



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 120028811 B

(45) 授权公告日 2025. 06. 24

(21) 申请号 202510517836.7

G01S 19/41 (2010.01)

(22) 申请日 2025.04.24

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 107102346 A, 2017.08.29

申请公布号 CN 120028811 A

CN 109783846 A, 2019.05.21

(43) 申请公布日 2025.05.23

审查员 张磊洋

(73) 专利权人 山东科技大学

地址 266590 山东省青岛市黄岛区前湾港
路579号

(72) 发明人 王进 李若怡 张鹏飞 涂锐

杨光耀 常晓航 洪菊 李芳馨

(74) 专利代理机构 北京云嘉湃富知识产权代理

有限公司 11678

专利代理师 王荃

(51) Int. Cl.

G01S 19/14 (2010.01)

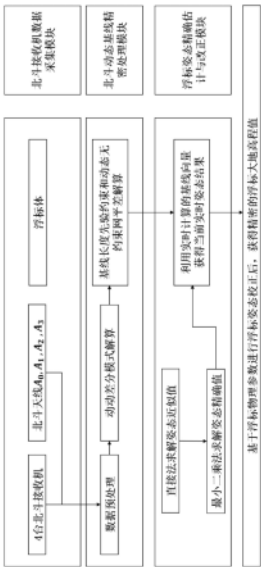
权利要求书6页 说明书20页 附图3页

(54) 发明名称

基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法及系统

(57) 摘要

本发明属于海洋测量技术领域,公开了基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法及系统。该方法包括获取浮标上四个北斗接收机天线的北斗观测数据;经过数据预处理,剔除粗差和探测周跳后,采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量值;通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算,探测和削弱基线向量中的粗差结果,获得四个北斗接收机天线独立基线向量结果;利用实时计算的基线向量,获得当前实时姿态结果;基于浮标物理参数进行浮标姿态校正后,获得精密的浮标大地高程观测结果。本发明提高了海洋浮标在恶劣海况下的适用性和准确性。



1. 一种基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法, 其特征在于, 该方法包括以下步骤:

S101, 利用北斗接收机数据采集系统中的北斗接收机, 获取浮标上四个北斗接收机天线的北斗观测数据; 并接收岸上北斗参考站数据, 将浮标上北斗主天线与岸上北斗参考站数据进行差分定位, 获得浮标主天线相对于参考站的差分定位结果;

S102, 浮标北斗实时观测数据经过数据预处理, 剔除粗差和探测周跳后, 采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算, 获取四个北斗接收机天线之间的基线向量初值;

S103, 根据实时获取的四个北斗接收机天线基线网数据, 利用基线长度先验约束和动态无约束网平差解算, 探测和削弱基线向量解算初值结果中的粗差和闭合差;

S104, 利用四天线解算得到的天线间实时基线向量结果, 通过坐标转换, 获得当前载体在航向、横滚和俯仰方向的实时姿态角;

S105, 基于浮标物理参数进行浮标姿态校正后, 获得精密的浮标大地高程观测结果; 基于GNSS系统实时三维姿态角度信息, 为海洋浮标观测载体提供实时姿态改正值, 保证浮标载体上设备对海洋水面高度的垂直测量, 修正浮标受波浪涌浪影响造成浮标体倾斜带来的高度误差, 消除基于惯性设备测量姿态角改正带来的系统性偏移误差。

2. 根据权利要求1所述的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法, 其特征在于, 在步骤S101中, 北斗接收机数据采集系统, 包括: 浮标、北斗接收机、北斗接收机天线、数据采集模块和电源模块;

四台北斗接收机布设在浮标上, 呈现对称十字分布, 四台北斗接收机与外置的四个北斗接收机天线连接;

数据采集模块进行数据存储和数据传输;

电源模块采用太阳能电池板和蓄电池组合供电方式, 作为电力供应系统。

3. 根据权利要求1所述的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法, 其特征在于, 在步骤S102中, 获取四个北斗接收机天线之间的基线向量初值, 包括:

S1021, 针对采集到的北斗观测数据, 通过探测、识别、调节的方式对粗差进行后验处理;

S1022, 对剔除粗差的北斗观测数据, 采用双频码相组合法和电离层残差法进行周跳探测;

