

# GPS 非差相位精密单点定位技术探讨

刘经南<sup>1</sup> 叶世榕<sup>2</sup>

(1 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

(2 武汉大学 GPS 工程技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘 要:**探讨了精密单点定位的基本原理、处理方法、所涉及的误差改正及数据处理中的一些关键技术;采用直接内插 IGS 卫星精密星历的方法代替利用 IGS 跟踪站进行轨道精化方法计算卫星轨道参数,对现有精密单点定位计算方法进行了简化,使之更具有实用性。最后利用自主研发的精密非差单点定位软件计算和分析了实测数据。计算结果表明,经过大约 15min 的初始化后,非差相位单历元的定位结果精确度在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上均优于 20cm。

**关键词:** GPS; 精密单点定位; 非差相位定位

**中图法分类号:** P228.41

在过去的 10 年里, GPS 技术在大地测量领域得到广泛应用, 从全球板块地壳运动监测、区域性的高等级控制网、城市差分连续运行系统到小范围的建筑物变形监测, GPS 都扮演着重要的角色。在这些应用中, 一般都采用 GPS 相对定位的作业方式, 通过组成双差观测值消除接收机钟差、卫星钟差等公共误差及削弱对流层延迟、电离层延迟等相关性强的误差影响, 来达到提高精度的目的。这种作业方式无需考虑复杂的误差模型, 具有解算模型简单、定位精度高等优势。但也存在一些不足, 如作业时至少有一台接收机置于已知站上观测, 影响了作业效率, 提高了作业成本。另外, 随着距离的增加, 对流层延迟、电离层延迟等误差的相关性减弱, 必须相应地延长观测时间, 才能达到预期精度。是否有新的作业方式, 能克服 GPS 相对定位的这些缺点呢? 1997 年, 美国喷气推进实验室(JPL)的 Zumbeger 等人提出了一种有效的解决方案, 即非差精密单点定位方法。他们利用此方法处理单机静态观测一天的数据, 其内符合精度在水平方向为几个 mm, 高程方向为几个 cm; 处理全球动态数据的内符合精度在水平方向约为 8cm, 高程方向约为 20cm<sup>[1,2]</sup>。另外, Hatch 等人计划利用 JPL 提供的实时精密定轨定位软件, 发展一套水平方向定位精度约为 10cm 的全球实时精密定位系统(Global RTK)<sup>[3]</sup>。由于此方法可利用单台接收机在全球范围内静态或

动态独立作业, 并且直接得到高精度的 ITRF 框架坐标, 因此, 它在高精度的坐标框架维持及区域性或全球性的科学考察及低轨卫星定轨等方面都具有不可估量的前景。

## 1 精密单点定位方法

传统 GPS 单点定位是指利用伪距及广播星历的卫星轨道参数和卫星钟差改正进行定位。由于伪距(即使是 P 码伪距)的观测噪声至少也有几十 cm, 广播星历的轨道精度为几 m, 卫星钟差改正精度为几十 ns, 因此这种单点定位的坐标分量精度只能达到 10m 级(P 码单点定位精度约为 3m), 仅能满足一般的导航定位需求。而精密单点定位是先利用全球若干 IGS 跟踪站数据计算出精密卫星轨道参数和卫星钟差, 再利用所求得的卫星轨道参数和卫星钟差, 对单台接收机采集的相位和伪距观测值进行非差定位处理。

为了达到 dm 级甚至 cm 级(比传统 GPS 单点定位高数十倍甚至数百倍)的定位精度, 精密单点定位有如下关键之处: ①在定位过程中需同时采用相位和伪距观测值; ②卫星轨道精度需达到几 cm 水平; ③卫星钟差改正精度需达到亚 ns 量级; ④需考虑更精确的其他误差改正模型。根据上述分析, 精密单点定位需解决如何确定非差相位整周模糊度、高精度的卫星轨道确定及高精度

的卫星钟差改正估计等问题。由于精密卫星钟差改正估计问题较为复杂,笔者将另文阐述。另外,IGS 目前提供的卫星精密星历精度为 35cm,精密单点定位可采用直接内插 IGS 卫星精密星历的方法得到卫星轨道参数,然后利用它与若干个 IGS 跟踪站数据进行卫星钟差估计,再进行非差精密单点定位。此方法既避免了复杂的定轨计算,又可以很方便地估计所需采样率的卫星钟差(仅受 IGS 跟踪站数据采样率的限制),因此有更强的实际应用价值。

