文章编号:1006-544X(2004)03-0340-05

GPS 非差相位精密单点定位技术的发展

刘智敏[1,2], 林文介[1]

(1. 桂林工学院 土木工程系, 广西 桂林 541004; 2. 武汉大学 GPS 工程技术研究中心, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 论述了非差相位精密单点定位的原理、方法, 讨论了非差相位精密单点定位及其数据处理过程中的误差改正、数据预处理方法. 展望了非差相位精密单点定位的应用: 利用单台双频 GPS 接收机在全球范围内进行静态或动态作业, 可直接得到高精度的 ITRF 框架坐标, 对高精度动态导航定位及低轨卫星的定轨等具有重大意义.

关键词: GPS 定位技术; 单点定位; 非差相位精密单点定位

中图分类号: P228.4 **文献标识码:** A①

1 问题的提出

GPS 技术以其可在全球范围内实现全天候、连续、实时的三维导航、定位、测时、测速的特点, 在大地测量领域得到广泛应用, 其作业方式主要是差分 GPS (Differential GPS, 简称 DGPS), 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, 削弱对流层延迟、电离层延迟等相关性强的误差影响, 从而达到提高精度的目的. 这种方式不需考虑复杂的误差模型, 解算模型简单、待估参数少、定位精度高, 同时利用了双差模糊度的整数特征, 因而得到广泛使用. 其不足之处在于: 作业时需至少一台接收机置于基准站上连续观测, 影响了作业效率, 提高了作业成本; 随着用户站与基准站距离的增加, 对流层延迟、电离层延迟等误差的相关性减弱, 为达到预期精度, 必须相应延长观测时间; 双差观测值本身存在数学相关, 相互独立的双差观测值较难组成, 难以进行质量控制; 双差残差包括 4 个观测值的共同影响等.

而传统 GPS 单点定位, 是由广播星历采用距离交会法来解算接收机天线所在点的三维坐标, 又称伪距法单点定位. 其优点是数据采集和数据处理简单, 定位速度快, 用户在任一时刻只需用 1 台 GPS 接收机就能获得测点在 WGS-84 坐标系中的三维坐标. 但由于伪距观测值的精度一般为数分米至数米, 用广播星历所求得的卫星位置的误差可达数米至几十米, 卫星钟改正数的误差为 ± 20 ns 左右, 伪距定位精度使用 P 码时约为 6 m, 使用 C/A 码时约为 20~30 m, 只能用于导航定位及资源调查、勘探等一些低精度领域中.

随着目前 IGS 所提供的精密星历精度已优于 5 cm, 卫星钟钟差改正数已达到 0.1~0.2 ns, 以及接收机性能的不断改善, 大气延迟改正模型和改正方法的研究也在不断深入. 1997 年, Zumbeger J F 等人提出了利用高精度的 GPS 精密星历、卫星钟钟差和双频载波相位观测量, 采用非差模型进行精密单点定位 (Un-differenced Precise Point Positioning, 简称 PPP) 的方法. 其单天解的精度在水平方向和垂直方向分别为 1 cm 和 2 cm[1,2]. 随后, JPL 的 Muellerschoen 等人提出利用非差双频载波相位观测值, 在初始化后进行单历元精密单点定位. 以实现全球范围内的实时动态定位, 试验结果表明, 平面位置的定位精度为 ± (10~20)

① **收稿日期:** 2003-12-25

基金项目: 广西区科技攻关项目 (桂科攻 0330008-7)

作者简介: 刘智敏 (1975-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向: GPS 原理、算法及应用.

cm. 2001 年 Hatch 提出利用 JPL 实时定轨软件实现全球 RTK 的计划，即利用单台接收机以平面坐标精度 ±10 cm 的标准独立地在全球范围内静态或动态作业，直接得到高精度的国际地球参考架（ITRF）框架坐标. 文献［3］提出了改进模型并用自行研制的定位软件进行试算，单天解的精度在纬度方向（B）优于 1 cm，经度方向（L）优于 2 cm，垂直方向（H）优于 3 cm. 动态定位初始化时间约为 15 min，此后单历元解的精度在 B,L,H 方向均优于 20 cm. 利用 GPS 精密预报星历和实时估计的卫星钟差进行实时动态定位时，其精度为 40 cm 左右.

