

文章编号: 1005-0523(2016)04-0056-05

# 基于区域大气增强 PPP 及其在交通运输中的应用

孔建

(武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉 430079)

摘要: 加快收敛速度是目前实时动态精密单点定位研究的难题。通过已知点观测数据验证了非差非组合 PPP 定位方法与传统消电离层组合 PPP 定位精度相当, 具有一定实际应用价值。利用高精度 CORS 系统建立区域电离层模型并对非差非组合 PPP 进行约束, 与消电离层组合 PPP 定位结果相比, E 方向初始历元定位偏差小于 0.5 m, 8 min 内定位偏差收敛至小于 10 cm, 定位精度得到明显提高, 完全能够满足交通运输中动态定位导航的需求。

关键词: PPP; 消电离层组合; 非差非组合; 电离层

中图分类号: P207.2

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.04.009

全球导航卫星系统(GNSS)具有全天候、全球性、高精度的导航、定位、授时、测速系统。GNSS 主要由地面监控系统、空间卫星系统、用户接收机三大部分组成, 由于其具有实时动态、高效快捷等优点, 已经广泛应用于工程建设、交通运输、环境监测等领域<sup>[1]</sup>。精密单点定位(precise point positioning, PPP)是当前 GNSS 研究领域的热点。PPP 借助于高精度的卫星轨道的钟差产品, 通过对各项误差参数的估计和模型改正, 能够实现高精度的单测站定位<sup>[2]</sup>。另外 IGS 实时服务(IGS real-time service, 简称 IGS RTS)使得实时 PPP 的应用成为可能, 但是在实际应用中, 实时 PPP 的收敛速度通常较慢, 达到厘米级精度通常需要一个小时, 且会受到卫星几何结构、观测数据质量等的影响<sup>[3]</sup>。非差非组合 PPP 是未来多系统定位中的主要发展方向。

目前 GPS 技术在汽车导航和交通管理中已经得到了广泛应用, 能够为车辆提供实时的定位服务, 尤其能为消防、急救、公安等车辆提供实时位置, 以便找到最佳线路, 更加快速的到达目标。本文利用 CORS 系统, 对流动站周围站点进行实时观测, 并对流动站进行对流层、电离层参数进行内插, 对实时动态 PPP 进行改进, 并验证其精度。

## 1 精密单点定位简介

PPP 是用单台 GNSS 接收机接收多颗导航卫星信号, 结合 IGS 等产品中心的精密星历和钟差, 并通过一定的组合和各项误差模型改正, 经过一定的收敛时间达到静态厘米级或动态分米级坐标精度的定位方法<sup>[4-5]</sup>。PPP 相对于传统的基线解算, 不需要附近有参考站, 在全球范围内适用且在全球范围精度差别不大。目前 PPP 定位方法主要有消电离层组合方法和加电离层约束的非差非组合方法。

### 1.1 消电离层组合 PPP

消电离层组合的观测方程为<sup>[6]</sup>

$$\begin{cases} P_C = \rho + c(\delta t_{\text{rcv}} - \delta t_{\text{sat}}) + T_r + M_C + \varepsilon_{PC} \\ L_C = \rho + c(\delta t_{\text{rcv}} - \delta t_{\text{sat}}) + T_r + B_C + \lambda_N w + m_C + \varepsilon_{LC} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2016-04-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2042016kf0037)

作者简介: 孔建(1986—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为 GPS 定位及电离层。

其中: $P_C$  为伪距观测值; $L_C$  为载波观测值; $\rho$  卫星和接收机之间的距离; $c$  为真空中的伪光速; $dt_{\text{rcv}}$  和  $dt_{\text{sat}}$  分别为接收机和卫星钟差; $T_r$  为对流层延迟; $M_C$  和  $m_C$  分别为伪距和载波多路径误差; $\varepsilon_{\text{PC}}$  和  $\varepsilon_{\text{LC}}$  为伪距和载波随机误差; $B_C$  为模糊度项; $\lambda_N$  为整周模糊度; $\lambda_{Nw}$  为天线相位缠绕改正项。观测值中的对流层干延迟、潮汐位移误差、天线相位中心偏差都已经提前得到改正。上述方程通常采用扩展卡尔曼滤波方法进行解算。

