



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115220078 A

(43) 申请公布日 2022. 10. 21

(21) 申请号 202211019062.8

(22) 申请日 2022.08.24

(71) 申请人 长沙金维信息技术有限公司  
地址 410000 湖南省长沙市高新开发区青  
山路662号芯城科技园二期14栋6楼  
601室

(72) 发明人 满小三 肖永平 何心怡 李元  
林佳

(74) 专利代理机构 长沙永星专利商标事务所  
(普通合伙) 43001  
专利代理师 周咏 米中业

(51) Int. Cl.  
G01S 19/44 (2010.01)

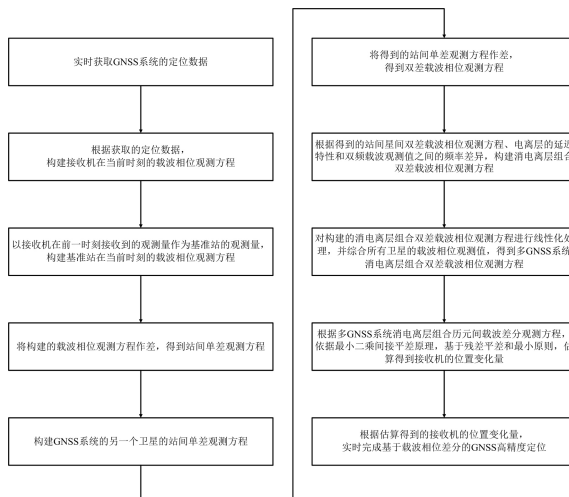
权利要求书5页 说明书11页 附图3页

(54) 发明名称

基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法及导航方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,包括实时获取定位数据;构建接收机在当前时刻的载波相位观测方程和基准站在当前时刻的载波相位观测方程并作差得到站间单差载波相位观测方程;构建另一个卫星的站间单差载波相位观测方程;得到站间星间双差载波相位观测方程;构建消电离层组合双差载波相位观测方程;得到多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程;估算得到GNSS接收机的位置变化量;实时完成基于载波相位差分的GNSS高精度定位。本发明还公开了一种包括所述基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法的导航方法。本发明能够同时满足网络正常和异常时的定位需求,可靠性高,精确性好。



1. 一种基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,其特征在于包括如下步骤:

S1. 实时获取GNSS系统的定位数据;

S2. 根据步骤S1获取的定位数据,构建接收机在当前时刻的载波相位观测方程;

S3. 以接收机在前一时刻接收到的观测量作为基准站的观测量,构建基准站在当前时刻的载波相位观测方程;

S4. 将步骤S3和步骤S2构建的载波相位观测方程作差,得到站间单差载波相位观测方程;

S5. 构建GNSS系统的另一个卫星的站间单差载波相位观测方程;

S6. 将步骤S5和步骤S4得到的站间单差观载波相位测方程作差,得到站间星间双差载波相位观测方程;

S7. 根据步骤S6得到的站间星间双差载波相位观测方程、电离层的延迟特性和双频载波观测值之间的频率差异,构建消电离层组合双差载波相位观测方程;

S8. 对步骤S7构建的消电离层组合双差载波相位观测方程进行线性化处理,并综合所有卫星的载波相位观测值,得到多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程;

S9. 根据步骤S8得到的多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程,依据最小二乘间接平差原理,基于残差平差和最小原则,估算得到GNSS接收机的位置变化量;

S10. 根据步骤S9估算得到的GNSS接收机的位置变化量,实时完成基于载波相位差分的GNSS高精度定位。

2. 根据权利要求1所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,其特征在于所述的步骤S2,具体包括如下步骤:

设定接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 接收到 $n$ 颗卫星的双频信号,此时,接收机 $r$ 和卫星 $P_i$ 在ECEF框架下的位置分别为 $(X_r, Y_r, Z_r)$ 和 $(X^{P_i}, Y^{P_i}, Z^{P_i})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ;则接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 接收到GNSS系统的卫星 $p$ 对应频率 $k$ 上的载波相位观测方程为:

$$\phi_{r,k}^p = \rho_r^p + c(dt_r - dt^p) + T_r^p - I_{r,k}^p + \lambda_k N_{r,k}^p + B_{r,k} - B_k^p + \varepsilon_{\phi 1}$$

式中下标 $r$ 为接收机,上标 $p, k$ 分别表示卫星号和频率号; $B$ 表示载波相位硬件延迟偏差; $\phi_{r,k}^p$ 为接收机 $r$ 观测到卫星 $p$ 在频率 $k$ 上的载波相位观测值; $\rho_r^p$ 为接收机 $r$ 到观测卫星 $p$ 的欧氏几何距离,且 $\rho_r^p = \sqrt{(X_r - X^p)^2 + (Y_r - Y^p)^2 + (Z_r - Z^p)^2}$ ;  $c$ 为光速; $dt_r$ 为接收机钟差; $dt^p$ 为卫星 $p$ 的钟差; $T_r^p$ 为对流层延迟; $I_{r,k}^p$ 为对应频率 $k$ 上的电离层延迟; $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长; $N_{r,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 对应接收机 $r$ 在频率 $k$ 上的非差整周模糊度; $B_{r,k}$ 为接收机 $r$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $B_k^p$ 为观测卫星 $p$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $\varepsilon_{\phi 1}$ 为载波相位观测量的噪声。

3. 根据权利要求2所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,其特征在于所述的步骤S3,具体包括如下步骤:

以接收机 $r$ 在某时刻 $t_1$ 前一历元 $t_0$ 时刻接收到的观测量作为基准站的观测量,基准站在ECEF框架下的位置为 $t_0$ 时刻接收机 $r$ 的位置,并作为虚拟基准站 $b$ ,位置为 $(X_b, Y_b, Z_b)$ ;  $t_1$ 为差分数据丢失的第一个历元; $t_0$ 为差分数据丢失前的最后一个历元,且为RTK固定解;则基

准站**b**接收到的观测卫星

对应频率k上的载波相位观测方程为:

$$\phi_{b,k}^p = \rho_b^p + c(dt_b - dt^p) + T_b^p - I_{b,k}^p + \lambda_k N_{b,k}^p + B_{b,k} - B_k^p + \varepsilon_{\phi 2}$$

式中  $\phi_{b,k}^p$  为基准站**b**对应观测卫星

频率k上的相位观测值;  $\rho_b^p$  为基准站**b**至观测卫星

的欧氏距离;  $c$  为光速;  $dt_b$  为基准站接收机钟差;  $dt^p$  为观测卫星

的钟差;  $T_b^p$  为基准站**b**相位观测测量中的对流层延迟;  $I_{b,k}^p$  为基准站**b**相位观测测量对应频率k的电离层延迟;  $\lambda_k$  为频率k对应的波长;  $N_{b,k}^p$  为观测卫星

对应基准站**b**在频率k上的非差整周模糊度;  $B_{b,k}$  为基准站**b**对频率k信号的载波相位硬件延迟;  $B_k^p$  为观测卫星

对频率k信号的载波相位硬件延迟;  $\varepsilon_{\phi 2}$  为载波相位观测测量的噪声。

4. 根据权利要求3所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,其特征在于所述的步骤S4,具体可得到的站间单差载波相位观测方程为

$$\phi_{br,k}^p = \rho_{br}^p + cdt_{br} + T_{br}^p - I_{br,k}^p + \lambda_k N_{br,k}^p + B_{br,k} + \varepsilon_{\phi 3}$$

式中  $\phi_{br,k}^p$  为观测卫星

频率k上的站间单差观测值;  $\rho_{br}^p$  为卫星

对应接收机r和基准站b的站星间距离之差;  $c$  为光速;  $dt_{br}$  为接收机钟差和基准站钟差之差;  $T_{br}^p$  为观测卫星

对应接收机r和基准站b的对流层延迟之差;  $I_{br,k}^p$  为观测卫星

频率k上的电离层延迟;  $\lambda_k$  为频率k对应的波长;  $N_{br,k}^p$  为观测卫星

对应接收机r和基准站b的站间单差整周模糊度;  $B_{br,k}$  为接收机r和基准站b在频率k上的载波相位硬件延迟之差;  $\varepsilon_{\phi 3}$  为站间单差载波相位观测测量的噪声。

5. 根据权利要求4所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,其特征在于所述的步骤S5,具体为选择GNSS系统的另一个卫星q,构建卫星q的站间单差观测方程:

$$\phi_{br,k}^q = \rho_{br}^q + cdt_{br} + T_{br}^q - I_{br,k}^q + \lambda_k N_{br,k}^q + B_{br,k} + \varepsilon_{\phi 4}$$

式中  $\phi_{br,k}^q$  为观测卫星q频率k上的站间单差观测值;  $\rho_{br}^q$  为卫星q对应接收机r和基准站b的站星间距离之差;  $c$  为光速;  $dt_{br}$  为接收机钟差和基准站钟差之差;  $T_{br}^q$  为观测卫星q对应接收机r和基准站b的对流层延迟之差;  $I_{br,k}^q$  为观测卫星q频率k上的电离层延迟;  $\lambda_k$  为频率k对应的波长;  $N_{br,k}^q$  为观测卫星q对应接收机r和基准站b在频率k上的站间单差整周模糊度;  $B_{br,k}$  为为接收机r和基准站b在频率k上的载波相位硬件延迟之差;  $\varepsilon_{\phi 4}$  为站间单差载波相位观测测量的噪声。