1.1 数学模型

在精密单点定位中,本文方法是利用钟差估计值消去卫星钟差项,并且采用双频观测值消除了电离层影响,其观测值误差方程如下:

$$v_p^j(i) = \rho^j(i) + c \cdot \delta(i) + \Phi_{trop}^j(i) - P^j(i) + \epsilon_p \tag{1}$$

$$v_\Phi^j(i) = \rho^j(i) + c \cdot \delta(i) + \Phi_{trop}^j(i) + \lambda \cdot N^j(i) - \lambda \cdot \Phi(i) + \epsilon_\Phi \tag{2}$$

式中,  $j$  为卫星号;  $i$  为相应的观测历元;  $c$  为真空中光速;  $\delta(i)$  为接收机钟差;  $\Phi_{trop}^j$  为对流层延迟影响;  $\epsilon_p$ 、 $\epsilon_\Phi$  为多路径、观测噪声等未模型化的误差影响;  $P^j(i)$ 、 $\Phi(i)$  为相应卫星  $i$  历元的消除了电离层影响的组合观测值,而  $v_p^j(i)$ 、 $v_\Phi^j(i)$  为其观测误差,  $\lambda$  为相应的波长;  $\rho^j(i)$  为信号发射时刻的卫星位置到信号接收时刻接收机位置之间的几何距离;  $N^j(i)$  为消除电离层影响的组合观测值的整周未知数。

将式(1)、式(2)线性化得:

$$V(i) = AX(i) + L(i) \tag{3}$$

$$X(i) = [x \ y \ z \ \delta \ \Phi_{trop} \ N^j]^T \tag{4}$$

式中,  $A$  为相应的设计矩阵;  $L(i)$  为相应的观测值减去概略理论计算值得到的常数项;  $X(i)$  为待估计参数;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为三维位置参数;  $\delta$  为接收机钟差参数;  $\Phi_{trop}^j$  为对流层延迟参数;  $N^j$  为整周未知数参数,  $j=1, 2, \dots, n$ 。

在解算时,位置参数在静态情况下可以作为常未知数处理;在未发生周跳或修复周跳的情况下,整周未知数当作常数处理;在发生周跳的情况下,整周未知数当作一个新的常数参数进行处理。由于接收机钟较不稳定,且存在着明显的随机抖动,因此将接收机钟差参数当作白噪声处理;而对流层影响变化较为平缓,可以先利用 Saastamoen 或其他模型改正,再利用随机游走的方法估计其残余影响。单历元数据可以采用最小二乘法解算得到最后结果,多个历元数据可以采用序贯最小

二乘法或卡尔曼滤波的方法进行解算。

1.2 精密单点定位的误差改正

在精密单点定位中,除了考虑电离层、对流层等误差影响外,还要考虑卫星天线相位中心偏差、固体潮、海洋负荷的影响。

1.2.1 卫星天线相位中心偏差改正

由于 GPS 卫星定轨时利用的力模型都是对应卫星质心的,因此在 IGS 精密星历中卫星坐标及卫星钟差都是相应于卫星质心而不是相应于卫星天线相位中心的,而 GPS 观测值是相应于卫星天线相位中心和接收机天线相位中心的。一般来说,卫星天线相位中心与卫星质心并不重合,在精密单点定位中,不能利用差分的方法消除或减弱其影响,因此必须考虑其改正模型。在星固系中,卫星相位中心相对于卫星质心的偏差如表 1 所示。

表 1 星固系中卫星天线相位偏差/ m  
Tab. 1 The Satellites' Antenna Phase Center  
Offset in Satellite Fixed Reference Frame/ m

卫星类型	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$
Block II/ IIA	0.279	0.000	1.023
Block IIR	0.000	0.000	0.000

1.2.2 固体潮改正

固体潮与海洋潮汐产生的原因相同。天体(太阳、月球)对弹性地球的引力作用,使地球固体表面产生周期性的涨落,且使地球在地心与天体的连线方向上拉长,在与连线垂直方向上趋于扁平,由和纬度相关的长期项与周期分别为 0.5d 和 1d 的周期项组成。在 GPS 双差相对定位中,对于短基线(< 100km)其影响可以不考虑,对于数千 km 的长基线,有几 cm 的误差,精密处理中需要考虑。对于精密非差单点定位,由于不能利用站间差分的方法消除,其影响在径向大约有 30cm,在水平方向约有 5cm<sup>[4]</sup>,必须利用模型加以改正。

