

非差增强信息与差分虚拟观测数据的等价变换理论

张 勇^{1,2} 王 庆^{1,2} 黄永江^{1,2}

1 东南大学仪器科学与工程学院,江苏 南京,210096
2 东南大学智慧城市研究院,江苏 南京,210096

摘 要:针对目前非差精密单点定位增强信息无法直接用于 RTK(real time kinematic)相对定位的问题,研究了基于附加坐标约束的参考站非差精密单点模糊度固定解提取非差改正信息的方法,并建立了非差增强信息与虚拟参考站观测信息等价变换模型,重点论述了空间状态域信息(state space representation,SSR)在等价变换中的区别应用。根据 RTK 模糊度部分固定技术,利用实测数据设计实验证明了算法的正确性与可用性。结果表明,虚拟零基线可获得与网络 RTK 同等精度的定位效果,从而实现了区域增强系统在非差与差分模式上的高度统一。

关键词:精密单点定位;模糊度固定解;等价变换;非差区域增强信息;虚拟观测数据
中图分类号:P207 **文献标志码:**A

GNSS 精密定位通常分为非差绝对定位与差分相对定位两种定位模式。其中精密单点定位(precise point positioning,PPP)^[1-5]、区域增强 PPP 等属于非差绝对定位;而 DGNSS、RTK(real time kinematic)则属于差分相对定位^[6-7]。区别于传统网络/常规 RTK 或 PPP 技术,非差区域增强 PPP 技术是基于参数域,尽可能地保留和参数化了各类误差,并可以有效降低具有稳定特性参数的播发频率。但是传统差分相对定位技术由于其作业效率高,在国民经济建设和国防建设中得到了广泛应用,并且目前主流 GNSS 设备提供商提供的高精度 GNSS 测量终端的定位方式主要以 RTK 相对定位为主,仅有少数几家支持各自自定义数据格式的 PPP 服务。

本文基于目前 GNSS 高精度应用现状,考虑到基于 PPP 技术的非差区域增强系统生成的非差改正数无法直接用于 RTK 定位,需要支持特制 PPP 算法的终端才能获取高精度定位信息。故本文将系统产生的非差改正数信息根据等价变换理论转换为可用于差分定位的虚拟参考站信息,这既能体现非差区域增强 PPP 系统的特色,也可满足传统 RTK 定位的需求,达到基于 PPP 技术的非差区域增强系统在非差与差分模式上的统一。

1 精密单点定位模糊度固定理论

固定参考站整周模糊度是快速获取大气改正、卫星轨道、钟差、相位小数等高精度非差改正信息的关键点。PPP-AR(PPP-ambiguity resolution)模糊度固定一般采用消电离层组合(LC 组合)模型,基于原始伪距与载波观测测量组成的消电离层的观测方程如下^[8-10]:

$$P_{iFr}^j = \rho_r^j + c(dt_r - dt^j) + d_{orb}^j + T_r^j + b_{iFr} - b_{iF}^j + \epsilon_r^j(P) \tag{1}$$

$$L_{iFr}^j = \rho_r^j + c(dt_r - dt^j) + d_{orb}^j + T_r^j + \lambda_{iF}(N_{iF} + B_{iFr} - B_{iF}^j) + \epsilon_r^j(L) \tag{2}$$

该观测模型的模糊度不具备整数特性,并且波长较短,不易进行模糊度的直接固定。一般将模糊度分解为宽巷 WL(widy-lane)模糊度以及窄巷 NL(narrow-lane)模糊度,通过固定 WL 与 NL 的模糊度后恢复 LC 模糊度的方法获取 PPP 固定解^[11-12]。

1.1 宽巷模糊度固定

利用 WM(Melbourne-Wübbena)组合观测值计算星间单差 $\nabla N_{WL}^{i,k}$ 的实数解,利用多历元平滑得到 $\nabla \hat{N}_{WL}^{i,k}$,削弱测量噪声和多路径误差的影响

响,平滑后的模糊度和相应噪声为^[13-15]:

$$\nabla \hat{N}_{\text{WL}}^{i,k}(i) = \nabla \hat{N}_{\text{WL}}^{i,k}(i-1) + \frac{1}{i}(\nabla N_{\text{WL}}^{i,k}(i) - \nabla \hat{N}_{\text{WL}}^{i,k}(i-1))$$
$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i}[(\nabla N_{\text{WL}}^{i,k}(i) - \nabla \hat{N}_{\text{WL}}^{i,k}(i-1))^2 - \sigma_{i-1}^2]$$

(3)