1.2 非差非组合 PPP

传统的消电离层组合的 PPP 定位方法采用 GPS 双频伪距和载波的无电离层组合来消除电离层延迟一阶项,但是不能消去电离层延迟中的高阶项的影响。基于非差非组合的 PPP 算法并不进行观测值之间的组合,而是将观测路径上电离层延迟作为未知参数,在观测方程中进行估计<sup>[7]</sup>。其观测方程为

$$\begin{cases} P_i = \rho + c(\delta t_{\text{rcv}} - \delta t_{\text{sat}}) + T_r - (\frac{\lambda_i}{\lambda_1})^2 \rho_{\text{ion}} + M_i + \varepsilon_{P_i} \\ L_i = \rho + c(\delta t_{\text{rcv}} - \delta t_{\text{sat}}) + T_r + (\frac{\lambda_i}{\lambda_1})^2 \rho_{\text{ion}} + B_i + \lambda_i w + m_i + \varepsilon_{L_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中参数含义与式(1)相同, $\rho_{\text{ion}}$  为电离层延迟。

为验证非差非组合 PPP 的定位精度,我们同时利用传统消电离层组合 PPP 和非差非组合 PPP 对观测数据进行处理,对已知点进行单点定位,计算定位结果与真值之间的偏差。图 1 和图 2 分别给出了 E 方向和 N 方向的两种定位方法的偏差。

从图 1 和图 2 中可以看出,代表消电离层组合 PPP 的圆圈和代表非差非组合 PPP 的正三角几乎重合,表明两种定位方法的精度完全相同,非差非组合 PPP 定位方法具有可行性。

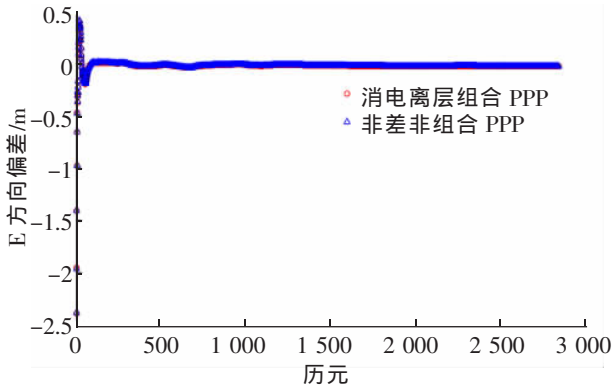


图 1 消电离层组合 PPP 和非差非组合 PPP 定位结果 E 方向对比

Fig.1 E direction results comparison between ionosphere-free PPP and un-differential and un-combined PPP

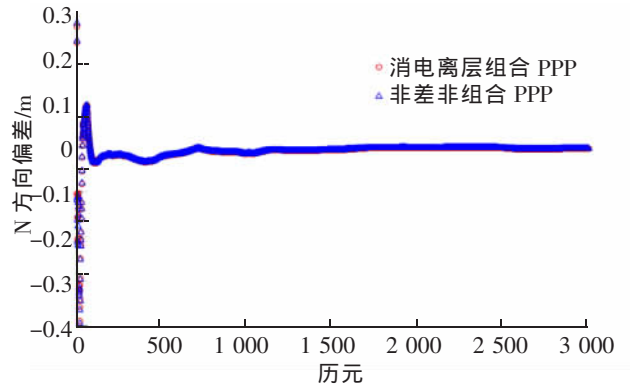


图 2 消电离层组合 PPP 和非差非组合 PPP 定位结果 N 方向对比

Fig.2 N direction results comparison between ionosphere-free PPP and un-differential and un-combined PPP