1.2.3 海洋负荷改正

海洋负荷对精密单点定位的影响结果与固体潮的一致,但比固体潮小一个量级。海洋负荷主要由日周期与半日周期部分组成。对于单历元,定位精度要求亚 m 级或 24h 观测时间的 cm 级静态定位,可以不考虑海洋负荷的影响。对于亚 m 级动态定位或观测时间短于 24h 的 cm 级静态定位,必须顾及海洋负荷的影响,除非测站远离海岸线(> 1 000km)<sup>[4]</sup>。

2 计算及结果分析

2.1 数据处理方法

精密单点定位计算过程主要分如下几个步骤:①为了方便计算,将精密星历拟合成多项式形式;②精密星历每 15min 给定一个卫星钟差值,这个间隔不能满足精密单点定位要求,又由于卫星钟差的变化较快而不能直接以 30s 为间隔对其进行线性内插,必须利用多个 IGS 跟踪站 GPS 观测数据与精密星历估计得到 30s 历元间隔的卫星钟差;③利用拟合的轨道多项式及卫星钟差与用户站观测数据一起进行精密单点定位计算。

2.2 数据预处理

在精密单点定位中,必须先进行清除周跳和相位平滑伪距等数据预处理工作,以得到高质量的非差相位和伪距观测值。

2.2.1 组合观测值修复周跳

在精密单点定位中,清除非差 GPS 观测数据

中的周跳是一项重要的工作。由于非差单点定位只有单站数据能利用,无法组成双差或三差观测值,一般消除周跳的方法如三差法、多项式拟合法并不适用。而 Blewitt 提出的利用双频双 P 码组合观测值修复周跳的方法很适合清除非差周跳<sup>[3]</sup>。

用于清除非差周跳的 GPS 观测值线性组合有以下几种。

1) Melbourne-Wübbena 组合:

$$L_6(i) = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1(i) - f_2 L_2(i)) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1(i) + f_2 P_2(i)) \quad (5)$$

$$b_6(i) = L_6(i)(f_1 - f_2)/c \quad (6)$$

式中,  $L_1$ 、 $L_2$  为载波相位观测值,  $L_1 = \lambda_1 \cdot \Phi_1$ ,  $L_2 = \lambda_2 \cdot \Phi_2$ ;  $i$  为历元序号;  $f_1$ 、 $f_2$  分别为  $L_1$ 、 $L_2$  的频率;  $P_1$ 、 $P_2$  分别为 P 码伪距观测值;  $b_6$  为宽巷整周模糊度。

2) Geometry-free 组合:

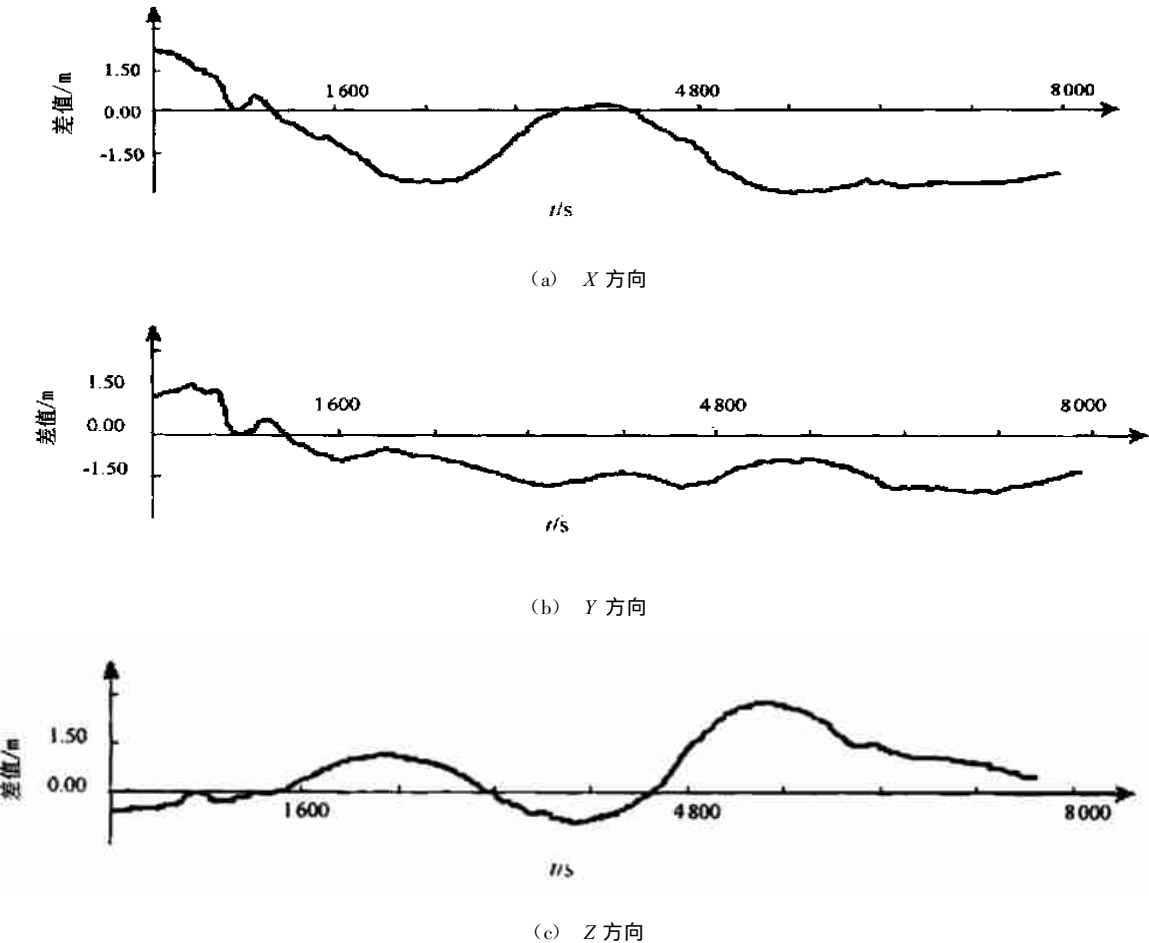


图 1 相位平滑伪距计算的结果与已知坐标在 X、Y、Z 方向上的差值  
Fig. 1 The Differences in X, Y, Z Components between the Results Computed with Smoothed Code Observations and ITRF Coordinates

$$L_4(i) = L_1(i) - L_2(i) = I + \lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2 \tag{7}$$

$$P_4(i) = P_1(i) - P_2(i) \tag{8}$$

式中,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为  $L_1$ 、 $L_2$  的波长;  $n_1$ 、 $n_2$  分别为  $L_1$ 、 $L_2$  的整周模糊度。

Melbourne-Wübbena 组合消除了电离层、对流层、钟差和计算的几何观测值的影响, 而且具有较长的波长、较小的量测噪声等特点, 因此适用于非差周跳的探测和修复。如果 Melbourne-Wübbena 的 RMS 小于 0.5 宽巷波长 (43cm), 利用它几乎可以确定所有的宽巷周跳。在实际计算中, 采用递推的方法计算每一历元  $b_6$  值及其残差误差  $\sigma$ :

$$\langle b_6 \rangle_i = \langle b_6 \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} (b_6(i) - \langle b_6 \rangle_{i-1}) \tag{9}$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} \left\{ \left( b_6(i) - \langle b_6 \rangle_{i-1} \right)^2 - \sigma_{i-1}^2 \right\} \tag{10}$$

比较相邻历元  $b_6$  值及其残差误差  $\sigma$ , 可以判断是否发生周跳。若发生周跳, 则标记出发生周跳的历元, 把此历元之前的数据作为一个数据弧段, 并计算其  $b_6$  均值及其残差误差  $\sigma$ , 从下一个历元重新开始计算探测周跳, 重复上述工作直到数据结束。弧段与弧段的周跳大小  $\Delta b_6$  可以由两段之间的均值求得, 并且  $\Delta b_6$  与  $L_1$  和  $L_2$  周跳具有如下关系:

$$\Delta b_6 = \Delta n_1 - \Delta n_2 \tag{11}$$

式中,  $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$  分别表示  $L_1$  和  $L_2$  周跳。

在完成利用 Melbourne-Wübbena 组合观测值确定所有宽巷周跳  $\Delta b_6$  后, 可以利用电离层变化的平滑性特点, 采用 Geometry-free 组合修复窄巷周跳的大小。一般是取宽巷周跳发生前的  $N$  个历元数据拟合一个多项式, 再取周跳发生后的  $N$  个历元数据拟合另一个多项式, 两个多项式在周跳发生历元时刻的差值可认为是窄巷周跳的大小, 即可确定  $\lambda_1 \Delta n_1 - \lambda_2 \Delta n_2$  的大小。再利用