S1023, 采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算, 获取四个北斗接收机天线之间的基线向量值;

S1024, 采用整周模糊度降相关整数最小二乘估计LAMBDA算法, 解算模糊度并得到整数解。

4. 根据权利要求3所述的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法, 其特征在于, 在步骤S1021中, 通过探测、识别、调节的方式对粗差进行后验处理, 包括:

探测阶段通过统计量对数据进行检验, 计算观测值的多余数量和方差矩阵, 利用卡方检验判断是否存在异常数据; 如果检验显著, 进入识别步骤; 若不显著, 停止探测;

识别阶段通过标准化残差构造检验统计量, 超出显著性水平的检验值表示某观测值为异常数据, 剔除该值后重新平差, 并进行整体检验; 如果仍有异常, 继续识别, 直到全局检验通过;

调节阶段利用剩余观测值进行最小二乘估计,最终得到结果并输出。

5. 根据权利要求3所述的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法,其特征在于,在步骤S1023中,动动差分模式包括:利用安装在运动载体上的两个北斗接收机天线进行差分处理,作为参考站的北斗接收机天线坐标不设置为固定值,采用实时动态定位的结果;作为流动站的北斗接收机,与参考站进行差分处理,解算获得流动站相对于参考站的基线向量;

采用动动差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量;在双差观测模型中,同一时刻,两台接收机对同一颗卫星的观测结果进行差分,消除接收机之间的共性误差;同一接收机在两个不同时间对两颗不同卫星的观测值进行差分,消除卫星之间的共性误差;构建的星站双差模型为:

$$\nabla\Delta\rho_{i,r}^{j,s}(t) = \nabla\Delta R_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla\Delta\delta I_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla\Delta\delta T_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla\Delta\delta others_{i,r}^{j,s}(t);$$

$$\lambda\nabla\Delta\phi_{i,r}^{j,s}(t) = \nabla\Delta R_{i,r}^{j,s}(t) - \lambda\nabla\Delta N_{i,r}^{j,s}(t_0) + \nabla\Delta\delta I_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla\Delta\delta T_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla\Delta\delta others_{i,r}^{j,s}(t);$$

式中, $\nabla\Delta\rho_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差伪距观测值,单位为米, $\nabla\Delta R_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差几何距离,单位为米, $\nabla\Delta\delta I_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差电离层误差, $\nabla\Delta\delta T_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差对流层误差, $\nabla\Delta\delta others_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差其他误差项,单位为米, $\nabla\Delta\phi_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差载波相位观测值,单位为周, $\nabla\Delta N_{i,r}^{j,s}(t_0)$ 为初始历元 t_0 时确定的周模糊度的星站双差值,单位为周, i,j 分别为流动站和非参考卫星编号, r,s 分别为参考站及参考卫星编号, ρ 为卫星到接收机的原始伪距观测值,单位为米; R 为卫星到接收机的空间几何距离,单位为米; I,T 分别为电离层和对流层误差, $\delta others$ 为其他误差, N 为载波相位观测值中整周模糊度值,单位为周; λ 为频率的波长。

6. 根据权利要求3所述的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法,其特征在于,在步骤S1024中,采用整周模糊度降相关整数最小二乘估计LAMBDA算法,解算模糊度并得到整数解,包括:通过转换浮点解模糊度值得方差协方差矩阵,实现整数降相关,削弱浮点解模糊度之间得相关性,减少模糊度搜索空间,实现模糊度快速固定;具体步骤为:

(a) 在无外界约束条件下,通过双差观测数据,采用最小二乘方法解算多条基线得到的北斗双差观测,得到参数解 $\hat{Z}$ 和 $\hat{B}$ 以及协因数矩阵 $Q_{\hat{Z}\hat{Z}}, Q_{\hat{B}\hat{B}}, Q_{\hat{Z}\hat{B}}$,多条基线得到的北斗双差观测方程为:

$$E(Y) = AZ + GB, Z \in Z^{m \times n}, B \in R^{3 \times n};$$

$$D(vec(Y)) = Q_{YY} = P \otimes Q;$$

式中, $E(Y)$ 为观测方程, Z 为基线的未知双差参数, $Z = [z_1 \ z_1 \ \cdots \ z_n]$, z_n 为 n 条基线未知的双差参数; B 为基线长度的未知参数, $B = [b_1 \ b_1 \ \cdots \ b_n]_{3 \times n}$, b_n 为第 n 条基线的未知基线长参数; $Z^{m \times n}$ 为 $m \times n$ 的基线的未知双差参数矩阵, $R^{3 \times n}$ 为 $3 \times n$ 的包含 n 条