式中, σ_i^2 表示第 i 历元的误差。

在获取质量合格的浮点单差宽巷模糊度 $\nabla \hat{N}_{\text{WL}}^{i,k}$ 与卫星端相位小数 b_{wl}^i 、 b_{wl}^k 后,恢复具有整数特性的单差宽巷整周模糊度^[16-17]:

$$\nabla \bar{N}_{\text{WL}}^{i,k} = \nabla \hat{N}_{\text{WL}}^{i,k} - (b_{\text{wl}}^i - b_{\text{wl}}^k)$$

(4)

对单差宽巷模糊度 $\nabla \bar{N}_{\text{WL}}^{i,k}$ 进行逐个固定,固定过程分为两步:

1)判断 $\nabla \bar{N}_{\text{WL}}^{i,k}$ 离整数的偏离程序,超过阈值不进行模糊度固定。

$$dn = |\nabla \bar{N}_{\text{WL}}^{i,k} - \text{int}(\nabla \bar{N}_{\text{WL}}^{i,k} + 0.5)| < \lim$$

(5)

式中, $\text{int}(\cdot)$ 为取整算法; dn 为整数偏差;一般阈值 \lim 设为 0.25 周。

2)通过阈值检验后,由于 WL 模糊度波长较长,受测量噪声和误差的影响较小,经过滤波后已得到较高精度的 WL 模糊度浮点值,可将 WL 模糊度取整固定为 $\nabla \hat{n}_{\text{WL}}^{i,k} = \text{int}(\nabla \bar{N}_{\text{WL}}^{i,k} + 0.5)$ 。

1.2 窄巷 LAMBDA 搜索固定

当获取固定的单差宽巷整周模糊度 $\nabla \hat{n}_{\text{WL}}^{i,k}$ 后,结合 LC 浮点模糊度得:

$$\nabla \bar{N}_1^{i,k} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \nabla \hat{N}_{\text{IF}}^{i,k} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \nabla \hat{n}_{\text{WL}}^{i,k} - (b_1^i - b_1^k)$$

(6)

式中, $\nabla \bar{N}_1^{i,k}$ 为经过窄巷相位小数修正、宽巷模糊度固定以后具有整数特性的窄巷浮点模糊度。

对应的模糊度协方差按照误差传播定律得:

$$\nabla \mathbf{D}_1 = \mathbf{Z}_2 (\mathbf{Z}_1 \mathbf{D}_{\text{IF}} \mathbf{Z}_1^T) \mathbf{Z}_2^T$$

(7)

式中, \mathbf{D}_{IF} 为非差无电离层浮点模糊度协方差矩阵; \mathbf{Z}_1 为非差转单差变换矩阵; \mathbf{Z}_2 是无电离层模糊度转窄巷模糊度系数矩阵。由于 PPP 中单差 NL 模糊度具有较强的相关性,所以 NL 模糊度的固定采用最小二乘模糊度降相关平差 (least-squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA) 法进行搜索固定^[18]。由于宽巷 UPD (uncalibrated phase delay) 只在观测值域对 WM 观测值进行修正,而窄巷 UPD 会被直接引入到观测方程中,最终作用于 NL 模糊度的搜索过程,所以窄巷 UPD 的精度将直接影响 PPP 模糊度的固定。因此,PPP 模糊度的固定必须考虑窄巷 UPD 产品的精度。

2 非差改正数转虚拟观测值等价变换理论

利用参考站已知坐标,对参考站进行 PPP-AR 模糊度固定计算,固定宽巷与窄巷模糊度后,恢复 L1/L2 频点上非差模糊度,从而提取大气延迟及硬件延迟等误差。观测方程简化为:

$$\hat{\rho}_r^j = \bar{\rho}_r^j - \text{OMC}_r^j$$

(8)

式中, $\hat{\rho}_r^j$ 为伪距或相位观测值的真实距离; $\bar{\rho}_r^j$ 为伪距或相位的观测距离; OMC_r^j 为非差改正数。

由式 8 可以提取非差改正数 OMC,OMC 主要分为两类:①非差大气延迟改正数,包括电离层延迟改正 I_r 和对流层延迟改正 T_r ;②与卫星相关的改正数,包括卫星轨道改正数 d_{orb}^j 、卫星钟差 dt^j 和卫星相位小数 upd^j 。OMC 的组成可形象描述为:

$$\text{OMC}_r^j = \{I_r^j, T_r^j, \text{upd}^j, d_{\text{orb}}^j, \text{dt}^j\}$$

(9)