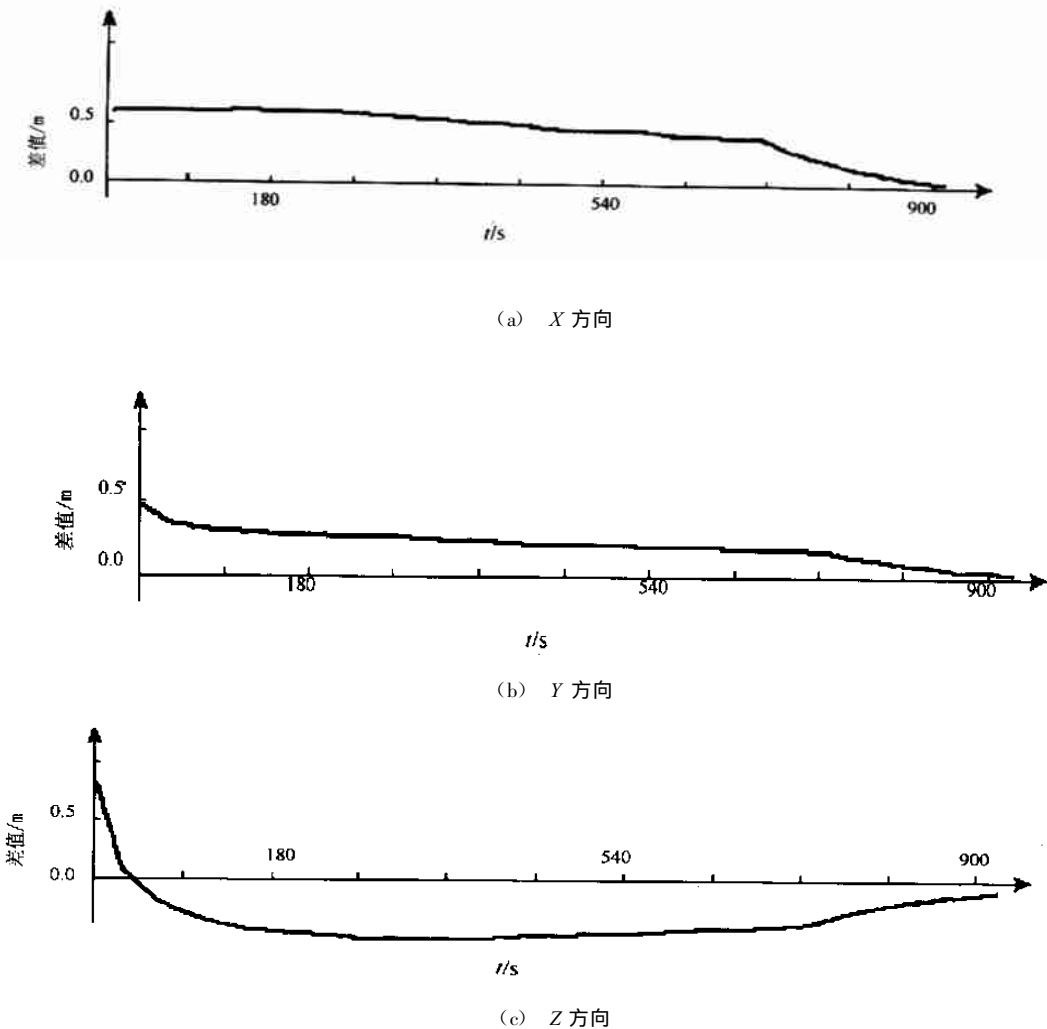


图 2 初始阶段非差相位观测值计算结果与已知坐标在 X、Y、Z 方向上的差值

式(11),可求出  $\Delta n_1, \Delta n_2$  的值。

2.2.2 利用双频观测值消除电离层延迟

一般的电离层模型改正精度只有 dm 级,不能满足非差精密定位的要求。另外,利用站间差分消除或减弱电离层影响的方法也不适用于非差定位。由于进行精密单点定位作业一般都采用双 P 码双频接收机,故可利用双频观测值消除电离层延迟,其改正精度可达 cm 级。

