Odijk D. Instantaneous BeiDou + GPS RTK Positioning with High Cut-off Elevation Angles[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(4):335-350

[3] Parkins A. Increasing GNSS RTK Availability with a New Single-Epoch Batch Partial Ambiguity Resolution Algorithm[J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(4):391-402

[4] Wu Z, Bian S, Ji B, et al. Short Baseline GPS Multi-frequency Single-Epoch Precise Positioning: Utilizing a New Carrier Phase Combination Method [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3):373-384

[5] Wang L, Feng Y, Guo J. Reliability Control of Single-Epoch RTK Ambiguity Resolution [J]. *GPS*

Solutions, 2016, 21(2):1-14

[6] Chen Yuan, Yu Xingwang, Ye Congyun, et al. Analysis of Single-Point GPS Velocity Determination with Doppler [J]. *GNSS World of China*, 2008, 33(1):31-34(陈远, 于兴旺, 叶聪云, 等. GPS 多普勒观测值测速的精度分析[J]. 全球定位系统, 2008, 33(1):31-34)

[7] Xiao Yun, Sun Zhongmiao, Cheng Guangyi. Precise Determination of Velocity for Airborne Gravimetry Using the GPS Doppler Observations[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(2):113-118(肖云, 孙中苗, 程广义. 利用 GPS 多普勒观测值精确确定运动载体的速度[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(2):113-118)

[8] Kubo N, Pullen S. Instantaneous RTK Positioning Based on User Velocity Measurements [C]. The 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, 2008

[9] Kubo N. Advantage of Velocity Measurements on Instantaneous RTK Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(4):271-280

[10] Yang Yuanxi. Adaptive Navigation and Kinematic Positioning [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006(杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京:测绘出版社, 2006)

[11] Zhao S, Cui X, Guan F, et al. A Kalman Filter-Based Short Baseline RTK Algorithm for Single-Frequency Combination of GPS and BDS[J]. *Sensors*, 2014, 14(8):15 415-15 433

[12] Dai F, Mao X. BDS/GPS Dual Systems Positioning Based on Kalman Filter in Urban Canyon Environments[C]. The 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Qingdao, China, 2014

[13] Teunissen P J G. The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1-2):65-82

[14] Teunissen P J G. An Optimality Property of the Integer Least-Squares Estimator [J]. *Journal of Geodesy*, 1999, 73(11):587-593

[15] Teunissen P J G, Dennis O. Ambiguity Dilution of Precision: Definition, Properties and Application [C]. ION GPS 1997, Kansas City, MO, 1997

An Algorithm of GPS Single-Epoch Kinematic Positioning Based on Doppler Velocimetry

LI Xin¹ GUO Jiming¹ ZHANG Di¹ YANG Fei¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Due to the less prior constraint information, the ambiguity resolution and positioning performance are not very good in the GPS single-epoch kinematic positioning parameter estimation. Thus, a new method of GPS single-epoch kinematic positioning based on Doppler velocimetry is proposed in this paper. The coordinate initialization using the velocity information is firstly discussed, the current epoch’s coordinate of the moving vehicle is predicted with the priori coordinate and velocity information. Compared with the conventional method of single point positioning (SPP) coordinate initialization, it is expected to obtain higher precision, but poorer robustness as well. Thus, the corresponding strategy for single-epoch ambiguity resolution is further introduced so as to improve the positioning performance of the method in this paper. Contrasting with the conventional algorithm of GPS single-epoch kinematic positioning, the experimental results show that, the method proposed can improve the precision of the float ambiguity, the final ambiguity fixed rate and the average positioning accuracy, especially in the case that, the number of GPS satellites is not sufficient or the geometric structure of the satellites is not very good.

Key words: Doppler velocimetry; single-epoch; kinematic positioning; ambiguity resolution

First author: LI Xin, PhD, specializes in the GNSS high precision data processing. E-mail: 2011202140067@whu.edu.cn
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41474004,41604019; the Open Fund of Key Laboratory of Precise Engineering and Industry Surveying of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. PF2013-10.