由于 OMC 的组成都是对原始卫星观测数据的改正数,并非观测数据,所以无法直接用于 RTK 差分定位。需要通过等价变换理论将非差 OMC 改正数数据变换为 RTK 差分定位可直接使用的虚拟观测数据。设有虚拟参考站的虚拟观测方程为:

$$\tilde{L}_{\text{vrs}}^j = \hat{\rho}_r^j + \text{dp}_r^j + \text{OMC}_r^j + t_r \cdot c + \epsilon_r^j$$

(10)

式中, \tilde{L}_{vrs}^j 为卫星 j 的虚拟观测值; $\hat{\rho}_r^j$ 为通过卫星 j 坐标和虚拟参考站位置计算的卫地距; dp_r^j 为固体潮误差改正、地球旋转改正、应力延迟改正等; OMC_r^j 为虚拟位置处卫星 j 的非差改正数; ϵ_r^j 为其他未模型化残差; t_r 为虚拟观测数据的虚拟接收机钟差(可以设为 0)。 $\hat{\rho}_r^j$ 根据 $\hat{\rho}_r^j = f(X_s, X^s)$ 计算, $f(\cdot)$ 为计算距离算法,其中 X^s 为卫星坐标, X_s 为所要生成虚拟观测数据的坐标信息。

GNSS 高精度定位过程中误差分为空间状态域 (state space representation, SSR) 及观测值域 (observation space representation, OSR) 两类,卫星位置误差以及星钟误差为空间状态域误差,不同于观测值域的电离层对流层误差,所以 \tilde{P}_r^j 应使用测站坐标和卫星位置计算得到真实值。故在计算卫星位置 X^s 时,需要区别空间状态域参数卫星轨道改正数、钟差改正数的使用情况,如表 1 所示。

表 1 OMC 包含 SSR 模式

Tab. 1 OMC Contains SSR Mode

模式	卫星位置与钟差计算	是否包含
		轨道、钟差改正
1	广播星历计算	是
2	广播星历+SSR 计算	否

由表 1 可知,如果在 OMC 中包括了轨道、钟

差改正数 SSR 后,计算卫地距的时候卫星坐标使用广播星历计算。在虚拟参考站处,由于没有原始观测数据,所以无法获取信号近似传播时间,需要通过迭代的方法求取正确的卫星位置,具体计算步骤如下:

- 1)解析虚拟参考站位置的 GGA 信息,获取位置信息 X_S 与时间信息 t_0 ;
- 2)计算 t_0 时刻的卫星位置,求取近似信号传播时间 $dt_i = f(X_S, X^S(t_0))/c$;
- 3)计算信号发射时刻 $t_i = t_0 - dt_i$,在计算 t_i 时刻的卫星位置时,不对卫星钟差修正;
- 4)重复步骤 2)、3),当 $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ 小于阈值 Δt_{limit} 跳出循环,输出卫星位置信息;通常卫星速度为 4 km/s,如果要求计算的卫星位置精度优于 3 cm,则 $\Delta t_{\text{limit}} = \frac{3}{4 \times 10^6} = 7.5 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。

等价虚拟卫星位置计算流程如图 1 所示。根据以上方法,利用非差 OMC 观测值改正数、虚拟参考站的位置及时间信息可生成等价的虚拟参考站数据,该虚拟参考站数据可直接用于传统 RTK 定位,等价变换流程如图 2 所示。

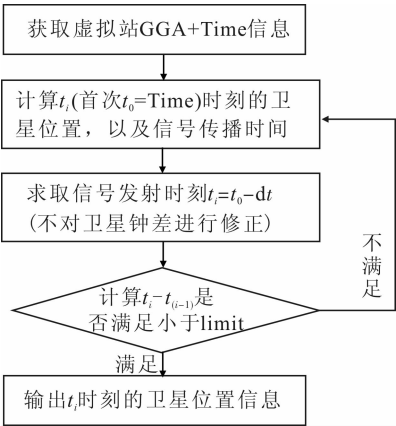


图 1 等价虚拟卫星计算算法流程图

Fig. 1 Flow Chart of Algorithm of Equivalence Virtual Satellite Calculation

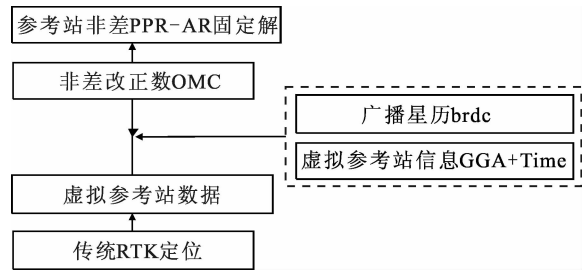


图 2 非差改正数转虚拟参考站数据等价变换流程图
Fig. 2 Flow Chart of Transformation Method of Zero-Difference Correction Data to Virtual Observation Data