2.2.3 相位平滑伪距观测值

伪距作为辅助观测值,在精密单点定位初始阶段仍然起主要作用,伪距观测值质量的好坏将对初始化时间、非差整周模糊度的确定产生影响。因此,为提高伪距观测的精度,一般利用已清除了周跳的消除电离层延迟影响的相位观测数据对伪距进行平滑。

2.3 结果分析

在实例计算中,采用 IGS 精密星历,利用笔

者开发的精密单点定位软件处理了位于美国夏威夷的 IGS 跟踪站 KOKB 站 2000 年 226d 的数据。单点定位计算的观测值可采用伪距、相位平滑伪距和非差相位等多类观测值。为了比较利用不同观测值进行精密单点定位的结果,实例分别采用相位平滑伪距和非差相位观测值进行计算。利用非差相位进行精密单点计算时,为了能够更快地确定相位整周模糊度,仍然将伪距作为辅助观测值参与处理,只是非差相位观测值赋予较高的权,伪距观测值赋予较低的权。取 P 码伪距的观测噪声为 1m,相位观测值的观测噪声为 0.01 周。为了便于分析,将 IGS 公布的高精度 ITRF 坐标作为已知值,分别将不同观测值的定位结果与已知值进行比较。图 1 表示利用相位平滑伪距观测值计算的结果与测站已知坐标在 X、Y、Z 方向上的差值;图 2 表示初始阶段利用非差相位观测值计算的结果与测站已知坐标在 X、Y、