6. 根据权利要求5所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,其特征在于所述的步骤S6,具体得到的站间星间双差载波相位观测方程为:

$$\phi_{br,k}^{pq} = \rho_{br}^{pq} + T_{br}^{pq} - I_{br,k}^{pq} + \lambda_k N_{br,k}^{pq} + \varepsilon_{\phi 5}$$

式中  $\phi_{br,k}^{pq}$  为站间星间频率k上的双差载波相位观测值;  $\rho_{br}^{pq}$  为站间星间的双差几何距离;  $T_{br}^{pq}$  为站间星间双差的对流层延迟;  $I_{br,k}^{pq}$  为站间星间双差的电离层延迟;  $\lambda_k$  为频率k对应的波长;  $N_{br,k}^{pq}$  为观测卫星p和观测卫星q对应接收机r和基准站b在频率k上的双差整周模

糊度； $\varepsilon_{\phi 5}$ 为双差载波相位观测量的噪声。

7. 根据权利要求6所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法，其特征在于所述的步骤S7，具体包括如下步骤：

电离层延迟值的大小与载波频率 $f$ 的平方成反比；为消除电离层延迟误差的影响，利用双频载波观测值之间的频率差异，构建消电离层组合双差载波相位观测方程：

根据电离层延迟特性，存在：

$$\frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} I_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} I_{br,k2}^{pq} = 0$$

式中 $f_{k1}$ 为GNSS系统的1号频点的频率； $f_{k2}$ 为GNSS系统的2号频点的频率； $I_{br,k1}^{pq}$ 为频率 $f_{k1}$ 对应的站间星间双差电离层延迟； $I_{br,k2}^{pq}$ 为频率 $f_{k2}$ 对应的站间星间双差电离层延迟；

然后，计算得到消电离层组合双差载波相位观测方程为：

$$\begin{aligned} & \frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k2}^{pq} \\ & = (\rho_{br}^{pq} + T_{br}^{pq}) + \frac{c}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \cdot (f_{k1} N_{br,k1}^{pq} - f_{k2} N_{br,k2}^{pq}) + \varepsilon_{\phi 6} \end{aligned}$$

式中 $\phi_{br,k1}^{pq}$ 为站间星间频率 $f_{k1}$ 上的双差载波相位观测值； $\phi_{br,k2}^{pq}$ 为站间星间频率 $f_{k2}$ 上的双差载波相位观测值； $\rho_{br}^{pq}$ 为站间星间双差几何距离； $T_{br}^{pq}$ 为站间星间双差对流层延迟； $c$ 为光速； $N_{br,k1}^{pq}$ 为观测卫星 $p$ 和观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k1$ 上的双差整周模糊度； $N_{br,k2}^{pq}$ 为观测卫星 $p$ 和观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k2$ 上的双差整周模糊度； $\varepsilon_{\phi 6}$ 为消电离层组合双差载波相位观测量的噪声。

8. 根据权利要求7所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法，其特征在于所述的步骤S8，具体包括如下步骤：

对构建的消电离层组合双差载波相位观测方程，将已知项与可改正项移至方程的左侧，将未知项移至方程的右侧，得到如下观测方程：

$$y_{br,IF}^{pq} = (\rho_{r0}^{pq} - \rho_r^{pq}) + \lambda_{IF} \cdot (f_{k1} N_{br,k1}^{pq} - f_{k2} N_{br,k2}^{pq}) + \varepsilon_{\phi}$$

式中 $y_{br,IF}^{pq}$ 为消电离层组合双差载波相位量残差，且

$y_{br,IF}^{pq} = \frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k2}^{pq} - T_{br}^{pq} - (\rho_b^{pq} - \rho_{r0}^{pq})$ ， $\phi_{br,k1}^{pq}$ 为站星间频率 $f_{k1}$ 上的双差载波相位观测值， $\phi_{br,k2}^{pq}$ 为站星间频率 $f_{k2}$ 上的双差载波相位观测值， $T_{br}^{pq}$ 为站间星间双差的电离层延迟， $\rho_b^{pq}$ 为基准站 $b$ 对应卫星 $p$ 和 $q$ 的站星间距离之差， $\rho_{r0}^{pq}$ 为接收机 $r$ 的近似位置对应卫星 $p$ 和 $q$ 的站星间几何距离之差， $\rho_{r0}^{pq}$ 的计算公式为

$$\rho_{r0}^{pq} = \sqrt{(X_{r0} - X^p)^2 + (Y_{r0} - Y^p)^2 + (Z_{r0} - Z^p)^2} - \sqrt{(X_{r0} - X^q)^2 + (Y_{r0} - Y^q)^2 + (Z_{r0} - Z^q)^2}$$

$r0$ 表示接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 的近似坐标的对应标记， $(X_{r0}, Y_{r0}, Z_{r0})$ 为接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 的近似坐

标,  $\rho_b^{pq}$  的计算公式为  $\rho_b^{pq} = \frac{\sqrt{(X_b - X^p)^2 + (Y_b - Y^p)^2 + (Z_b - Z^p)^2}}{-\sqrt{(X_b - X^q)^2 + (Y_b - Y^q)^2 + (Z_b - Z^q)^2}}$ ;  $\rho_r^{pq}$  为接收机  $r$  的实际位置对

应卫星  $p$  和  $q$  的站星间几何距离之差;  $\lambda_{IF}$  为简化项, 且  $\lambda_{IF} = \frac{c}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2}$ ,  $c$  为光速;  $N_{br,k1}^{pq}$

为观测卫星  $p$  和观测卫星  $q$  对应接收机  $r$  和基准站  $b$  在频率  $k1$  上的双差整周模糊度;  $N_{br,k2}^{pq}$  为观测卫星  $p$  和观测卫星  $q$  对应接收机  $r$  和基准站  $b$  在频率  $k2$  上的双差整周模糊度;  $\varepsilon_\phi$  为消电离层组合双差载波相位观测量的噪声;

将观测方程中的右侧部分进行线性化, 得到

$$y_{br,IF}^{pq} = H_{br,IF}^{pq} x + v_{br,IF}^{pq}$$

式中  $H_{br,IF}^{pq}$  为待估参数的设计矩阵, 且  $H_{br,IF}^{pq} = [l_r^p - l_r^q \quad m_r^p - m_r^q \quad n_r^p - n_r^q \quad \lambda_{IF} \cdot f_{k1} \quad -\lambda_{IF} \cdot f_{k2}]$ ,  $l_r^p$  为接收机  $r$  与卫星  $p$  视线方向在  $X$  方向的投影值,  $l_r^q$  为接收机  $r$  与卫星  $q$  视线方向在  $X$  方向的投影值,  $m_r^p$  为接收机  $r$  与卫星  $p$  视线方向在  $Y$  方向的投影值,  $m_r^q$  为接收机  $r$  与卫星  $q$  视线方向在  $Y$  方向的投影值,  $n_r^p$  为接收机  $r$  与卫星  $p$  视线方向在  $Z$  方向的投影值,  $n_r^q$  为接收机  $r$  与卫星  $q$  视线方向在  $Z$  方向的投影值,  $l_r^i = (X^i - X_{r0}) / \rho_{r0}^i$ ,  $m_r^i = (Y^i - Y_{r0}) / \rho_{r0}^i$ ,  $n_r^i = (Z^i - Z_{r0}) / \rho_{r0}^i$ ,  $i$  对应于卫星号且取值为  $p$  或  $q$ ,  $(X^i, Y^i, Z^i)$  为卫星  $i$  在  $t_1$  时刻的位置坐标;  $x$  为待估参数,  $x = [dx \quad dy \quad dz \quad N_{br,k1}^{pq} \quad N_{br,k2}^{pq}]^T$ ,  $dx$  为  $X$  方向的改正数,  $dy$  为  $Y$  方向的改正数,  $dz$  为  $Z$  方向的改正数;  $v_{br,IF}^{pq}$  为消电离层组合双差载波观测量的噪声;

综合多GNSS系统的载波相位观测值, 得到多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程为:

$$V_{GNSS} = H_{GNSS} x - y_{GNSS}, P_{GNSS}$$

$$\begin{cases} V_{GNSS} = [V_{GPS} & V_{GLONASS} & V_{GALILEO} & V_{BDS} & V_{QZSS} & V_{NAVIC}]^T \\ H_{GNSS} = [H_{GPS} & H_{GLONASS} & H_{GALILEO} & H_{BDS} & H_{QZSS} & H_{NAVIC}]^T \\ y_{GNSS} = [y_{GPS} & y_{GLONASS} & y_{GALILEO} & y_{BDS} & y_{QZSS} & y_{NAVIC}]^T \\ P_{GNSS} = \text{diag}[P_{GPS} & P_{GLONASS} & P_{GALILEO} & P_{BDS} & P_{QZSS} & P_{NAVIC}]^T \end{cases}$$

式中, 下标GNSS表示GPS, GLONASS, GALILEO, BDS, QZSS或NAVIC系统的组合;  $y$  为消电离层组合双差载波相位残差,  $H$  为待估参数的设计矩阵,  $V$  为消电离层组合双差载波相位量的噪声矩阵;  $x$  为待估参数, 为位置的变化量;  $P$  为消电离层组合双差载波相位量的权矩阵。