基线的矩阵, $D(\text{vec}(Y))$ 为观测向量的协方差, Q_{YY} 为观测量的协方差矩阵; $Y = [y_1 \ y_1 \ \cdots \ y_n]$, y_n 为 n 条基线的码和相位线性化观测向量; A 为 $2n \times n$ 的模糊度系数阵, G 为 $2m \times 3$ 的映射矩阵, P 为基线间的协因数阵, Q 为伪距和相位的协因数阵, $\otimes$ 为 *Kronecker* 积;

(b) 构建模糊度搜索得最优问题, 表达式为:

$$\check{Z}^U = \underset{Z \in i \times n}{\operatorname{argmin}} \| \text{vec}(Z - \hat{Z}) \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2;$$

$$\Omega^U(\chi^2) = \{ Z \in Z^{n \times m} \mid \| \text{vec}(Z - \hat{Z}) \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2 \leq \chi^2 \};$$

式中, $\check{Z}^U$ 为最优整数模糊度解, $i \times n$ 为搜索空间的维度, $\text{vec}()$ 为矩阵的向量化运算, $\hat{Z}$ 为模糊度浮点解, $\| \cdot \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}$ 为加权欧几里得范数, 衡量了 Z 与 $\hat{Z}$ 之间的加权距离, Ω^U 为约束集合, 表示所有可能的模糊度解的集合, χ 为给定的常数, 用于定义搜索空间的大小;

通过搜索条件 $\| \text{vec}(Z - \hat{Z}) \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2$ 的约束下, 距离 $\hat{Z}$ 最近的模糊度向量;

(c) LAMBDA 算法将初始的 $Q_{\hat{Z}\hat{Z}}$ 和模糊度浮点解 $\hat{Z}$ 进行高斯正交变换处理, 降低浮点解模糊度的内相关性, 对浮点解进行降低相关性处理, 最终获得整数解;

$\hat{n} = \hat{N}^T \cdot \hat{Z}$; $Q_{\hat{n}\hat{n}} = N^T \cdot Q_{\hat{Z}\hat{Z}} \cdot N$; 式中, $\hat{n}$ 为通过变换得到的整数模糊度向量, $\hat{N}^T$ 为正交变换矩阵 N 的转置, N^T 为正交变换矩阵 N 的转置, $Q_{\hat{n}\hat{n}}$ 为整数模糊度向量 $\hat{n}$ 的协方差矩阵, N 为正交整数变换矩阵, 模值为 1, 并且通过变换后的 $Q_{\hat{n}\hat{n}}$ 的非对角元素的小于或等于 0.5;

(d) 整周模糊度的检验与回代, 采用显著性比例检验, 设定阈值 ratio 值, 检验次小值与最小值的比值 F , 若检验值 F 大于阈值, 则模糊度搜索正确;

$$\frac{F_{\text{次小}}}{F_{\text{最小}}} \geq \text{ratio};$$

式中, $F_{\text{次小}}$ 为目标函数值的次小值, $F_{\text{最小}}$ 为目标函数值的最小值, 最优整数模糊度解 $\check{Z}^U$ 的目标函数值, ratio 为预先设定的阈值, 取值范围一般为 2 到 3;

则认为 $F_{\text{最小}}$ 对应的整周模糊度值为正确的模糊度组合。

7. 根据权利要求 1 所述的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法, 其特征在于, 在步骤 S103 中, 根据实时获取的四个北斗接收机天线基线网数据, 利用基线长度先验约束和动态无约束网平差解算, 探测和削弱基线向量解算初值结果中的粗差和闭合差, 获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立基线向量结果; 具体包括:

S1031, 基于基线长度约束的动态基线解算;