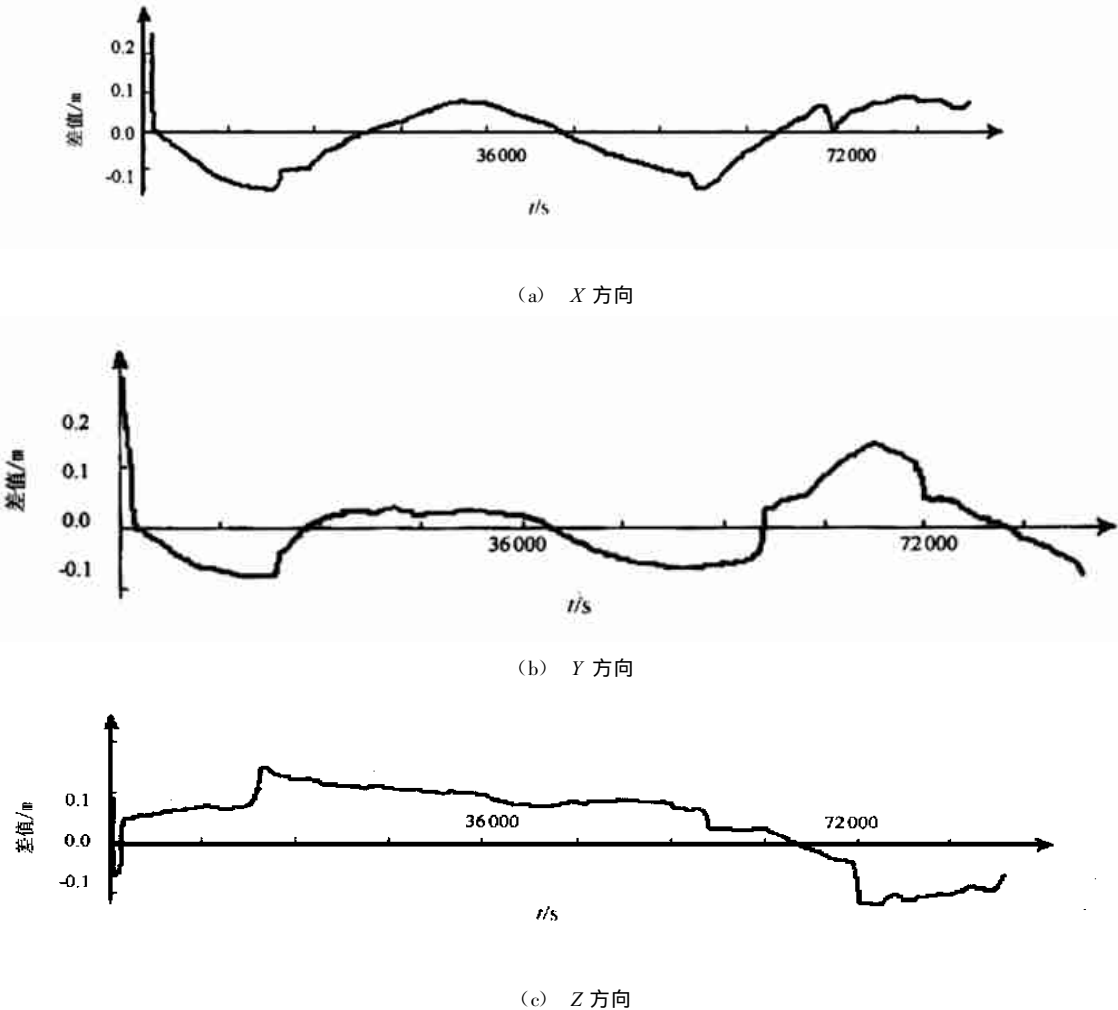


图 3 单历元非差相位观测值计算结果与已知坐标在 X、Y、Z 方向上的差值

Fig. 3 The Differences in X, Y, Z Component of the Results Computed with Undifferenced

Phase Observations and ITRF Coordinates

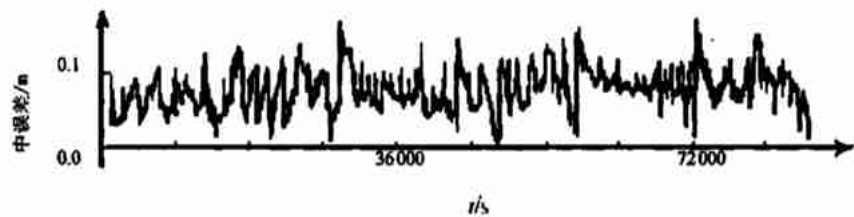


图 4 单历元非差相位观测值计算结果的残差中误差

Fig. 4 The RMS of the Results Computed with Undifferenced Phase Observations

Z 方向上的差值;图 3 表示利用非差相位观测值计算的单历元结果与测站已知坐标在 X、Y、Z 方向上的差值。

分析图 1 中的结果可以得出,利用相位平滑伪距观测值定位的精度只能达到 m 级,显然不能满足较高精度的应用需求,但是利用它能确定非差相位整周模糊度的初始值。而利用非差相位观测值定位,在初始阶段,由于相位的整周未知数无法确定,定位结果很大程度上依靠伪距观测值的质量,精度较差。但随着观测数据的不断增多,可以较准确地确定整周未知数,定位的精度也显著提高。目前,以笔者的算法和软件,非差相位精密单点定位的初始化时间约为 15min。初始化完成后,单历元定位结果的精度较稳定,定位结果与已知坐标在 X、Y、Z 方向的差均小于 20cm,与已知坐标 X、Y、Z 方向及点位的最大差值分别为 0.158m、0.174m、0.167m。分析图 4 可得,单历元定位的残差中误差在绝大部分时间均小于 20cm。由图3结果可知,单历元的解算结果中仍然存在系统性的偏差,其原因可能是误差改正模型不够精确。对于静态情况,可以通过延长观测时间的办法部分地消除其影响,达到提高定位精度的效果。在今后的研究工作中,将精化其误差改正模型,以得到更好的定位结果。

3 结论与建议

利用本文描述的相位非差精密单点定位方法,单台双频双 P 码接收机即可在全球范围内进行精密定位。与 GPS 相对测量相比,此方法具有不受观测时间、观测距离限制的优点。可以预见,相位非差单点精密定位是将来 GPS 定位发展的

一个重要方向,具有极大的应用潜力。实验结果表明,当初始化完成后,其单历元的静态定位精度在 X、Y、Z 方向均可优于 20cm,这一精度与国际同类研究相比是一致和相当的。由于目前所考虑的误差模型不够精确,可能会给结果带来系统性误差。在今后的工作中还必须对各类误差模型进一步精化,消除其影响。另外,相对于静态定位,动态定位的观测模型及随机模型更复杂,而动态的精密单点定位技术也更具有应用价值(例如低轨卫星的定轨),因此,动态的精密单点定位技术将是以后研究的主要内容。

参 考 文 献

1 Zumbege J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B3): 5 005~5 017

2 Zumbege J F, Watkins M M, Webb F H. Characteristics and Application of Precise GPS Clock Solution Every 30 Seconds. *Navigation*, 1998, 44(4): 449~456

3 Hatch R. Satellite Navigation Accuracy: Past, Present and Future. *Proceeding of the 8th GNSS Workshop Korea*, 2001

4 Heroux P, Kouba J, Collins P, et al. GPS Carrier-phase Point Positioning with Precise Orbit Products. *The International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, Calgary, 2001