9. 根据权利要求8所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法, 其特征在于所述的步骤S9, 具体包括如下步骤:

根据最小二乘间接平差原理, 基于其残差平差和最小的原则, 得到待估算的位置变化量  $x$  为  $x = (H^T P H)^{-1} \cdot H^T P y$ ,  $H$  为待估参数的设计矩阵,  $P$  为观测量的权矩阵,  $y$  为观测量的残差矩阵;

所述的步骤S10,具体包括如下步骤:

将步骤S9估算得到的位置变化量 $x$ ,与前一时刻的接收机的实时位置进行叠加,得到当前时刻接收机的估算位置,从而完成基于载波相位差分的GNSS高精度定位。

10.一种包括了权利要求1~9之一所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法的导航方法,其特征在于具体包括如下步骤:

- a. 实时获取GNSS系统的定位数据;
- b. 采用权利要求1~9之一所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法进行实时定位;
- c. 根据步骤b的实时定位结果,实时进行导航。

## 基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法及导航方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于导航技术领域,具体涉及一种基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法及导航方法。

### 背景技术

[0002] 随着经济技术的发展和人们生活水平的提高,定位及导航技术已经广泛应用于人们的生产和生活当中,给人们的生产和生活带来了无尽的便利。因此,保障定位及导航技术的精度,就成为了定位导航系统最重要的任务之一。

[0003] 近年来,车辆导航定位、无人机的自动驾驶、惯性导航系统的校准、精细农业以及航空重力测量等领域对高精度动态位置测量的应用需求蓬勃增长,GNSS(Global Navigation Satellite System,全球导航卫星系统) RTK(Real-time kinematic,实时动态)定位方法因其全天候、全球覆盖、方便灵活、低成本、高精度等优点成为获取位置信息的一种普遍手段。目前,结合基准站传递的差分数据,GNSS RTK定位基本能够达到厘米级的定位精度。

[0004] 但是,由于测量环境中存在强电磁波干扰,网络硬件故障或网络信号中断等问题,经常会导致GNSS差分数据丢失。在这种情况下,一般就只能继续进行无需差分数据的SPP定位(Standard point positioning,标准单点定位)。但是标准单点定位的定位精度只有米级,显然难以满足高精度动态领域的应用需求。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的之一在于提供一种适用于异常状态下,而且可靠性高、精确性好的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法。

[0006] 本发明的目的之二在于提供一种包括了所述基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法的导航方法。

[0007] 本发明提供的这种基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,包括如下步骤:

- S1. 实时获取GNSS系统的定位数据;
- S2. 根据步骤S1获取的定位数据,构建接收机在当前时刻的载波相位观测方程;
- S3. 以接收机在前一时刻接收到的观测量作为基准站的观测量,构建基准站在当前时刻的载波相位观测方程;
- S4. 将步骤S3和步骤S2构建的载波相位观测方程作差,得到站间单差载波相位观测方程;
- S5. 构建GNSS系统的另一个卫星的站间单差载波相位观测方程;
- S6. 将步骤S5和步骤S4得到的站间单差观载波相位测方程作差,得到站间星间双差载波相位观测方程;
- S7. 根据步骤S6得到的站间星间双差载波相位观测方程、电离层的延迟特性和双频载波观测值之间的频率差异,构建消电离层组合双差载波相位观测方程;

S8. 对步骤S7构建的消电离层组合双差载波相位观测方程进行线性化处理,并综合所有卫星的载波相位观测值,得到多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程;

S9. 根据步骤S8得到的多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程,依据最小二乘间接平差原理,基于残差平差和最小原则,估算得到GNSS接收机的位置变化量;

S10. 根据步骤S9估算得到的GNSS接收机的位置变化量,实时完成基于载波相位差分的GNSS高精度定位。

[0008] 所述的步骤S2,具体包括如下步骤:

设定接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 接收到 $n$ 颗卫星的双频信号,此时,接收机 $r$ 和卫星 $P_i$ 在ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed,地心地固坐标系) 框架下的位置分别为 $(X_r, Y_r, Z_r)$ 和 $(X^{P_i}, Y^{P_i}, Z^{P_i})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ;则接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 接收到GNSS系统的卫星 $p$ 对应频率 $k$ 上的载波相位观测方程为:

$$\phi_{r,k}^p = \rho_r^p + c(dt_r - dt^p) + T_r^p - I_{r,k}^p + \lambda_k N_{r,k}^p + B_{r,k} - B_k^p + \varepsilon_{\phi 1}$$

式中下标 $r$ 为接收机,上标 $p, k$ 分别表示卫星号和频率号; $B$ 表示载波相位硬件延迟偏差; $\phi_{r,k}^p$ 为接收机 $r$ 观测到卫星 $p$ 在频率 $k$ 上的载波相位观测值; $\rho_r^p$ 为接收机 $r$ 到观测卫星 $p$ 的欧氏几何距离,且 $\rho_r^p = \sqrt{(X_r - X^p)^2 + (Y_r - Y^p)^2 + (Z_r - Z^p)^2}$ ;  $c$ 为光速; $dt_r$ 为接收机钟差; $dt^p$ 为卫星 $p$ 的钟差; $T_r^p$ 为对流层延迟; $I_{r,k}^p$ 为对应频率 $k$ 上的电离层延迟; $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长; $N_{r,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 对应接收机 $r$ 在频率 $k$ 上的非差整周模糊度; $B_{r,k}$ 为接收机 $r$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $B_k^p$ 为观测卫星 $p$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $\varepsilon_{\phi 1}$ 为载波相位观测量的噪声。

[0009] 所述的步骤S3,具体包括如下步骤:

以接收机 $r$ 在某时刻 $t_1$  (差分数据丢失的第一个历元) 前一历元 $t_0$ 时刻 (差分数据丢失前的最后一个历元,且为RTK固定解) 接收到的观测量作为基准站的观测量,基准站在ECEF框架下的位置为 $t_0$ 时刻接收机 $r$ 的位置,并作为虚拟基准站 $b$ ,位置为 $(X_b, Y_b, Z_b)$ ;则基准站 $b$ 接收到的观测卫星 $p$ 对应频率 $k$ 上的载波相位观测方程为:

$$\phi_{b,k}^p = \rho_b^p + c(dt_b - dt^p) + T_b^p - I_{b,k}^p + \lambda_k N_{b,k}^p + B_{b,k} - B_k^p + \varepsilon_{\phi 2}$$

式中 $\phi_{b,k}^p$ 为基准站 $b$ 对应观测卫星 $p$ 频率 $k$ 上的相位观测值; $\rho_b^p$ 为基准站 $b$ 至观测卫星 $p$ 的欧氏距离; $c$ 为光速; $dt_b$ 为基准站接收机钟差; $dt^p$ 为观测卫星 $p$ 的钟差; $T_b^p$ 为基准站 $b$ 相位观测量中的对流层延迟; $I_{b,k}^p$ 为基准站 $b$ 相位观测量对应频率 $k$ 的电离层延迟; $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长; $N_{b,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 对应基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的非差整周模糊度; $B_{b,k}$ 为基准站 $b$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $B_k^p$ 为观测卫星 $p$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $\varepsilon_{\phi 2}$ 为载波相位观测量的噪声。

[0010] 所述的步骤S4,具体可得到的站间单差载波相位观测方程为

$$\phi_{br,k}^p = \rho_{br}^p + cdt_{br} + T_{br}^p - I_{br,k}^p + \lambda_k N_{br,k}^p + B_{br,k} + \varepsilon_{\phi 3}$$

式中 $\phi_{br,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 频率 $k$ 上的站间单差观测值; $\rho_{br}^p$ 为卫星 $p$ 对应接收机 $r$ 和基准



站 $b$ 的站星间距离之差； $c$ 为光速； $dt_{br}$ 为接收机钟差和基准站钟差之差； $T_{br}^p$ 为观测卫星 $p$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的对流层延迟之差； $I_{br,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 频率 $k$ 上的电离层延迟； $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长； $N_{br,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的站间单差整周模糊度； $B_{br,k}$ 为接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的载波相位硬件延迟之差； $\varepsilon_{\phi 3}$ 为站间单差载波相位观测量的噪声。

[0011] 所述的步骤S5,具体为选择GNSS系统的另一个卫星 $q$ ,构建卫星 $q$ 的站间单差观测方程:

$$\phi_{br,k}^q = \rho_{br}^q + cdt_{br} + T_{br}^q - I_{br,k}^q + \lambda_k N_{br,k}^q + B_{br,k} + \varepsilon_{\phi 4}$$

式中 $\phi_{br,k}^q$ 为观测卫星 $q$ 频率 $k$ 上的站间单差观测值； $\rho_{br}^q$ 为卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的站星间距离之差； $c$ 为光速； $dt_{br}$ 为接收机钟差和基准站钟差之差； $T_{br}^q$ 为观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的对流层延迟之差； $I_{br,k}^q$ 为观测卫星 $q$ 频率 $k$ 上的电离层延迟； $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长； $N_{br,k}^q$ 为观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的站间单差整周模糊度； $B_{br,k}$ 为为接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的载波相位硬件延迟之差； $\varepsilon_{\phi 4}$ 为站间单差载波相位观测量的噪声。