根据以上步骤,获取了经非差改正数等价变

换的虚拟参考站观测信息,将该虚拟观测值与流动站观测数据组成双差观测方程,消除电离层、对流层、卫星轨道、卫星钟差等误差,将相对位置参数、双差模糊度视为未知数参数,载波相位双差定位方程为:

$$\lambda \cdot \nabla \Delta \varphi - \nabla \Delta \rho^0 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \nabla \Delta N + \nabla \Delta \epsilon_{r, \text{vrs}}^{j, i}$$

(11)

式中, λ 为波长; $\nabla \Delta \varphi$ 为双差相位观测值; $\nabla \Delta \rho^0$ 为近似卫地距; \mathbf{A} 为系数矩阵; \mathbf{X} 为相对位置向量; \mathbf{B} 为模糊数系数矩阵; $\nabla \Delta N$ 为双差模糊度。

RTK 定位算法需要经过多历元滤波求解位置、模糊度等参数,可以使用序贯最小二乘分块求解法,优先求取模糊度参数,模糊度搜索固定采用部分模糊度固定方法 (partial LAMBDA, P-LAMBDA)。

3 非差改正数转虚拟观测值 RTK 实验

为验证上述非差改正数转虚拟观测值进行 RTK 定位实验效果,本文利用欧洲 SAPOS 网 2013-11-12 的 0266 等 10 个站点观测数据,首先进行 PPP-AR 模糊度固定解算,获取非差改正数,然后将非差改正数转虚拟观测值,最后进行 RTK 定位解算。

- 3.1 参考站点 PPP-AR 模糊度实时固定解
- 首先,利用欧洲的 SAPOS 区域站点实时估计 UPD,采用 CENS 中心的 CLK93 作为实时精密轨道钟差改正源,附加参考站已知坐标进行实时 PPP 解算,获取参考站 PPP-AR 模糊度固定解,站点分布如图 3 所示。



图 3 SAPOS 网数据测试站点分布
Fig. 3 Data Testing Stations Distribution of SAPOS Network

图 4 与图 5 给出了 0266 站点的 PPP-AR 模糊固定解的 U、E、N 方向误差、固定卫星数、历元固定率及 Ratio 值、实时 UPD 延迟等信息。从图 4、图 5 中可以看到,0266 站点取得了很稳定的 PPP