非差定位模式和其他差分模式相比具有很多优点：可用观测值多，保留了所有观测信息，能直接得到测站坐标，并且各个测站的观测值不相关，有利于质量控制，测站与测站之间无距离限制等，是目前 GPS 研究的热点.

2　非差相位精密单点定位方法

2.1　精密单点定位（PPP）的思路

精密单点定位（PPP）的思路是先利用全球若干 IGS 跟踪站的 GPS 观测数据计算出精密卫星轨道参数和卫星钟差，然后以此为基础对单台接收机采集的相位或伪距观测值进行非差定位处理. 其主要计算过程：将精密星历拟合成轨道多项式；利用拟合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. 因精密星历每 15 min 给定一个卫星钟差值，这个间隔不能满足 PPP 要求，加上卫星钟差的变化较快而不能直接以 30 s 为间隔进行线性内插，因此必须利用多个 IGS 跟踪站 GPS 观测数据与精密星历来得到 30 s 历元间隔的卫星钟差. PPP 定位要求卫星轨道精度需达到 cm 级水平，卫星钟差改正精度需达到亚 ns 级水平.

为了达到 dm 级甚至 cm 级的定位精度，精密单点定位要处理以下几个关键问题：

①需考虑精确的误差改正模型，使其精度达 cm 级；

②正确剔除粗差、修复周跳；

③利用双频载波相位平滑伪距来提高精度，其质量的好坏直接影响到 PPP 的初始化时间、非差模糊度的确定问题.

2.2　PPP 的数学模型

在精密单点定位中，采用双频观测值消除了电离层影响，利用卫星钟差估计值消去卫星钟差项，GPS 卫星坐标可以用精密星历计算出来. 设用户站坐标的近似初始值为 $\gamma_{i,0}$，参数估值 $\hat{\gamma}_{i,0} = \gamma_{i,0} + \Delta\gamma_i$，$\Delta\gamma_i$ 为相应的修正量，计算出的接收机近似钟差为 $\delta t^0_{i,\mathrm{L}}$，$\delta t_{i,\mathrm{L}} = \delta t^0_{i,\mathrm{L}} + \Delta\delta t_{i,\mathrm{L}}$，将其围绕用户站初始坐标值线性化，并略去高次项，得到：

$$\Delta\Phi^j_{i,\mathrm{L}}(t_i) = \frac{\partial\rho^j_{i,\mathrm{L}}}{\partial r_i}\Big|_{r_i=r_{i,0}}\Delta\gamma_i + c\cdot\Delta\delta t_{i,\mathrm{L}} - c\delta t^{j,\mathrm{L}} + T^j_i + \lambda N^j_{i,\mathrm{L}} + M^j_{i,\mathrm{L}} + \varepsilon_{\varphi^j_{i,\mathrm{L}}}; \quad (1)$$

$$\Delta P^j_{i,\mathrm{P}}(t_i) = \frac{\partial\rho^j_{i,\mathrm{P}}}{\partial r_i}\Big|_{r_i=r_{i,0}}\Delta\gamma_i + c\cdot\Delta\delta t_{i,\mathrm{P}} - c\delta t^{j,\mathrm{P}} + T^j_i + M^j_{i,\mathrm{P}} + \varepsilon_{\varphi^j_{i,\mathrm{P}}}. \quad (2)$$

式中，$\Delta\Phi^j_{i,\mathrm{L}}(t_i)$ 和 $\Delta P^j_{i,\mathrm{P}}(t_i)$ 分别为在 t_i 时刻的载波相位观测值或伪距观测的观测值减计算值（OMC）；等式右边第二项开始分别是载波相位观测或伪距观测的接收机钟差改正、卫星钟差、对流层效应，最后两项是多路径效应和观测误差及其它残差，$N^j_{i,\mathrm{L}}$ 是载波相位观测的整数模糊度，c 为真空中的光速.

2.3　PPP 的误差改正

不同于双差定位模式，非差观测模型是描述非差观测值与其他物理影响因素的函数关系，因此需精确估计 3 类误差源的影响：①与测站相关；②与卫星相关；③与信号传播路径相关. 这些误差可利用各种精确模型计算改正.

2.3.1　*与测站相关的误差改正*　①接收机钟差. 以接收机钟差及其变化量作为待定参数，并认为各历元之间是相互独立的，看成一种白噪声，和测站位置、速度一起进行估计计算. 这种处理方法较简单，也可采用随机游走方法进行处理.