2 电离层约束对实时动态 PPP 的影响

2.1 区域电离层、对流层插值

近年来,各地 CORS 系统不断建立,利用 CORS 高质量的观测数据可以实时建立高精度的区域对流层、电离层模型。消电离层组合 PPP 和非差非组合 PPP 能够加入对流层约束提高解算精度,加快收敛速度。但是传统的消电离层组合 PPP 方法中利用观测值之间的组合消去了电离层误差,所以无法在方程解算中加入通过其他观测手段得到的电离层信息,即无法加入电离层约束。由于非差非组合 PPP 在观测方程中将电离层延迟量作为未知参数进行求解,因此可以在解算中加入通过高质量、高密度的 CORS 网络获得的区域电离层信息,对解算结果进行电离层约束,提高解算精度。本文通过 CORS 网的观测数据实时获得区域电离层信息,并将测站概略位置上空的电离层电子含量通过内插得到,即可得到观测射线路径上的电离层延迟,加入到解算方程中。

使用反距离加权插值法对流动站进行插值。反距离加权插值法是一种通过计算距离对数据进行定权滑动平均加权插值法,具体计算公式为

$$Z_1(x_0) = \sum_{i=0}^n Z(x_i) \times p_i \quad (3)$$

其中:  $Z_1(x_0)$  为待插值点;  $Z(x_i)$  为周围已知点数据;  $p_i$  为周围点数据的权重, 由下式确定

$$p_i = \frac{1/d_i^k}{\sum_{i=0}^n 1/d_i^k} \quad (4)$$

其中:  $d_i$  为待插值点与已知点之间的距离;  $k$  为幂指数。

图 3 给出了 CORS 测站的位置分布, 其中 baiy 站位为检核站, 利用其余 3 个站观测数据获得该区域对流层、电离层实时信息。4 个 CORS 站的坐标均为已知。

以测站 baiy 的电离层和对流层观测数据为真值, 利用周围 qiny、yong、xiuw 3 个测站的观测数据对 baiy 进行插值, 插值频率为 30 min, 计算电离层很对流层的插值误差。图 4 给出了一天內电离层和对流层的插值误差。从图中可以看出, 电离层的插值误差基本小于 2TECU, 对流层插值误差小于 0.8 cm, 能够满足电离层、对流层误差改正的需求。

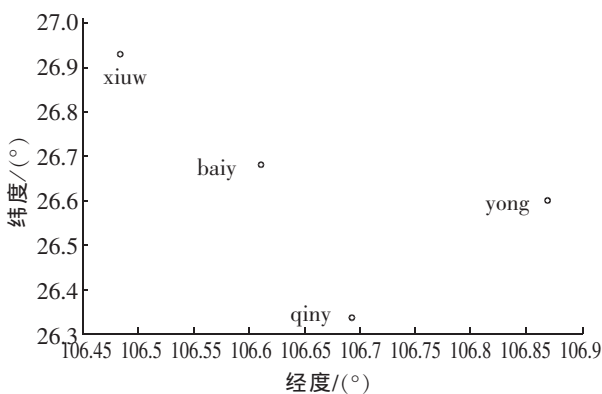


图 3 测站分布图  
Fig.3 CORS stations distribution

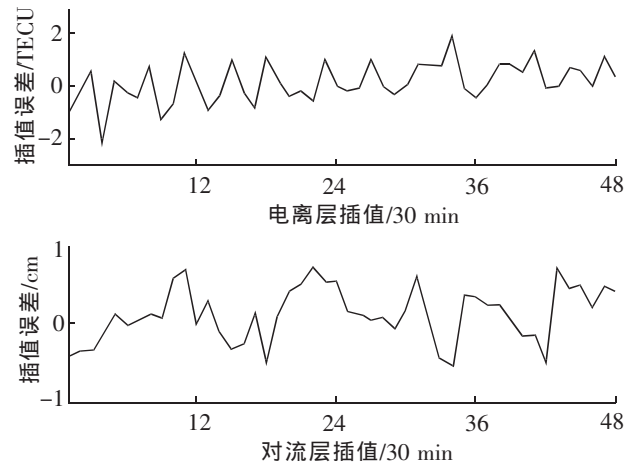


图 4 电离层和对流层插值误差  
Fig.4 Interpolation error of ionosphere and troposphere

## 2.2 精度验证

通过上述插值过程获得电离层、对流层约束后, 即可利用非差非组合和消电离层组合进行 PPP 定位, 将定位结果与已知坐标进行对比, 验证两种方法的定位精度。图 5 和图 6 分别给出了消电离层组合 PPP 和非差非组合 PPP 加电离层约束两种定位方法在 E 方向和 N 方向定位结果的对比 (2 种定位方法都已加入对流层约束)。