模糊度固定解,历元固定率达到了 97.0%。

同时段,其他站点进行 PPP-AR 模糊度固定解,同样取得了可靠的结果,精度统计、固定率以及固定卫星数目等信息如图 6、图 7、图 8 所示。

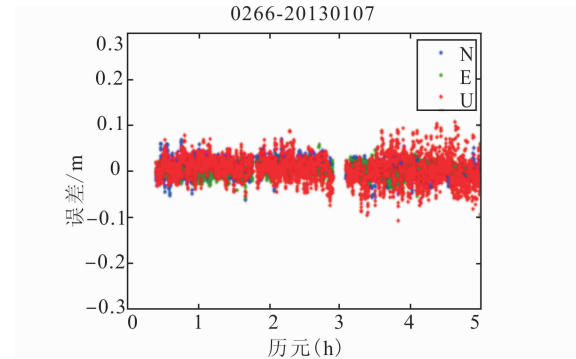


图 4 0266 站 PPP-AR 固定解(固定坐标)
Fig. 4 PPP-AR Results of Station 0266

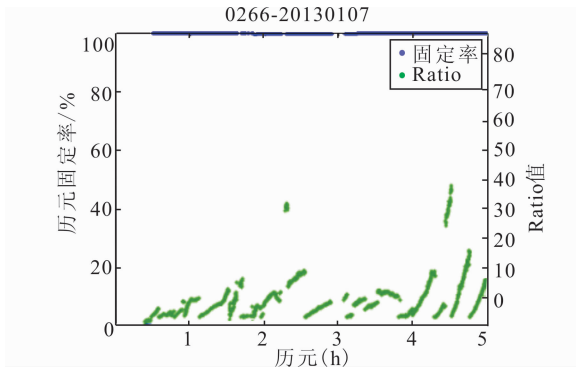


图 5 0266 站模糊度 Ratio 值与固定率
Fig. 5 Ratio and Ambiguity Fixed Rate of Station 0266

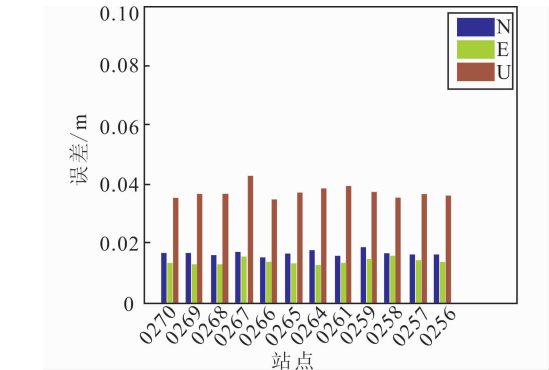


图 6 0266 等所有站点 PPP 固定解精度
Fig. 6 Accuracy of PPP-AR of All Stations

参考站点进行 PPP-AR 定位的平均精度统计为:N 方向 0.016 m,E 方向 0.013 m,U 方向 0.037 m,平均固定率为 97.3%,总共平均观测卫星数为 7.4 颗,平均固定 6.9 颗。以上数据可以说明,参考站进行 PPP-AR 可获得高精度、高可用率定位结果,满足实时获取非差改正数的需要。

3.2 参考站非差改正数转虚拟观测值

参考站获得 PPP-AR 模糊度固定解提取非

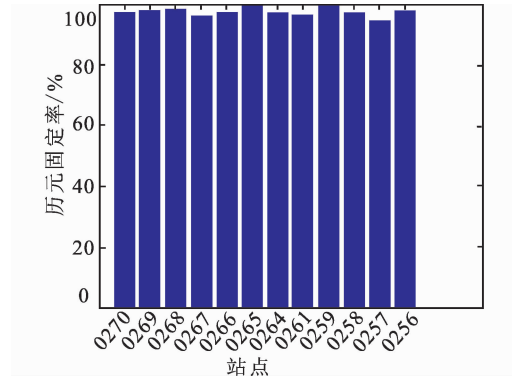


图 7 0266 等所有站点模糊度固定率
Fig. 7 Fixed Rate of Ambiguity of All Stations

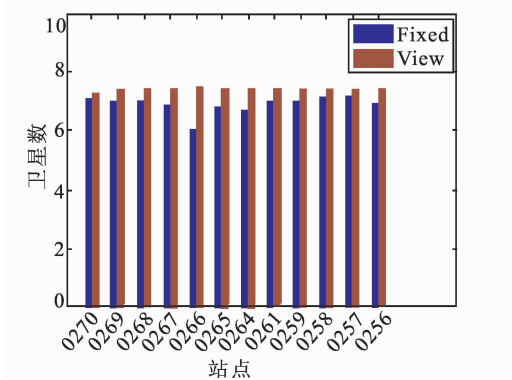


图 8 0266 等所有站点固定卫星数统计
Fig. 8 Statistics of Fixed Satellites Number of All Stations

差改正数并等价变换为虚拟参考站数据,为验证信息转换的正确性,本文将等价变换的虚拟观测值的虚拟参考站位置设置为真实参考物理位置,使得虚拟站与真实参考站构成零基线。

由于零基线模式下能够完全消除轨道误差、卫星钟差、对流层、电离层等误差,理论上仅剩接收机噪声影响,故虚拟站与参考站构成零基线的双差伪距观测值、双差相位观测值能够反映出生成的虚拟观测数据的有效性。

取 0266 站点的数据进行分析,图 9 给出了 G08、G09 两颗卫星上 P1、P2 的虚拟零基线双差伪距观测值(G26 为参考星)。从图 9 中可知,双差伪距观测值基本小于 2 cm,充分反映了从非差改正数等价变换到虚拟伪距观测数据的有效性。

要验证虚拟相位观测的有效性,可以通过 $\nabla\Delta N^0 = \nabla\Delta P - \lambda \cdot \nabla\Delta\varphi$ 计算近似双差模糊度,其中, $\nabla\Delta P$ 为双差伪距, $\nabla\Delta\varphi$ 为双差相位, λ 为波长, $\nabla\Delta N^0$ 为近似模糊度。

图 10 与图 11 给出了 0266 站点虚拟零基线下 G08、G09 双差近似模糊度(G26 为参考星),可以看出,双差近似模糊度与整数偏差小于 0.15 周,说明了非差改正数等价变换到虚拟相位观测