[0012] 所述的步骤S6,具体得到的站间星间双差载波相位观测方程为

$$\phi_{br,k}^{pq} = \rho_{br}^{pq} + T_{br}^{pq} - I_{br,k}^{pq} + \lambda_k N_{br,k}^{pq} + \varepsilon_{\phi 5}$$

式中 $\phi_{br,k}^{pq}$ 为站间星间频率 $k$ 上的双差载波相位观测值； $\rho_{br}^{pq}$ 为站间星间的双差几何距离； $T_{br}^{pq}$ 为站间星间双差的对流层延迟； $I_{br,k}^{pq}$ 为站间星间双差的电离层延迟； $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长； $N_{br,k}^{pq}$ 为观测卫星 $p$ 和观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的双差整周模糊度； $\varepsilon_{\phi 5}$ 为双差载波相位观测量的噪声。

[0013] 所述的步骤S7,具体包括如下步骤:

电离层延迟值的大小与载波频率 $f$ 的平方成反比；为消除电离层延迟误差的影响，利用双频载波观测值之间的频率差异，构建消电离层组合双差载波相位观测方程：

根据电离层延迟特性，存在：

$$\frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} I_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} I_{br,k2}^{pq} = 0$$

式中 $f_{k1}$ 为GNSS系统的1号频点的频率； $f_{k2}$ 为GNSS系统的2号频点的频率； $I_{br,k1}^{pq}$ 为频率 $f_{k1}$ 对应的站间星间双差电离层延迟； $I_{br,k2}^{pq}$ 为频率 $f_{k2}$ 对应的站间星间双差电离层延迟；

然后，计算得到消电离层组合双差载波相位观测方程为：

$$\begin{aligned} & \frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k2}^{pq} \\ & = (\rho_{br}^{pq} + T_{br}^{pq}) + \frac{c}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \cdot (f_{k1} N_{br,k1}^{pq} - f_{k2} N_{br,k2}^{pq}) + \varepsilon_{\phi 6} \end{aligned}$$

式中  $\phi_{br,k1}^{pq}$  为站间星间频率  $f_{k1}$  上的双差载波相位观测值； $\phi_{br,k2}^{pq}$  为站间星间频率  $f_{k2}$  上的双差载波相位观测值； $\rho_{br}^{pq}$  为站间星间双差几何距离； $T_{br}^{pq}$  为站间星间双差对流层延迟； $c$  为光速； $N_{br,k1}^{pq}$  为观测卫星  $p$  和观测卫星  $q$  对应接收机  $r$  和基准站  $b$  在频率  $k1$  上的双差整周模糊度； $N_{br,k2}^{pq}$  为观测卫星  $p$  和观测卫星  $q$  对应接收机  $r$  和基准站  $b$  在频率  $k2$  上的双差整周模糊度； $\varepsilon_{\phi 6}$  为消电离层组合双差载波相位观测量的噪声。

[0014] 所述的步骤S8,具体包括如下步骤:

对构建的消电离层组合双差载波相位观测方程,将已知项与可改正项移至方程的左侧,将未知项移至方程的右侧,得到如下观测方程:

$$y_{br,IF}^{pq} = (\rho_{r0}^{pq} - \rho_r^{pq}) + \lambda_{IF} \cdot (f_{k1} N_{br,k1}^{pq} - f_{k2} N_{br,k2}^{pq}) + \varepsilon_{\phi}$$

式中  $y_{br,IF}^{pq}$  为消电离层组合双差载波相位量残差,且

$$y_{br,IF}^{pq} = \frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k2}^{pq} - T_{br}^{pq} - (\rho_b^{pq} - \rho_{r0}^{pq}), \phi_{br,k1}^{pq}$$

为站星间频率  $f_{k1}$  上的双差载波相位观测值,  $\phi_{br,k2}^{pq}$  为站星间频率  $f_{k2}$  上的双差载波相位观测值,  $T_{br}^{pq}$  为站间星间双差的电离层延迟,  $\rho_b^{pq}$  为基准站  $b$  对应卫星  $p$  和  $q$  的站星间距离之差,  $\rho_{r0}^{pq}$  为接收机  $r$  的近似位置对应卫星

$p$  和  $q$  的站星间几何距离之差,  $\rho_{r0}^{pq}$  的计算公式为  $\rho_{r0}^{pq} = \frac{\sqrt{(X_{r0} - X^p)^2 + (Y_{r0} - Y^p)^2 + (Z_{r0} - Z^p)^2}}{\sqrt{(X_{r0} - X^q)^2 + (Y_{r0} - Y^q)^2 + (Z_{r0} - Z^q)^2}}, r0$

表示接收机  $r$  在时刻  $t_1$  的近似坐标的对应标记,  $(X_{r0}, Y_{r0}, Z_{r0})$  为接收机  $r$  在时刻  $t_1$  的近似坐标,

$\rho_b^{pq}$  的计算公式为  $\rho_b^{pq} = \frac{\sqrt{(X_b - X^p)^2 + (Y_b - Y^p)^2 + (Z_b - Z^p)^2}}{\sqrt{(X_b - X^q)^2 + (Y_b - Y^q)^2 + (Z_b - Z^q)^2}}; \rho_r^{pq}$  为接收机  $r$  的实际位置对应卫星  $p$

和  $q$  的站星间几何距离之差;  $\lambda_{IF}$  为简化项,且  $\lambda_{IF} = \frac{c}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2}$ ,  $c$  为光速;  $N_{br,k1}^{pq}$  为观测

卫星  $p$  和观测卫星  $q$  对应接收机  $r$  和基准站  $b$  在频率  $k1$  上的双差整周模糊度;  $N_{br,k2}^{pq}$  为观测卫星  $p$  和观测卫星  $q$  对应接收机  $r$  和基准站  $b$  在频率  $k2$  上的双差整周模糊度;  $\varepsilon_{\phi}$  为消电离层组合双差载波相位观测量的噪声;

将观测方程中的右侧部分进行线性化,得到

$$y_{br,IF}^{pq} = H_{br,IF}^{pq} x + v_{br,IF}^{pq}$$

式中  $H_{br,IF}^{pq}$  为待估参数的设计矩阵,且  $H_{br,IF}^{pq} = [l_r^p - l_r^q \quad m_r^p - m_r^q \quad n_r^p - n_r^q \quad \lambda_{IF} \cdot f_{k1} \quad -\lambda_{IF} \cdot f_{k2}]$ ,

$l_r^p$  为接收机  $r$  与卫星  $p$  视线方向在  $X$  方向的投影值,  $l_r^q$  为接收机  $r$  与卫星  $q$  视线方向在  $X$  方向

的投影值,  $m_r^p$  为接收机  $r$  与卫星  $p$  视线方向在  $Y$  方向的投影值,  $m_r^q$  为接收机  $r$  与卫星  $q$  视线方向在  $Y$  方向的投影值,  $n_r^p$  为接收机  $r$  与卫星  $p$  视线方向在  $Z$  方向的投影值,  $n_r^q$  为接收机  $r$  与卫星  $q$  视线方向在  $Z$  方向的投影值,  $l_r^i = (X^i - X_{r0}) / \rho_{r0}^i$ ,  $m_r^i = (Y^i - Y_{r0}) / \rho_{r0}^i$ ,  $n_r^i = (Z^i - Z_{r0}) / \rho_{r0}^i$ ,  $i$  对应于卫星号且取值为  $p$  或  $q$ ,  $(X^i, Y^i, Z^i)$  为卫星  $i$  在  $t_1$  时刻的位置坐标;  $x$  为待估参数,  $x = [dx \ dy \ dz \ N_{br,k1}^{pq} \ N_{br,k2}^{pq}]^T$ ,  $dx$  为  $X$  方向的改正数,  $dy$  为  $Y$  方向的改正数,  $dz$  为  $Z$  方向的改正数;  $v_{br,IF}^{pq}$  为消电离层组合双差载波观测量的噪声;