②地球固体潮改正. 在月球和太阳的万有引力作用下，弹性地球表面将产生周期性的变化. 地球固体潮改正由和纬度相关的长期项与周期项组成，分别为 0.5 d 和 1 d 的周期项. PPP 不能利用 DGPS 站间差分的方法消除周期性误差，即使可用单天解基本消除，但残差影响在水平方向上仍达 5 cm，在垂直方向可达 12 cm，必须利用模型加以改正. 其改正模型

$$\Delta\rho_{\mathrm{solid}} = \sum_{j=1}^{2}\frac{GM_j}{GM}\frac{r^4}{R_j^3}\{[3l_2(\hat{\boldsymbol{R}}_j\cdot\hat{\boldsymbol{r}})]\hat{\boldsymbol{R}}_j + [3(\frac{h_2}{2}-l_2)(\hat{\boldsymbol{R}}_j\cdot\hat{\boldsymbol{r}})^2 - \frac{h_2}{2}]\hat{\boldsymbol{r}}\} + [-0.025\sin\varphi\cos\varphi\sin(\theta_g+\lambda)]\hat{\boldsymbol{r}}. \quad (3)$$

式中：GM_j 为万有引力常数 G 和摄动天体($j=1$ 表示月球，$j=2$ 表示太阳）质量 M_j 之乘积；GM 为万有引力常数 G 和地球质量 M 之乘积，为常数 $3.986\,005\times10^{14}\,\mathrm{m^3/s^2}$；$r$ 为地球半径；$\hat{\boldsymbol{R}}_j$ 为摄动天体在地心坐标系中的位置向量；$\hat{\boldsymbol{r}}$ 为地心坐标系中的测站位置向量，h_2 为第二 Shida 数，l_2 为第二勒夫数，一般取 $h_2=0.609\,0$，$l_2=0.085\,2$.

③海洋潮汐改正. 比固体潮改正小一个数量级，在精密单点定位单天解中，其影响为 mm 级，当测站离海岸线大于 1 000 km 时，其影响可忽略不计；对单历元解的影响则可达 5 cm. 故单历元 PPP 要用海洋潮汐改正模型

$$\Delta\boldsymbol{R}_{\mathrm{oc}}=\sum_{i=1}^{N}\begin{bmatrix}A_i^{\mathrm{r}}\cos(\omega_{it}+\varphi_i-\delta_i^{\mathrm{r}})\\A_i^{\mathrm{EW}}\cos(\omega_{it}+\varphi_i-\delta_i^{\mathrm{EW}})\\A_i^{\mathrm{NS}}\cos(\omega_{it}+\varphi_i-\delta_i^{\mathrm{NS}})\end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中：$(A_i^{\mathrm{r}},A_i^{\mathrm{EW}},A_i^{\mathrm{NS}})$ 是由各潮波的海潮图和格林函数计算得一测站在潮波经向、东西和南北向的幅度；ω_i 和 φ_i 是分潮波的频率和历元时刻的天文幅角，$(\delta_i^{\mathrm{r}},\delta_i^{\mathrm{EW}},\delta_i^{\mathrm{NS}})$ 是相对于格林子午线的相位滞后；t 是以秒计的世界时，N 为阶数，目前仅考虑到 11 阶.

④ 地球旋转改正. 地固系是非惯性系，随地球自转而旋转. 在地固系中若要求达到 cm 级定位精度就要考虑到地球旋转参数改正. 由测站坐标(X_{R}，Y_{R}，Z_{R})，卫星坐标(X_{S}，Y_{S}，Z_{S})，地球自转角速度 ω，得到地球自转引起的距离改正为

$$\Delta\rho_{\mathrm{earth}}=\frac{\omega}{c}[Y_{\mathrm{S}}(X_{\mathrm{R}}-X_{\mathrm{S}})-X_{\mathrm{S}}(Y_{\mathrm{R}}-Y_{\mathrm{S}})]. \quad (5)$$

2.3.2 与卫星相关的误差改正 ①卫星钟差改正. 信号发射时刻 t_{S} 的卫星钟钟差 δt_{S} 一般可用下式表示

$$\delta t_{\mathrm{S}}=\alpha_0+\alpha_1(t_{\mathrm{S}}-t_0)+\alpha_2(t_{\mathrm{S}}-t_0)^2+\int_{t_0}^{t_{\mathrm{S}}}y(t)\,\mathrm{d}t. \quad (6)$$