数据的有效性。

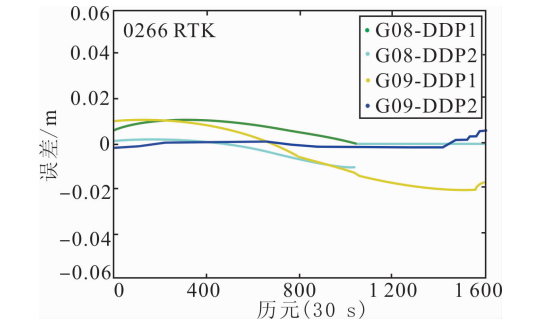


图 9 虚拟零基线双差伪距观测值

Fig. 9 Double-Difference Pseudo-Range Value for Virtual Zero-baseline

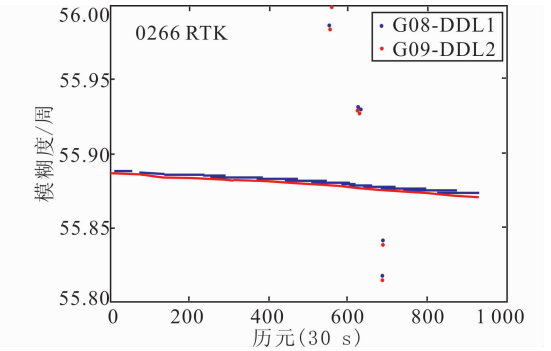


图 10 虚拟零基线 L1 双差近似模糊度

Fig. 10 Double-Difference Approximate Ambiguity for Virtual Zero-baseline of L1

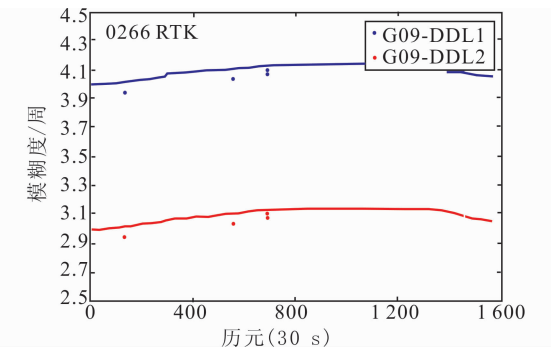


图 11 虚拟零基线 L2 双差近似模糊度

Fig. 11 Double-Difference Approximate Ambiguity for Virtual Zero-baseline of L2

综上所述,通过利用虚拟零基线组成双差伪距观测值、双差近似模糊度等信息,反映了非差改正数等价变换到虚拟观测数据的有效性。

3.3 非差转虚拟观测值的 RTK 定位结果

对 0266 站点构成的虚拟零基线数据按照 RTK 定位模式进行定位,动态解算过程采用 L1+L2 模式计算。

图 12 给出了 0266 站点由非差改正数生成的虚拟参考站数据与真实参考站数据构成的虚拟零基线的 RTK 定位结果,其模糊度固定率为 98.9%,

坐标精度统计为:N 方向 0.004 m,E 方向 0.008 m,U 方向 0.011 m。

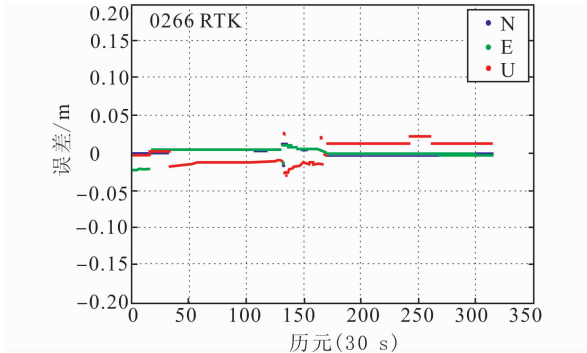


图 12 0266 站虚拟零基线 RTK 定位结果

Fig. 12 RTK Positioning Result for Virtual Zero-baseline of Station 0266

图 13 给出了 RTK 定位过程中,利用基于 LAMBDA 的部分模糊度固定方法的 Ratio 检验值(一般 Ratio>3.0),认为模糊度固定成功。从图 13 可以看到,整个定位过程中,随着历元的增加,Ratio 值快速增长,反映出模糊度固定值的正确性与可靠性越来越高,从而说明 RTK 定位结果的正确性与可靠性。