以 GPS 系统为例, 设定  $t_1$  时刻, 接收机  $r$  接收到  $n$  颗卫星的双频载波观测量; 在上一历元  $t_0$  时刻, 接收机  $r$  同样接收到了该  $n$  颗卫星的双频载波观测量, 且该  $n$  颗卫星均未发生周跳或者进行了周跳修复, 则变量  $N_{br,k1}^{pq}$  和  $N_{br,k2}^{pq}$  为 0; 则线性化后的消电离层组合双差载波相位观测方程矩阵形式可表示如下:

$$V_{GPS} = H_{GPS}x - y_{GPS}, P_{GPS}$$

$$H_{GPS} = \begin{bmatrix} l_r^{g1} - l_r^{g2} & m_r^{g1} - m_r^{g2} & n_r^{g1} - n_r^{g2} \\ l_r^{g1} - l_r^{g3} & m_r^{g1} - m_r^{g3} & n_r^{g1} - n_r^{g3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_r^{g1} - l_r^{gn} & m_r^{g1} - m_r^{gn} & n_r^{g1} - n_r^{gn} \end{bmatrix}$$

$$x_k^{pq} = [dx \ dy \ dz]^T$$

$$y_{GPS} = [y_{GPS}^{g1g2} \ y_{GPS}^{g1g3} \ \cdots \ y_{GPS}^{g1gn}]^T$$

$$V_{GPS} = [V_{GPS}^{g1g2} \ V_{GPS}^{g1g3} \ \cdots \ V_{GPS}^{g1gn}]^T$$

其中  $V_{GPS}$  为观测量噪声, 且  $V_{GPS} = [V_{GPS}^{g1g2} \ V_{GPS}^{g1g3} \ \cdots \ V_{GPS}^{g1gn}]^T$ ,  $g_i$  为对应于接收到的 GPS 系统的第  $i$  颗卫星,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $V_{GPS}^{g1gi}$  为对应于接收到的 GPS 系统第 1 颗卫星与第  $i$  颗卫星的消电离层组合双差载波相位观测量的噪声;  $H_{GPS}$  为待估参数的设计矩阵, 且

$$H_{GPS} = \begin{bmatrix} l_r^{g1} - l_r^{g2} & m_r^{g1} - m_r^{g2} & n_r^{g1} - n_r^{g2} \\ l_r^{g1} - l_r^{g3} & m_r^{g1} - m_r^{g3} & n_r^{g1} - n_r^{g3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_r^{g1} - l_r^{gn} & m_r^{g1} - m_r^{gn} & n_r^{g1} - n_r^{gn} \end{bmatrix}; x \text{ 为待估参数, 且 } x = [dx \ dy \ dz]^T; y_{GPS} \text{ 为消电离层组合双}$$

差载波相位的残差, 且  $y_{GPS} = [y_{GPS}^{g1g2} \ y_{GPS}^{g1g3} \ \cdots \ y_{GPS}^{g1gn}]^T$ ,  $P_{GPS}$  为消电离层组合双差载波相位观测量的权矩阵;

综合多 GNSS 系统的载波相位观测值, 得到多 GNSS 系统消电离层组合双差载波相位观测方程为:

$$V_{GNSS} = H_{GNSS}x - y_{GNSS}, P_{GNSS}$$

$$\begin{cases} V_{GNSS} = [V_{GPS} & V_{GLONASS} & V_{GALILEO} & V_{BDS} & V_{QZSS} & V_{NAVIC}]^T \\ H_{GNSS} = [H_{GPS} & H_{GLONASS} & H_{GALILEO} & H_{BDS} & H_{QZSS} & H_{NAVIC}]^T \\ y_{GNSS} = [y_{GPS} & y_{GLONASS} & y_{GALILEO} & y_{BDS} & y_{QZSS} & y_{NAVIC}]^T \\ P_{GNSS} = \text{diag}[P_{GPS} & P_{GLONASS} & P_{GALILEO} & P_{BDS} & P_{QZSS} & P_{NAVIC}]^T \end{cases}$$

式中,下标GNSS表示GPS, GLONASS, GALILEO, BDS, QZSS或NAVIC系统的组合;  $y$ 为消电离层组合双差载波相位残差,  $H$ 为待估参数的设计矩阵,  $V$ 为消电离层组合双差载波相位量的噪声矩阵;  $x$ 为待估参数(位置的变化量),  $P$ 为消电离层组合双差载波相位量的权矩阵。

[0015] 所述的步骤S9,具体包括如下步骤:

根据最小二乘间接平差原理,基于其残差平差和最小的原则,得到待估算的位置变化量 $x$ 为 $x = (H^T P H)^{-1} \cdot H^T P y$ ,  $H$ 为待估参数的设计矩阵,  $P$ 为观测量的权矩阵,  $y$ 为观测量的残差矩阵。

[0016] 所述的步骤S10,具体包括如下步骤:

将步骤S9估算得到的位置变化量 $x$ ,与前一时刻的接收机的实时位置进行叠加,得到当前时刻接收机的估算位置,从而完成基于载波相位差分的GNSS高精度定位。

[0017] 本发明还提供了一种包括了所述基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法的导航方法,具体包括如下步骤:

- a. 实时获取GNSS系统的定位数据;
- b. 采用所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法进行实时定位;
- c. 根据步骤b的实时定位结果,实时进行导航。

[0018] 本发明提供的这种基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法及导航方法,从差分数据丢失开始,以前一历元数据作为基准站数据,当前历元数据作为接收机数据,并采用消电离层组合,进行差分定位,精确估计GNSS定位的 $t_0$ 到 $t_1$ 历元之间的位置变化量,从而获取当前时刻的精确位置;因此,本发明既能够满足网络不稳定等异常情况所导致的GNSS差分数据丢失时的定位和导航需求,又能够满足正常情况下的GNSS差分数据未丢失时的精确可靠的定位和导航需求,而且本发明的可靠性高,精确性好。

## 附图说明

[0019] 图1为本发明的定位方法的方法流程示意图。

[0020] 图2为本发明的导航方法的方法流程示意图。

[0021] 图3为本发明的定位方法与现有定位方法在实施例一种的定位精度对比示意图。

[0022] 图4为本发明的定位方法与现有定位方法在实施例二种的定位精度对比示意图。

[0023] 图5为本发明的定位方法与现有定位方法在实施例三种的定位精度对比示意图。

## 具体实施方式

[0024] 如图1所示为本发明的定位方法的方法流程示意图:本发明提供的这种基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法,包括如下步骤:

- S1. 实时获取GNSS系统的定位数据;
- S2. 根据步骤S1获取的定位数据,构建接收机在当前时刻的载波相位观测方程;

具体包括如下步骤:

设定接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 接收到 $n$ 颗卫星的双频信号,此时,接收机 $r$ 和卫星 $P_i$ 在ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed,地心地固坐标系)框架下的位置分别为 $(X_r, Y_r, Z_r)$ 和 $(X^{P_i}, Y^{P_i}, Z^{P_i})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ;则接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 接收到GNSS系统(可以为GPS、Galileo或BDS系统)的卫星 $p$ 对应频率 $k$ 上的载波相位观测方程为:

$$\phi_{r,k}^p = \rho_r^p + c(dt_r - dt^p) + T_r^p - I_{r,k}^p + \lambda_k N_{r,k}^p + B_{r,k} - B_k^p + \varepsilon_{\phi 1}$$

式中下标 $r$ 为接收机,上标 $p, k$ 分别表示卫星号和频率号; $B$ 表示载波相位硬件延迟偏差; $\phi_{r,k}^p$ 为接收机 $r$ 观测到卫星 $p$ 在频率 $k$ 上的载波相位观测值; $\rho_r^p$ 为接收机 $r$ 到观测卫星 $p$ 的欧氏几何距离,且 $\rho_r^p = \sqrt{(X_r - X^p)^2 + (Y_r - Y^p)^2 + (Z_r - Z^p)^2}$ ;  $c$ 为光速; $dt_r$ 为接收机钟差; $dt^p$ 为卫星 $p$ 的钟差; $T_r^p$ 为对流层延迟; $I_{r,k}^p$ 为对应频率 $k$ 上的电离层延迟; $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长; $N_{r,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 对应接收机 $r$ 在频率 $k$ 上的非差整周模糊度; $B_{r,k}$ 为接收机 $r$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $B_k^p$ 为观测卫星 $p$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $\varepsilon_{\phi 1}$ 为载波相位观测量的噪声;

采用差分定位,通过利用观测误差的时间和空间相关性,可消除卫星轨道误差、电离层和对流层延迟等大部分观测误差,提高定位精度;通过对基准站和接收机的原始载波相位观测值依次进行站间差分 and 星间差分,建立双差观测方程;

S3. 以接收机在前一时刻接收到的观测量作为基准站的观测量,构建基准站在当前时刻的载波相位观测方程;具体包括如下步骤:

以接收机 $r$ 在某时刻 $t_1$ 的前一历元 $t_0$ 时刻接收到的观测量作为基准站的观测量,基准站在ECEF框架下的位置为 $t_0$ 时刻接收机 $r$ 的位置,并作为虚拟基准站 $b$ ,位置为 $(X_b, Y_b, Z_b)$ ;则基准站 $b$ 接收到的观测卫星 $p$ 对应频率 $k$ 上的载波相位观测方程为:

$$\phi_{b,k}^p = \rho_b^p + c(dt_b - dt^p) + T_b^p - I_{b,k}^p + \lambda_k N_{b,k}^p + B_{b,k} - B_k^p + \varepsilon_{\phi 2}$$

式中 $\phi_{b,k}^p$ 为基准站 $b$ 对应观测卫星 $p$ 频率 $k$ 上的相位观测值; $\rho_b^p$ 为基准站 $b$ 至观测卫星 $p$ 的欧氏距离; $c$ 为光速; $dt_b$ 为基准站接收机钟差; $dt^p$ 为观测卫星 $p$ 的钟差; $T_b^p$ 为基准站 $b$ 相位观测量中的对流层延迟; $I_{b,k}^p$ 为基准站 $b$ 相位观测量对应频率 $k$ 的电离层延迟; $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长; $N_{b,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 对应基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的非差整周模糊度; $B_{b,k}$ 为基准站 $b$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $B_k^p$ 为观测卫星 $p$ 对频率 $k$ 信号的载波相位硬件延迟; $\varepsilon_{\phi 2}$ 为载波相位观测量的噪声;