从图 5 中可以看出, E 方向加电离层约束的解算精度较传统的不加电离层约束有显著提高: 加电离层约束的非差非组合 PPP 的初始历元偏差就小于 0.5 m, 达到了亚米级精度, 可直接用于一般的车辆导航, 其后随着模糊度不断固定, 在 16 个历元 (8 min) 后, E 方向精度达到了厘米级精度。而不加电离层约束的传统 PPP 的初始历元偏差达到了 -2.5 m, 无法用于导航定位, 在 120 个历元 (60 min) 以后才达到厘米级精度。

从图 6 中可以看出, N 方向加电离层约束的非差非组合 PPP 和传统不加电离层约束的 PPP 定位精度没有明显提高, 但是两者精度相当, 且在初始历元偏差都小于 1 m, 能够满足普通导航的精度要求。并且随着时间的推移, 加电离层约束的非差非组合 PPP 更快收敛到厘米级精度。

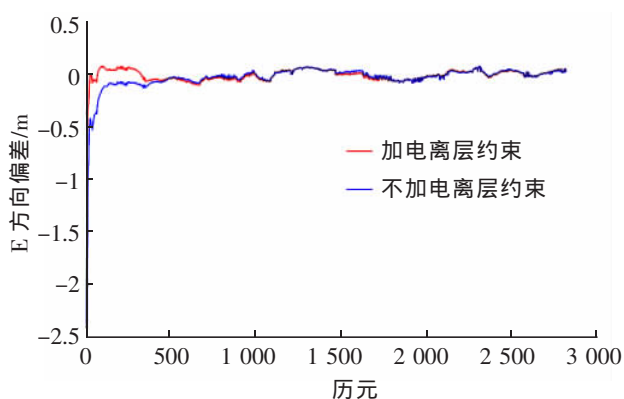


图5 非差非组合 PPP 加电离层约束与消电离层组合 PPP 定位精度 E 方向对比

Fig.5 E direction results comparison between ionosphere-free PPP and un-differential and un-combined PPP with ionosphere constraint

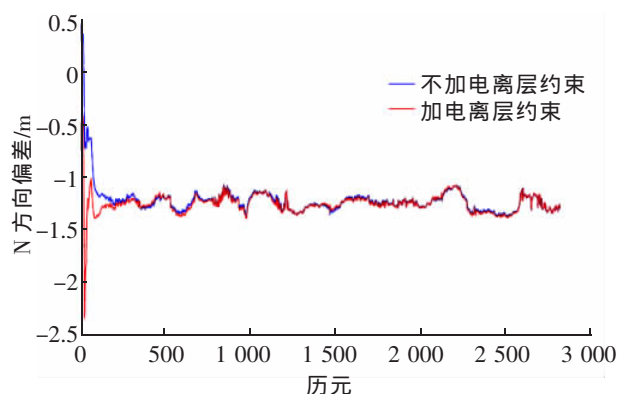


图6 非差非组合 PPP 加电离层约束与消电离层组合 PPP 定位精度 N 方向对比

Fig.6 N direction results comparison between ionosphere-free PPP and un-differential and un-combined PPP with ionosphere constraint

### 3 实时动态 PPP 在交通运输中的应用

最原始的单点定位技术为伪距差分,其定位精度约为 0.5 m,定位精度较差且不稳定,难以满足交通导航中较高精度的要求。实时动态 PPP 定位技术,几个历元收敛后达到分米,半个小时到达 10 cm 以内。在进行简单初始化之后定位点即可进行移动,车辆在行进过程中能够实时动态地进行定位。实时动态 PPP 定位技术极大的满足了交通运输过程中动态导航的需求<sup>[8]</sup>。