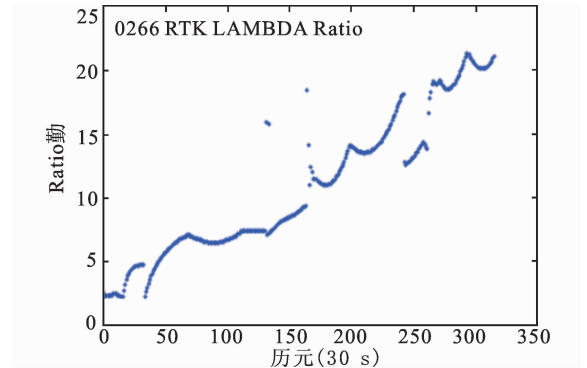


图 13 RTK 定位模糊度搜索过程 Ratio 值

Fig. 13 Ratio Value for Search Process of RTK Positioning Ambiguity

同样,对测试数据中的其他站点按照 0266 站的模式与各种物理参考站构成零基线进行 RTK 定位,统计结果如图 14 和图 15 所示。

经过统计,非差改正数转虚拟观测数据与物理参考站构成的虚拟零基线进行 RTK 定位的平均结果为:N 方向 0.004 m,E 方向 0.008 m,U 方向 0.011 m,平均固定率为 98.9%,充分验证了非差改正数等价变换为虚拟观测值模型的正确性,能够适用于常规 RTK 定位。

4 结 语

本文介绍了附加坐标约束的参考站 PPP-AR

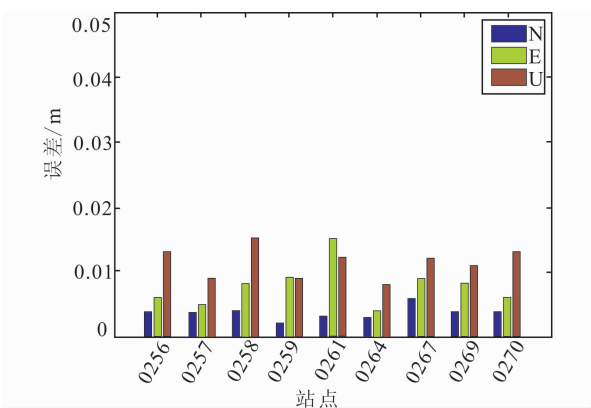


图 14 其他站点的虚拟零基线 RTK 结果
Fig. 14 RTK Results of Virtual Zero-baseline for Other Stations

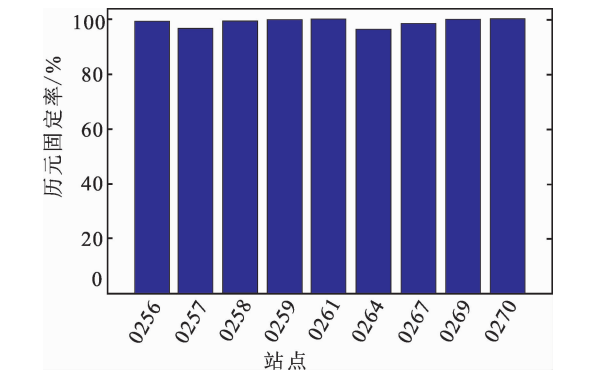


图 15 其他站点的虚拟零基线固定率
Fig. 15 Epoch Fixed Rate of Virtual Zero-baseline for Other Stations

及 RTK 部分模糊度固定理论,重点研究了非差改正数转换为虚拟观测值的等价变换模型,结合 SAPOS 网实测数据验证了算法的正确性及可靠性,从中得出了一些有益结论。

1)参考站进行 PPP-AR 模糊度固定,固定解的平均精度为:N 方向 0.016 m,E 方向 0.013 m,U 方向 0.037 m,平均固定率达到 97.3%,平均固定卫星为 6.9 颗(观测卫星为 7.4 颗);参考站获得了高精度、高可用率的 PPP-AR 结果,可满足获取非差改正数的需要。

2)采用虚拟零基线模式测试参考站非差改正数转虚拟观测值的可用性,得出虚拟零基线双差伪距观测值基本小于 2 cm,双差近似模糊度基本接近整数,偏差小于 0.15 周,说明本文所述的等价变换算法的正确性与有效性。

3)利用 RTK 算法对虚拟零基线进行测试,平均定位结果为:N 方向 0.004 m,E 方向 0.008 m,U 方向 0.011 m,平均固定率为 98.9%。充分验证了基于 PPP 技术的区域增强系统中提取的非差改正数经过等价变换为虚拟观测值的正确性,且表明该系统亦能够提供类似网络 RTK 系

统所提供的虚拟参考站服务,提升系统的兼容性。

参 考 文 献

[1] Ye ShiRong. Theory and Implementation of GPS Undifferenced Phase Precise Point Positioning [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002 (叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉:武汉大学,2002)

[2] Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Guo Fei, et al. Server-based Real-time Precise Point Positioning and Its Application [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2010, 53(6): 1 308-1 314 (张小红,李星星,郭斐,等. 基于服务系统的实时精密单点定位技术及应用研究[J]. 地球物理学报,2010, 53(6):1 308-1 314)