S4. 将步骤S3和步骤S2构建的载波相位观测方程作差,得到站间单差载波相位观测方程;具体为得到的站间单差载波相位观测方程为

$$\phi_{br,k}^p = \rho_{br}^p + c dt_{br} + T_{br}^p - I_{br,k}^p + \lambda_k N_{br,k}^p + B_{br,k} + \varepsilon_{\phi 3}$$

式中 $\phi_{br,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 频率 $k$ 上的站间单差观测值; $\rho_{br}^p$ 为卫星 $p$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的站星间距离之差; $c$ 为光速; $dt_{br}$ 为接收机钟差和基准站钟差之差; $T_{br}^p$ 为观测卫星 $p$ 对

应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的对流层延迟之差； $I_{br,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 频率 $k$ 上的电离层延迟； $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长； $N_{br,k}^p$ 为观测卫星 $p$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的站间单差整周模糊度； $B_{br,k}$ 为接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的载波相位硬件延迟之差； $\varepsilon_{\phi 3}$ 为站间单差载波相位观测量的噪声；

S5. 构建GNSS系统的另一个卫星的站间单差载波相位观测方程；具体为选择GNSS系统的另一个卫星 $q$ ，构建卫星 $q$  ( $q$ 也为观测卫星 $p$ 中的一个)的站间单差载波相位观测方程为

$$\phi_{br,k}^q = \rho_{br}^q + cdt_{br} + T_{br}^q - I_{br,k}^q + \lambda_k N_{br,k}^q + B_{br,k} + \varepsilon_{\phi 4}$$

式中 $\phi_{br,k}^q$ 为观测卫星 $q$ 频率 $k$ 上的站间单差观测值； $\rho_{br}^q$ 为卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的站星间距离之差； $c$ 为光速； $dt_{br}$ 为接收机钟差和基准站钟差之差； $T_{br}^q$ 为观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 的对流层延迟之差； $I_{br,k}^q$ 为观测卫星 $q$ 频率 $k$ 上的电离层延迟； $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长； $N_{br,k}^q$ 为观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的站间单差整周模糊度； $B_{br,k}$ 为接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的载波相位硬件延迟之差； $\varepsilon_{\phi 4}$ 为站间单差载波相位观测量的噪声；

S6. 将步骤S5和步骤S4得到的站间单差观测方程作差，得到站间星间双差载波相位观测方程；具体得到的站间星间双差载波相位观测方程为

$$\phi_{br,k}^{pq} = \rho_{br}^{pq} + T_{br}^{pq} - I_{br,k}^{pq} + \lambda_k N_{br,k}^{pq} + \varepsilon_{\phi 5}$$

式中 $\phi_{br,k}^{pq}$ 为站间星间频率 $k$ 上的双差载波相位观测值； $\rho_{br}^{pq}$ 为站间星间的双差几何距离； $T_{br}^{pq}$ 为站间星间双差的电离层延迟； $I_{br,k}^{pq}$ 为站间星间双差的电离层延迟； $\lambda_k$ 为频率 $k$ 对应的波长； $N_{br,k}^{pq}$ 为观测卫星 $p$ 和观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k$ 上的双差整周模糊度； $\varepsilon_{\phi 5}$ 为双差载波相位观测量的噪声；

S7. 根据步骤S6得到的站间星间双差载波相位观测方程、电离层的延迟特性和双频载波观测值之间的频率差异，构建消电离层组合双差载波相位观测方程；具体包括如下步骤：

对流层延迟建模，能校正真实对流层延迟误差约90%，其精度可达cm级，且对流层延迟随时间变化十分缓慢，历元间双差后 $T_{br}^{pq}$ 的误差可忽略；而电离层延时模型误差大约为1~5米，大致只能校正真实电离层延迟误差的50%，其精度只有米级，在部分电离层活跃时期，其模型估测电离层延迟可与实际电离层延迟相差十几米甚至几十米，且电离层延迟随时间变化较快，双差后 $I_{br,k}^{pq}$ 的误差累计后，会使得位置推算值有较大偏差；

电离层延迟值的大小与载波频率 $f$ 的平方成反比；为消除电离层延迟误差的影响，利用双频载波观测值之间的频率差异，构建消电离层组合双差载波相位观测方程：

根据电离层延迟特性，存在：

$$\frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} I_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} I_{br,k2}^{pq} = 0$$

式中 $f_{k1}$ 为GNSS系统的1号频点的频率; $f_{k2}$ 为GNSS系统的2号频点的频率; $I_{br,k1}^{pq}$ 为频率 $f_{k1}$ 对应的站间星间双差电离层延迟; $I_{br,k2}^{pq}$ 为频率 $f_{k2}$ 对应的站间星间双差电离层延迟;

然后,计算得到消电离层组合双差载波相位观测方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k2}^{pq} \\ & = (\rho_{br}^{pq} + T_{br}^{pq}) + \frac{c}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \cdot (f_{k1} N_{br,k1}^{pq} - f_{k2} N_{br,k2}^{pq}) + \varepsilon_{\phi 6} \end{aligned}$$

式中 $\phi_{br,k1}^{pq}$ 为站间星间频率 $f_{k1}$ 上的双差载波相位观测值; $\phi_{br,k2}^{pq}$ 为站间星间频率 $f_{k2}$ 上的双差载波相位观测值; $\rho_{br}^{pq}$ 为站间星间双差几何距离; $T_{br}^{pq}$ 为站间星间双差对流层延迟; $c$ 为光速; $N_{br,k1}^{pq}$ 为观测卫星 $p$ 和观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k1$ 上的双差整周模糊度; $N_{br,k2}^{pq}$ 为观测卫星 $p$ 和观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k2$ 上的双差整周模糊度; $\varepsilon_{\phi 6}$ 为消电离层组合双差载波相位观测量的噪声;

S8. 对步骤S7构建的消电离层组合双差载波相位观测方程进行线性化处理,并结合所有卫星的载波相位观测值,得到多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程;具体包括如下步骤:

对构建的消电离层组合双差载波相位观测方程,将已知项与可改正项移至方程的左侧,将未知项移至方程的右侧,得到如下观测方程:

$$y_{br,IF}^{pq} = (\rho_{r0}^{pq} - \rho_r^{pq}) + \lambda_{IF} \cdot (f_{k1} N_{br,k1}^{pq} - f_{k2} N_{br,k2}^{pq}) + \varepsilon_{\phi}$$

式中 $y_{br,IF}^{pq}$ 为消电离层组合双差载波相位量残差,且

$$y_{br,IF}^{pq} = \frac{(f_{k1})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k1}^{pq} - \frac{(f_{k2})^2}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2} \phi_{br,k2}^{pq} - T_{br}^{pq} - (\rho_b^{pq} - \rho_{r0}^{pq}), \phi_{br,k1}^{pq}$$

为站星间频率 $f_{k1}$ 上的双差载波相位观测值, $\phi_{br,k2}^{pq}$ 为站星间频率 $f_{k2}$ 上的双差载波相位观测值, $T_{br}^{pq}$ 为站间星间双差的电离层延迟, $\rho_b^{pq}$ 为基准站 $b$ 对应卫星 $p$ 和 $q$ 的站星间距离之差, $\rho_{r0}^{pq}$ 为接收机 $r$ 的近似位置对应卫

星 $p$ 和 $q$ 的站星间几何距离之差, $\rho_{r0}^{pq}$ 的计算公式为

$$\rho_{r0}^{pq} = \sqrt{(X_{r0} - X^p)^2 + (Y_{r0} - Y^p)^2 + (Z_{r0} - Z^p)^2} - \sqrt{(X_{r0} - X^q)^2 + (Y_{r0} - Y^q)^2 + (Z_{r0} - Z^q)^2},$$

$r0$ 表示接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 的近似坐标的对应标记, $(X_{r0}, Y_{r0}, Z_{r0})$ 为接收机 $r$ 在时刻 $t_1$ 的近似坐

标, $\rho_b^{pq}$ 的计算公式为

$$\rho_b^{pq} = \sqrt{(X_b - X^p)^2 + (Y_b - Y^p)^2 + (Z_b - Z^p)^2} - \sqrt{(X_b - X^q)^2 + (Y_b - Y^q)^2 + (Z_b - Z^q)^2}; \rho_r^{pq}$$

为接收机 $r$ 的实际位置对应卫星 $p$ 和 $q$ 的站星间几何距离之差; $\lambda_{IF}$ 为简化项,且 $\lambda_{IF} = \frac{c}{(f_{k1})^2 - (f_{k2})^2}$ , $c$ 为光速; $N_{br,k1}^{pq}$ 为观

测卫星 $p$ 和观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k1$ 上的双差整周模糊度; $N_{br,k2}^{pq}$ 为观测卫星 $p$ 和观测卫星 $q$ 对应接收机 $r$ 和基准站 $b$ 在频率 $k2$ 上的双差整周模糊度; $\varepsilon_\varphi$ 为消电离层组合双差载波相位观测量的噪声;