5 Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199~202

作者简介: 刘经南, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。主要从事空间大地测量和地球动力学研究。代表成果: 国家高精度 GPS 数据处理理论与方案; GPS 卫星定位处理综合软件; WADGPS 数据处理软件; 青藏高原地壳运动与形变的 GPS 研究等。

E-mail: jnliu@wtusm.edu.cn

# GPS Precise Point Positioning Using Undifferenced Phase Observation

LIU Jingnan<sup>1</sup> YE Shirong<sup>2</sup>

(1 Presidential Secretariat, Wuhan University, Luoja Hill, Wuhan, China, 430079)

(2 GPS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

**Abstract:** To overcome these shortcomings in differential GPS positioning, a new technique called precise point positioning (PPP) has been developed. In this approach, the IGS precise orbits and satellite clocks are used together with the undifferenced dual-frequency pseudorange and carrier phase observations of one single receiver for precise geodetic point positioning. It provides a very efficient tool to access the terrestrial reference frame or LEO's orbit determination. Also it is the key technique to realize the Global RTK and the internet-based differential GPS positioning in the future. This paper describes the approach of PPP in detail, and then discusses some problems in data processing. Finally, it analyzes the experimental results, which show that the initial time of PPP is about 15 minutes and the accuracy of single epoch positioning can be better than 20cm in  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  components after initialization.

**Key words:** GPS; precise point positioning (PPP); undifferenced carrier phase positioning

**About the author:** LIU Jingnan, professor, Ph. D supervisor, member of the Chinese Academy of Engineering. His major research orientations include space geodesy and geodynamics. His typical achievements are the theory and scheme high precision GPS data processing in China; the comprehensive software of GPS satellite positioning processing; the software of WADGPS data processing; the crustal movement and deformation of Qingzang Plateau using GPS etc.

E-mail: jnliu@wtusm.edu.cn

## 《武汉大学学报·信息科学版》征稿简则

本刊是由武汉大学主办、国内外公开发行的专业学术期刊,SCI、EI、PJK 等国际著名检索系统均收录本刊发表的论文。为进一步提高刊登论文的代表性,发挥本刊在国内外的学术辐射优势,特面向国内外公开征稿。

1. 稿件内容:本刊主要刊登有关摄影测量、遥感、大地测量、工程测量、地图学、物理大地测量、地球动力学、图形图像学、地理信息系统、测绘仪器、计算机理论及应用、光电工程、通讯技术及电子信息工程、资源与环境等相关学科的学术论文,稿件要求具有较高的学术水平或重大应用价值。所有来稿文责自负。

2. 稿件要求:来稿应符合科技论文著作要求,论点明确,论证严谨,内容创新,数据可靠,方法科学,文字通达、简洁,字数一般在 8 000 字以内。来稿应采用法定计量单位,采用国家有关出版标准,附 300 字以内的中文摘要和 1 000 单词左右的英文摘要,并附有中英文关键词。摘要要有自含性,要能反映论文的核心内容。作者署名应符合著作权法规定,并附第一作者简介(中英文)、E-mail、通讯方式及所有作者的详细地址(中英文)。基金资助论文应注明基金名称、项目编号。

3. 投稿要求:所有来稿应书写工整,交磁盘者(应转为纯文本格式)同时附打印稿;图表、公式应清楚,易混淆的字符应注明;所附照片应符合制版要求;参考文献著录内容齐全,格式符合有关标准,并按引用的先后顺序于文中标出;不准一稿两投。一经投稿,视为作者授权编辑部可作不影响作者论点的必要文字加工。

4. 鉴于本刊已整体加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中文科技期刊数据库》及入网“万方数据(ChinaInfo)系统科技期刊群”,若无特别声明,所有投稿视为作者同意在本刊出版印刷版的同时授权出版光盘版及进入因特网。

5. 来稿经本刊组织的同行专家评议、审查同意刊登后,将酌收版面费。一经刊用,即付稿酬。来稿一般不退。对于投稿三个月后无答复的稿件,作者可以查询。

6. 本刊编辑部地址:武汉市珞喻路 129 号,武汉大学(测绘校区)本刊编辑部,邮编 430079,电话(027)87885922 转 2465。

E-mail: journal@wtusm.edu.cn;

http://www.wtusm.edu.cn; http://chinainfo.gov.cn/periodical