式中：α_0 为参考时刻 t_0 时的卫星钟差；α_1 为参考时刻 t_0 时的卫星钟速；α_2 为参考时刻 t_0 时的卫星钟漂移率；$\int_{t_0}^{t_{\mathrm{S}}}y(t)\,\mathrm{d}t$ 是由于频率的随机误差而引起的一种随机钟差，只能通过钟的稳定度来描述其统计特性，无法知道其具体数值. (6) 式适用于广播星历计算卫星钟差，计算得到的卫星钟差无法满足非差相位精密单点定位的精度要求. IGS 站分析中心提供了时间间隔为 15 min 的卫星钟差，动态用户的采样间隔一般为 1 s 甚至更小，直接内插无法满足精度要求. 为此，文献［3］提出了在非差相位精密单点定位基准站上利用相对卫星钟差的概念，基准站数据分析中心将所计算的 1 s 更新率的精密相对卫星钟差传输给用户站，用户站利用这些高采样率的精密卫星钟差进行非差实时精密单点定位，定位结果可以满足精度要求.

②卫星轨道误差. 利用广播星历计算得到卫星轨道精度大约为 10 m，无法满足 PPP 的精度要求. 基准站数据分析中心根据 IGS 实时预报精密星历的轨道误差只有 25 ~ 40 cm，可以满足实时 PPP 的 0.5 m 以内的定位精度要求，而事后精密星历的精度可以达到 3 ~ 5 cm.

③相对论效应. 由于卫星和接收机所在位置的地球引力位不同，以及卫星和接收机在惯性空间中的运动速度不同，导致卫星钟频率产生视漂移. 在 GPS 卫星发射前，已有意将卫星钟基准频率调低 0.004 55 Hz 来解决相对论效应中的频率偏差，其非常数部分可采用下式进行改正

$$\delta\rho_{\mathrm{rel}}=-\frac{2}{c}\boldsymbol{X}_{\mathrm{S}}\cdot\dot{\boldsymbol{X}}_S. \quad (7)$$

$\boldsymbol{X}_{\mathrm{S}}$ 和 $\dot{\boldsymbol{X}}_S$ 分别代表卫星的位置向量和速度向量.

④卫星天线相位中心偏差. 卫星轨道模型是针对于卫星质心而言的，IGS 提供的精密星历和精密卫星钟差是相对于卫星质心的，而广播星历和观测量是相对于卫星天线相位中心的. 非差精密单点定位需要预先知道卫星天线相位中心改正和改正向量在卫星围绕地球旋转空间中的旋转量.

表 1 星固系中卫星天线相位偏差

Table 1 Satellites′antenna phase center offset in satellite fixed reference frame m

卫星型号	δX	δY	δZ
Block II/IIA	0.279	0.000	1.023
Block IIR	0.000	0.000	0.000

⑤天线相位缠绕改正. 卫星的天线会随着太阳能板对太阳的朝向变化产生一个很缓慢的旋转，使得卫星和测站的几何关系发生改变. 在日食和月食的时候，卫星会发生快速的旋转，太阳能板为了调节对太阳朝向产生旋转，使得卫星天线也产生旋转，在正午和午夜的时候，达到 30 min 内一圈的旋转量，对于波长的影响最大可以达到一个波长，这个时候就必须考虑对相位观测值进行

改正，或加以简单的剔除.

2.3.3　与信号传播路径相关的误差改正　①对流层延迟. 当 GPS 卫星在天顶方向运行时，对流层偏差距离为 2.3 m 左右. 该项由干、湿分量组成，常用天顶方向的干、湿分量和相应的映射函数表示对流层改正：

$$\Delta\rho_{\mathrm{trop}} = \Delta D_{Z,\mathrm{dry}} M_{\mathrm{dry}}(E) + \Delta D_{Z,\mathrm{wet}} M_{\mathrm{wet}}(E). \quad (8)$$

在 GPS 定位系统中对流层改正的计算模型有 Hopfield 模型、Saastamoinen 模型和 Black 模型等. 常用的投影函数有 Marini 模型、Chao 模型、Davis 模型和 Niell 模型等. Niell 模型是高精度 GPS 定位中广泛采用的投影函数，在非差相位精密单点定位中，采用了 Niell 投影函数. 利用模型改正后，一般仍会有数 cm 的残差，因此还需要一阶高斯马尔可夫过程等方法来进行模拟. 文献［3］研究表明，用随机游走方法来估计对流层延迟残差比用白噪声方法估计的结果要好.