[3] Banville S, Langley R. Improving Real-Time Kinematic PPP with Instantaneous Cycle-Slip Correction [C]. Proceedings of ION GNSS 2009, GA, USA, 2009

[4] Caissy M. The IGS Real-Time Pilot Project-Perspective on Data and Product Generation [C]. Streaming GNSS Data via Internet Symposium, Frankfurt, Germany, 2006

[5] Chen K, Gao Y. Real-Time Precise Point Positioning Using Single Frequency Data [C]. Proceedings of ION GNSS-2005, Long Beach, CA, 2005

[6] Liu Jingnan, Ye Shirong. GPS Precise Point Positioning Using Undifferenced Phase Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(3): 234-240 (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)

[7] Muellerschoen R J, Bar-Sever Y E, Bertiger W I, et al. NASA's Global DGPS for High Precision Users [J]. *GPS World*, 2001, 12(1): 14-20

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

[9] Hatch R. The Promise of a Third Frequency [J]. *GPS World*, 1996, 7(5): 55-58;

[10] Zhang Xiaohong, Li Xingxing. A New Method for Zero-Differenced Interger Ambiguity Resolution and Its Application to PPP [J]. *Geomatics and Informations Science of Wuhan University*, 2010, 35 (6): 657-660 (张小红,李星星. 非差模糊度整数固定解 PPP 新方法及其实验[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2010, 35(6): 657-660)

[11] Dai L, Wang J, Rizos C. Predicting Atmospheric Biases for Real-Time Ambiguity Resolution in GPS/

GLONASS Reference Station Networks [J]. *J Geod*, 2005, 76(11-12): 617-628

[12] Gabor M J, Nerem R S. GPS Carrier Phase AR Using Satellite-Satellite Single Difference [C]. Proceedings of 12th Int Tech Meet Satellite Div Inst Navigation GPS, Nashville, TN, USA, 1999

[13] Zhang Baochen, Ou Jikun, Yuan Yunbin, et al. Precise Point Positioning (PPP) Algorithm Based on GPS Dual-frequency Raw Observations and Its Application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(5): 478-482(张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 基于 GPS 双频原始观测值的精密单点定位算法及应用[J]. *测绘学报*, 2010, 39(5): 478-482)

[14] Li Xingxing, Xu Yun, Wang Lei. Undifferenced Precise Satellite Clock Error Estimation and Precision Analysis[J]. *Geomatics and Informations Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 661-664(李星星, 徐运, 王磊. 非差导航卫星实时/事后精密钟差估计[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(6): 661-664)

[15] Li Xingxing, Zhang Xiaohong, Li Pan. PPP for Rapid Precise Positioning and Orbit Determination with Zero-Difference Integer Ambiguity Fixing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 833-840(李星星, 张小红, 李盼. 固定非差整数模糊度的 PPP 快速精密定位定轨[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 833-840)

[16] Collins P. Isolating and Estimating Undifferenced GPS Integer Ambiguities[C]. Proceedings of ION National Technical Meeting, California, USA, 2008

[17] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination[J]. *Navigation*, 2009, 56(2): 135-149

[18] Teunissen P J G. The Geometry-free GPS Ambiguity Search Space with a Weighted Ionosphere [J]. *J Geod*, 1997, 71(6): 370-383

Equivalence Transformation Theory from Zero-Difference PPP
Augmentation Information to Virtual Observation Data
for Differential Positioning

ZHANG Yong^{1,2} WANG Qing^{1,2} HUANG Yongjiang^{1,2}

1 School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China
2 Smart City Institute, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: According to the issue that zero-difference precise point positioning (PPP) augmentation information cannot be directly applied to real-time kinematic (RTK) relative positioning, this paper studies the method of obtaining the zero-difference correction information with PPP ambiguity resolution based on additional coordinate constraint in the reference station, establishes the model of equivalence transformation from zero-difference augmentation information to virtual observation data, and focuses on difference application of state space representation information in equivalence transformation. Experiment designed with real GNSS observation data proves correctness and availability of algorithm according to RTK ambiguity with partial ambiguity fixing technology. The results show that virtual zero-baseline can deliver a good accuracy positioning as same as the network RTK, thereby enabling high unification of regional augmentation system in terms of zone-difference and difference modes.

Key words: precise point positioning; ambiguity resolution; equivalence transformation; zero-difference regional augmentation; virtual observation data

First author: ZHANG Yong, PhD candidate, specializes in the theories and methods of GNSS precise positioning. E-mail: zhangyong1361@163.com

Corresponding author: WANG Qing, PhD, professor. E-mail: wq_seu@seu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 61601123.