将观测方程中的右侧部分进行线性化,得到

$$y_{br,IF}^{pq} = H_{br,IF}^{pq} x + v_{br,IF}^{pq}$$

式中 $H_{br,IF}^{pq}$ 为待估参数的设计矩阵,且 $H_{br,IF}^{pq} = [l_r^p - l_r^q \quad m_r^p - m_r^q \quad n_r^p - n_r^q \quad \lambda_{IF} \cdot f_{k1} \quad -\lambda_{IF} \cdot f_{k2}]$ , $l_r^p$ 为接收机 $r$ 与卫星 $p$ 视线方向在X方向的投影值, $l_r^q$ 为接收机 $r$ 与卫星 $q$ 视线方向在X方向的投影值, $m_r^p$ 为接收机 $r$ 与卫星 $p$ 视线方向在Y方向的投影值, $m_r^q$ 为接收机 $r$ 与卫星 $q$ 视线方向在Y方向的投影值, $n_r^p$ 为接收机 $r$ 与卫星 $p$ 视线方向在Z方向的投影值, $n_r^q$ 为接收机 $r$ 与卫星 $q$ 视线方向在Z方向的投影值, $l_r^i = (X^i - X_{r0}) / \rho_{r0}^i$ , $m_r^i = (Y^i - Y_{r0}) / \rho_{r0}^i$ , $n_r^i = (Z^i - Z_{r0}) / \rho_{r0}^i$ , $i$ 对应于卫星号且取值为 $p$ 或 $q$ , $(X^i, Y^i, Z^i)$ 为卫星 $i$ 在 $t_1$ 时刻的位置坐标; $x$ 为待估参数, $x = [dx \quad dy \quad dz \quad N_{br,k1}^{pq} \quad N_{br,k2}^{pq}]^T$ , $dx$ 为X方向的改正数, $dy$ 为Y方向的改正数, $dz$ 为Z方向的改正数; $v_{br,IF}^{pq}$ 为消电离层组合双差载波观测量的噪声;

以GPS系统为例,设定 $t_1$ 时刻,接收机 $r$ 接收到 $n$ 颗卫星的双频载波观测量;在上一历元 $t_0$ 时刻,接收机 $r$ 同样接收到了该 $n$ 颗卫星的双频载波观测量,且该 $n$ 颗卫星均未发生周跳或者进行了周跳修复,则变量 $N_{br,k1}^{pq}$ 和 $N_{br,k2}^{pq}$ 为0;则线性化后的消电离层组合双差载波相位观测方程矩阵形式可表示如下:

$$V_{GPS} = H_{GPS} x - y_{GPS}, P_{GPS}$$

$$H_{GPS} = \begin{bmatrix} l_r^{g1} - l_r^{g2} & m_r^{g1} - m_r^{g2} & n_r^{g1} - n_r^{g2} \\ l_r^{g1} - l_r^{g3} & m_r^{g1} - m_r^{g3} & n_r^{g1} - n_r^{g3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_r^{g1} - l_r^{gn} & m_r^{g1} - m_r^{gn} & n_r^{g1} - n_r^{gn} \end{bmatrix}$$

$$x_k^{pq} = [dx \quad dy \quad dz]^T$$

$$y_{GPS} = [y_{GPS}^{g1g2} \quad y_{GPS}^{g1g3} \quad \cdots \quad y_{GPS}^{g1gn}]^T$$

$$V_{GPS} = [V_{GPS}^{g1g2} \quad V_{GPS}^{g1g3} \quad \cdots \quad V_{GPS}^{g1gn}]^T$$

其中 $V_{GPS}$ 为观测量噪声,且 $V_{GPS} = [V_{GPS}^{g1g2} \quad V_{GPS}^{g1g3} \quad \cdots \quad V_{GPS}^{g1gn}]^T$ , $gi$ 为对应于接收到的GPS系统的第 $i$ 颗卫星, $i=1,2,\dots,n$ , $V_{GPS}^{g1gi}$ 为对应于接收到的GPS系统第1颗卫星与第 $i$ 颗卫星的消电离层组合双差载波相位观测量的噪声; $H_{GPS}$ 为待估参数的设计矩阵,且

$$H_{GPS} = \begin{bmatrix} l_r^{g1} - l_r^{g2} & m_r^{g1} - m_r^{g2} & n_r^{g1} - n_r^{g2} \\ l_r^{g1} - l_r^{g3} & m_r^{g1} - m_r^{g3} & n_r^{g1} - n_r^{g3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_r^{g1} - l_r^{gn} & m_r^{g1} - m_r^{gn} & n_r^{g1} - n_r^{gn} \end{bmatrix}; x$$

为待估参数,且 $x = [dx \quad dy \quad dz]^T$ ;  $y_{GPS}$ 为消电离层组合双



差载波相位的残差,且  $y_{GPS} = [y_{GPS}^{g1g2} \quad y_{GPS}^{g1g3} \quad \dots \quad y_{GPS}^{g1gn}]^T$ ,  $P_{GPS}$  为消电离层组合双差载波相位观测量的权矩阵;

综合多GNSS系统的载波相位观测值,得到多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程为:

$$V_{GNSS} = H_{GNSS}x - y_{GNSS}, P_{GNSS}$$

$$\begin{cases} V_{GNSS} = [V_{GPS} & V_{GLONASS} & V_{GALILEO} & V_{BDS} & V_{QZSS} & V_{NAVIC}]^T \\ H_{GNSS} = [H_{GPS} & H_{GLONASS} & H_{GALILEO} & H_{BDS} & H_{QZSS} & H_{NAVIC}]^T \\ y_{GNSS} = [y_{GPS} & y_{GLONASS} & y_{GALILEO} & y_{BDS} & y_{QZSS} & y_{NAVIC}]^T \\ P_{GNSS} = \text{diag}[P_{GPS} & P_{GLONASS} & P_{GALILEO} & P_{BDS} & P_{QZSS} & P_{NAVIC}]^T \end{cases}$$

式中,下标GNSS表示GPS, GLONASS, GALILEO, BDS, QZSS或NAVIC系统的组合; $y$ 为消电离层组合双差载波相位残差, $H$ 为待估参数的设计矩阵, $V$ 为消电离层组合双差载波相位量的噪声矩阵; $x$ 为待估参数(位置的变化量), $P$ 为消电离层组合双差载波相位量的权矩阵;

S9. 根据步骤S8得到的多GNSS系统消电离层组合双差载波相位观测方程,依据最小二乘间接平差原理,基于残差平差和最小原则,估算得到接收机的位置变化量;具体包括如下步骤:

根据最小二乘间接平差原理,基于其残差平差和最小( $V^T P V = \min$ )的原则,得到待估算的位置变化量 $x$ 为  $x = (H^T P H)^{-1} \cdot H^T P y$ ,  $H$ 为待估参数的设计矩阵, $P$ 为观测量的权矩阵, $y$ 为观测量的残差矩阵;

S10. 根据步骤S9估算得到的接收机的位置变化量,实时完成基于载波相位差分的GNSS高精度定位;具体包括如下步骤:

将步骤S9估算得到的位置变化量 $x$ ,与前一时刻的接收机的实时位置进行叠加,即  $(X_{r0} + dx, Y_{r0} + dy, Z_{r0} + dz)$ ,得到当前时刻接收机的估算位置,从而完成基于载波相位差分的GNSS高精度定位。

[0025] 如图2所示为本发明的导航方法的方法流程示意图:本发明提供的这种包括了所述基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法的导航方法,具体包括如下步骤:

- 实时获取GNSS系统的定位数据;
- 采用所述的基于载波相位差分的GNSS高精度定位方法进行实时定位;
- 根据步骤b的实时定位结果,实时进行导航。

[0026] 图3~图5为本发明的定位方法与现有定位方法对比的定位精度示意图:

为了验证本发明的定位方法的优势,采用一组双频多系统静态测试数据进行RTK处理。人为的模拟在第232s处断开差分数据,通过图3~图5可用看出本发明仍可长时间维持cm级的高精度定位,而常用的方法,定位精度立刻跳变至m级。