②电离层延迟改正. 对于双频码相位接收机来说，通常利用双频观测值的组合消除电离层影响项，可以不考虑电离层一阶项的影响，剩余的高阶项影响大约为 2 ~ 4 cm. 这样在 PPP 中不再考虑电离层影响改正项. 双频观测组合为：

$$P^j_{i,\mathrm{P}} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P^j_{i,\mathrm{P}_1} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P^j_{i,\mathrm{P}_2}; \quad (9)$$

$$\varphi^j_{i,\mathrm{L}} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \varphi^j_{i,\mathrm{L}_1} - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \varphi^j_{i,\mathrm{L}_2}. \quad (10)$$

③多路径效应. 该项严重时会导致卫星信号失锁. 目前消除或削弱多路径误差的措施有：选择测站位置时注意避开信号反射物，如建筑物、大面积水面、山坡等；接收机天线应配备抑径板或抑径圈，接收机对极化方向相反的反射信号应具有较大的抑制能力；多路径误差是一种周期性的误差，进行长时间观测也可以大幅度削弱其影响；可用半参数法、小波分析等方法来发现和估计多路径误差并消除其影响.

2.4　PPP 数据预处理方法

在精密单点定位中，必须先进行剔除粗差、修正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（或伪距）观测值.

2.4.1　组合观测值剔除粗差、探测和修复周跳

由于非差单点定位只有单站数据能用，无法组成双差或三差观测值，通常消除周跳的方法——三差法、多项式拟合法都不适用. Blewitt 提出的利用双频双 P 码组合观测值修复周跳的方法适于清除非差周跳[4]. 用于清除非差周跳的 GPS 观测值线性组合有以下几种.

①Melbourne – Wübbena 组合观测值

$$L_{\mathrm{M}} = \frac{c(\varphi_1 - \varphi_2)}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2}. \quad (11)$$

λ_{w} 为组合观测值 L_{M} 的波长，为 86 cm，组合观测值的模糊度为

$$N_{\mathrm{M}} = L_{\mathrm{M}} / \lambda_{\mathrm{w}}. \quad (12)$$

由于 Melbourne – Wübbena 组合观测值消除了电离层延迟、对流层延迟、钟误差和几何距离误差的影响，当 $|N_{\mathrm{M},i} - N_{\mathrm{M},i-1}| \geqslant 4\sigma_{N_{\mathrm{M},i}}$ 时，就认为该历元的组合观测值 $N_{\mathrm{M},i}$ 中可能存在周跳或粗差. 求解下一历元的整周模糊度 $N_{\mathrm{M},i+1}$，若 $N_{\mathrm{M},i+1}$ 和 $N_{\mathrm{M},i-1}$ 间很好相符，而与 $N_{\mathrm{M},i}$ 间的差也大于 $4\sigma_{N_{\mathrm{M},i}}$，则认为 $L_{\mathrm{M},i}$ 是粗差观测值，应予以剔除. 反之若 $N_{\mathrm{M},i+1}$ 和 $N_{\mathrm{M},i}$ 间能很好相符，而与 $N_{\mathrm{M},i-1}$ 间的差也大于 $4\sigma_{N_{\mathrm{M},i}}$，则认为从 $L_{\mathrm{M},i}$ 开始出现了周跳，故从 $L_{\mathrm{M},i}$ 开始应划分为一个新的弧段. 该周跳与 L_1 和 L_2 观测值的周跳 ΔN_1 和 ΔN_2 间有下列关系

$$\Delta N_{\mathrm{M}} = \Delta N_1 - \Delta N_2. \quad (13)$$

当 L_1 和 L_2 观测值中产生同样大小的周跳时，即当 $\Delta N_1 = \Delta N_2$ 时，用上述方法是无法检测出来的，不过这种情况很少出现.

②Iono – Free 组合观测值

$$L_{\mathrm{I}} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (14)$$

Iono – Free 组合观测值消除了几何距离、对流层、一阶的电离层等影响，只包含噪声的影响，其缺点是噪声被明显放大（为 P_1 码噪声的 3 倍），利用这种组合可以用来检测由于接收机本身的系统误差所引起的粗差，弥补 Melbourne – Wübbena 组合中没有剔除掉的质量较差的观测值.