近年来,随着各地高精度、高质量的 CORS 网络的建立,通过 CORS 网观测数据建立的区域电离层、对流层改正模型可直接用于非差非组合 PPP 定位中的误差改正,显著提高了非差非组合 PPP 的定位精度和收敛速度。而传统消电离层组合 PPP,不能加电离层模型,且在今后多种导航系统融合中无法进行系统间观测数据的组合,因此应用面比较狭窄。非差非组合 PPP 定位方法能够充分利用外部的改正信息,定位精度更高,在以后多网融合中能够进一步提高定位精度,因此该方法更加适用于交通运输中的定位、导航。

### 4 结论

详细介绍了消电离层组合 PPP 和非差非组合 PPP 的定位原理和两者之间的区别,并利用已知点观测数据对两种方法进行精度验证。结果表明,两种定位方法精度相当,非差非组合 PPP 定位方法具有可行性。利用 CORS 网络观测数据建立区域电离层、对流层模型,并加入到非差非组合 PPP 和消电离层组合 PPP(只加对流层约束)中,验证两种定位方法的精度,结果表明,非差非组合 PPP 与消电离层组合 PPP 相比,E 方向初始历元定位精度显著提高,收敛时间明显缩短,从 60 min 提高到 8 min,N 方向初始历元无明显提高,收敛时间有所缩短。

非差非组合 PPP 在汽车、火车等交通工具中能够在较短时间内甚至初始历元达到一般交通定位精度要求,并随着时间推移逐渐收敛到厘米级精度,能够满足更加复杂的交通条件。短时间的定位收敛使得非差非组合 PPP 在实际应用中无需长时间等待,更加符合现实应用的需求,因而能够更加广泛的得到应用。

#### 参考文献:

- [1] 聂建亮,张双成,王月莉,等. 基于 CORS 网对流层信息的精密单点定位[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(2):91-94.

- [2] 姜卫平,邹璇,唐卫明. 基于 CORS 网络的单频 GPS 实时精密单点定位新方法[J]. 地球物理学报,2012,55(5):1549-1556.
- [3] 张瑞,姚宜斌,郑艳丽. 基于区域电离层建模的单点定位应用分析[J]. 大地测量与地球动力学,2013,33(1):69-73.
- [4] 夏志浩,赵长胜,邹韬. 对流层延迟对 GNSS 精密单点定位精度的影响[J]. 工程勘察,2014,42(7):50-52.
- [5] LI X,ZHANG X,GE M. Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution[J]. Journal of Geodesy,2011,85(3):151-158.
- [6] 陈伟荣,高成发,曹相,等. 考虑区域 CORS 网络对流层信息的改进 PPP 方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2013(S2):370-374.
- [7] 章红平,高周正,牛小骥,等. GPS 非差非组合精密单点定位算法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2013,38(12):1396-1399.
- [8] 傅军栋,邹欢,康水华. PSO-SVM 算法在智能建筑环境监控系统中的应用[J]. 华东交通大学学报,2016,33(1):121-127.

## Enhanced PPP Based on Regional Atmosphere and Its Application in Traffic and Transportation

Kong Jian

(Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** To speed up the convergence speed is a difficult problem in the research of real-time dynamic precision single point positioning. The un-differential and un-combined PPP positioning method is verified by the known point observation data and the results show that it has the same precision with the traditional PPP, which has a certain practical application value. By using high precision CORS system, the regional ionosphere model is established and the un-differential and un-combined PPP is restricted. Compared with the PPP positioning results of the ionosphere free combination, the initial epoch positioning deviation of E direction is smaller than 0.5 m and positioning deviation converge to less than 10 cm within 8 min. The improved positioning accuracy can fully meet the needs of dynamic positioning and navigation in transportation.

**Key words:** PPP; ionosphere-free; un-differential and un-combined; ionosphere

(责任编辑 姜红贵)