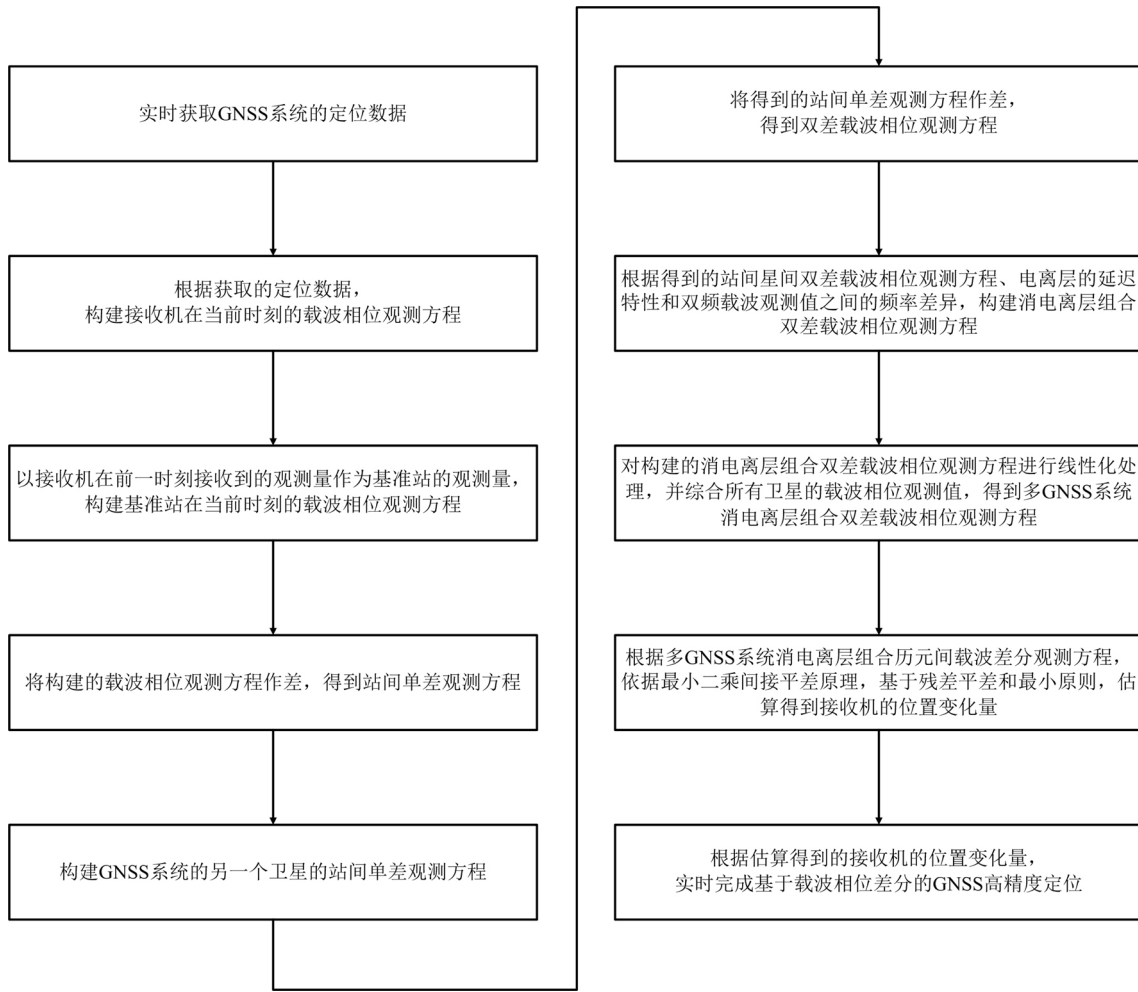


图1

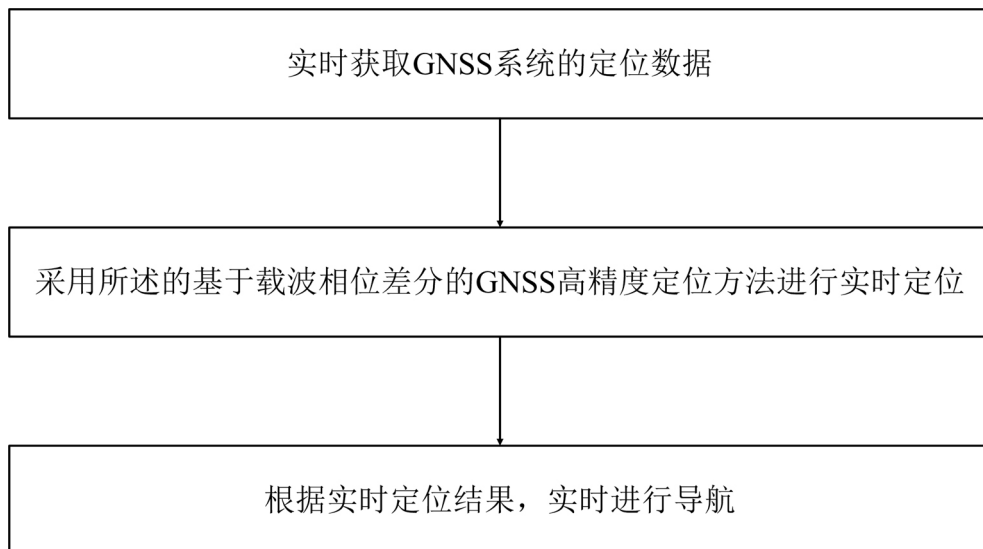


图2

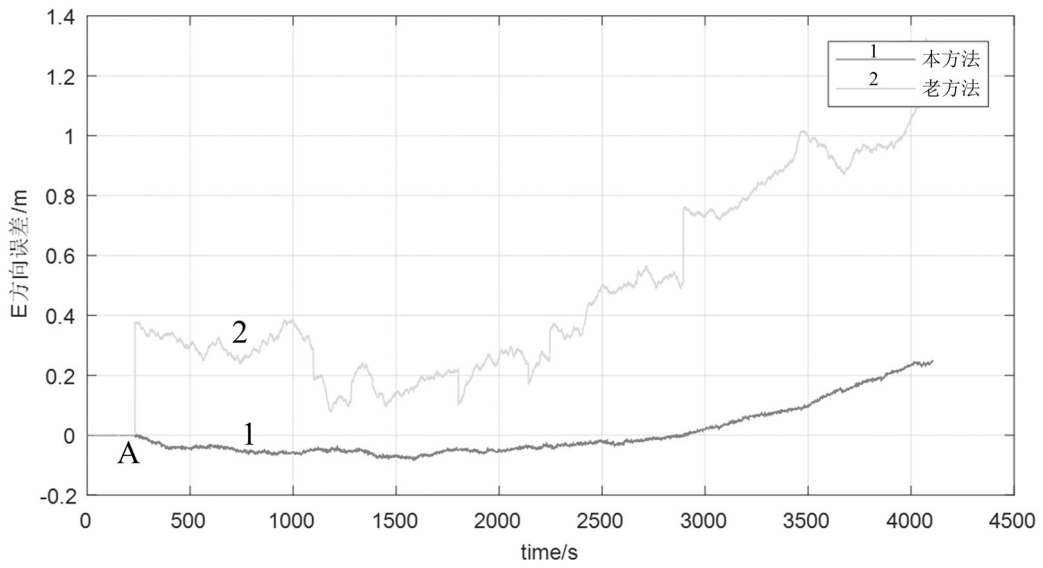


图3

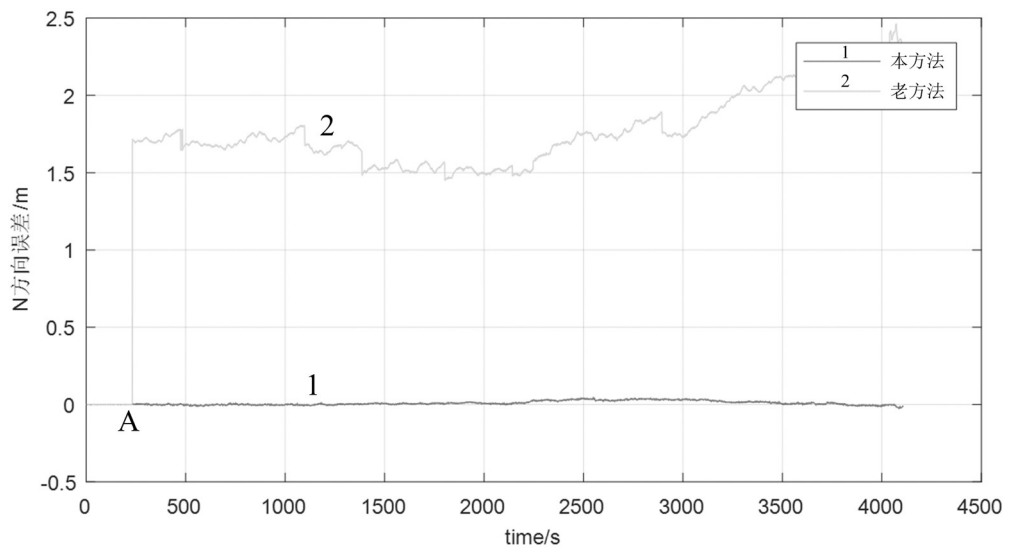


图4

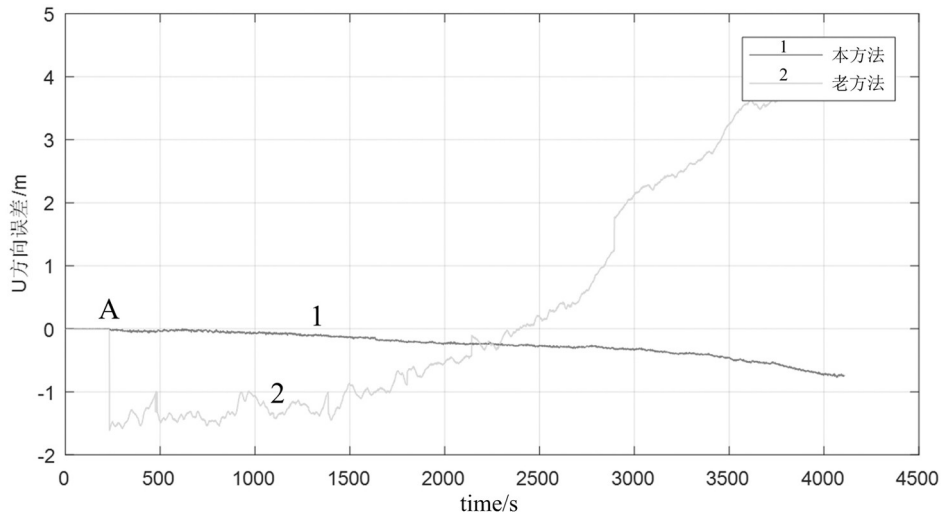


图5