③ Geometry – Free 组合观测值

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= \rho - I_{\mathrm{ion}} f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) + \lambda_1 N_1, \\ L_2 &= \rho - I_{\mathrm{ion}} f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) + \lambda_2 N_2, \\ L_{\mathrm{G}} &= L_1 - L_2 = I_{\mathrm{ion}} + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + \varepsilon_i \end{aligned}\right\} \quad (15)$$

该组合观测值与几何距离无关，且消除了接收机钟差、卫星钟差以及对流层延迟等所有与频

率无关的误差项影响，仅含电离层延迟项 I_{ion}，整周模糊度项以及观测噪声 ε_i. 发现周跳后可以用周跳前若干个历元的观测值来拟合一个多项式，再用周跳后的若干个历元的观测值来拟合一个多项式，这两个多项式所求得的周跳历元的观测值之差即为周跳数. 利用这种方法就可求得 $\lambda_1\Delta N_1 - \lambda_2\Delta N_2$，与式（13）联立后，即可解出周跳数 ΔN_1 和 ΔN_2. 由于其波长只有 5.4 cm，电离层延迟又可能发生突然扰动，用上述方法确定的周跳不能保证完全正确，仅被用于平滑伪距. 在最终对载波相位测量观测值进行平差计算时，在每个周跳处需要重新设置一个整周模糊度未知参数.

2.4.2 消除电离层影响的载波相位平滑伪距方法

消去未知的整周模糊度,利用载波相位的变化来平滑伪距(Hatch,1982)以提高伪距定位精度.利用消除电离层影响的双频载波相位平滑伪距,其质量的好坏直接影响 PPP 的初始化时间、非差模糊度的确定问题.平滑后的伪距

$$\hat{P}_{Pi} = \lambda_1(\varphi_{L_i} + N_L). \tag{16}$$

具体计算时，改用如下的递推公式

$$(\lambda_1 N_L)_i = \frac{i-1}{i}(\lambda_1 N_L)_{i-1} + \frac{1}{i}(P_{P_i} - \lambda_1\varphi_{L_i}). \tag{17}$$

所得到平滑伪距的精度较高，在不同高度角时可以达到 ±0.5 m. 其中的周跳问题，可以根据 $\lambda_1\varphi_1 - \lambda_2\varphi_2$ 的变化精确发现，用相应的方法修正到 ±2 周以内.

3 结束语

非差相位精密单点定位在定位精度上优于传统单点定位几十倍，甚至几百倍；与差分 GPS 比较而言，便于质量控制、节省作业开支、不受距离限制. 由此可知，GPS 非差定位具有广阔的应用前景，利用单台双频 GPS 接收机在全球范围内进行静态或动态作业，可直接得到高精度的 ITRF 框架坐标，在区域高精度坐标框架的维持、区域或全球性的科学考察，高精度动态导航定位及低轨卫星的定轨等方面都具有不可估量的应用前景. 尤其动态 PPP 的应用更具有重大意义，其研究尚待进一步深入.

参考文献

[1] Zumberge 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 [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (B3): 5005 – 5017.

[2] Zumberge J F, Watkins M M, Web F H. Characteristics and application of precise GPS clock solution every 30 seconds [J]. Navigation, 1998, 44 (4): 449 – 456.

[3] 刘经南，叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨 [J]. 武汉大学学报・信息科学版，2002，27 (3): 234 – 240.

[4] Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data [J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17 (3): 19 – 202.

Development of GPS precise point positioning in un-differenced phase observation

LIU Zhi-min[1,2], LIN Wen-jie[1]

(1. *Department of Civil Engineering*, *Guilin Institute of Technology*, *Guilin* 541004, *China*;
2. *Research Center of GPS*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430079, *China*)

Abstract: To overcome the shortcomings in differential GPS positioning and conventional point positioning, a new technique named precise point positioning (PPP) is developed with the improvement of GPS receiver and the IGS precise orbits 5cm and satellite clocks 0.1 ~ 0.2 ns. The approach of PPP is described in detail and some key problems in data processing with the un-differenced double-frequency pseudo range and carrier phase observations of one single receiver discussed. Finally, a very efficient tool is provided by PPP to access precise geodetic point positioning, the terrestrial reference frame or LEO's orbit determination. Obviously it is the key technique to realize the global RTK and the internet-based differential GPS positioning in the future.

Key words: GPS technique; single point positioning; un-differenced phase precise point positioning