添加的伪测量方程的量测值 y 、量测方程 $h(x)$ 、观测矩阵 H 、量测噪声的协方差 R 分别为:

$$y = (r_{baseline});$$

$$h(x) = (|r_r(t_r) - r_b(t_r)|);$$

$$H = \left(\frac{(r_r(t_r) - r_b(t_r))^T}{|r_r(t_r) - r_b(t_r)|} \right);$$

$$R = (\sigma_r^2);$$

式中, $r_{baseline}$ 为基线长度, r_r 为流动站的位置, t_r 为信号接收时间, r_b 为基站的位置, σ_r 为基线长度的误差, T 表示转置;

S1032,基于动态无约束网平差解算的动态基线解算;

根据误差方程、基准方程以及方程-协方差阵,按照最小二乘原理进行平差解算,获得平差后的结果:

$$\delta x = (B^T D^{-1} B + G G^T)^{-1} B^T D^{-1} L;$$

式中, δx 为平差后的参数改正数, B 为系数矩阵, T 为转置, D^{-1} 为观测值的协方差矩阵 D 的逆矩阵, G 为基准方程的系数矩阵, L 为观测值的误差向量;

平差后各个点的坐标 X 表示为:

$$X = \hat{X} + \delta x;$$

式中, $\hat{X}$ 为平差前的初始坐标值;

平差后的单位权中误差为:

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{V^T D^{-1} V}{3n - 3m + 3}};$$

式中, n 为组成北斗网的基线数, m 为参与平差的总测站点数, $\hat{\sigma}_0$ 为单位权中误差, V 为改正数向量。

8.根据权利要求1所述的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法,其特征在于,在步骤S104中,利用四天线解算得到的天线间实时基线向量结果,通过坐标转换,获得当前载体在航向、横滚和俯仰方向的实时姿态角;包括:

S1041,基线向量在载体坐标系和导航坐标系下的关系;

$$l_n = C_b^n l_b;$$

式中, l_n, l_b 分别为基线在导航坐标系和载体坐标系下的基线向量, C_b^n 为载体坐标系到导航坐标系的姿态转移矩阵;

S1042,直接法求解出航向角、俯仰角和横滚角的近似值 $\psi_0, \theta_0, \gamma_0$;

S1043,通过旋转变换的关系,利用最小二乘法进行姿态解算,求出载体的姿态信息。

9.根据权利要求1所述的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法,其特征

在于,在步骤S105中,基于浮标物理参数进行浮标姿态校正后,获得精密的浮标大地高程观测结果,包括:

S1051,基于岸上北斗参考站数据,与海上浮标多天线构成基线动态解算,获得浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程 H_g ;

S1052,进行基于北斗接收机天线间的动态基线矢量的姿态解算,得到浮标体的倾斜角度 α ,已知浮标载体上的横滚角 γ 和俯仰角 θ ,设有横滚角、俯仰角和航向角方向上的单位矢量,则横滚角和俯仰角方向上的单位矢量分别在载体坐标系中的坐标向量为:

$$\mathbf{a} = (\cos\gamma, 0, \sin\gamma);$$

$$\mathbf{b} = (0, \cos\theta, \sin\theta);$$

为了估计浮标载体倾斜角度,确定横滚角和俯仰角单位向量所在平面的法线与铅垂线的夹角,则方向向量 $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ 与法向量 $\mathbf{n}$ 的关系满足:

$$\begin{cases} \mathbf{a} \cdot \mathbf{n} = 0; \\ \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} = 0; \end{cases}$$

定义铅垂线方向的向量为 $\mathbf{c} = (0, 0, 1)$,则此处添加条件,令法向量 $\mathbf{n}$ 的Z轴方向为正,且值为1;获得法向量 $\mathbf{n} = (-\tan\gamma, -\tan\theta, 1)$,法向量 $\mathbf{n}$ 与 $\mathbf{c}$ 的夹角为浮标载体倾斜角度 α ,表达式为:

$$\cos\alpha = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{c}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{c}|} = \frac{1}{\sqrt{\tan^2\gamma + \tan^2\theta + 1}};$$

式中, $\mathbf{c}$ 为铅垂线方向的向量;

S1053,根据测量结果,进行多天线北斗海面高度 H_s 的标定,海面高度标定公式表达为:

$$H_s = H_g - (H_d \cos\alpha);$$

式中, H_g 为浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程, H_d 为北斗接收机天线相位中心到水面的高度。

10.一种基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正系统,其特征在于,该系统实施权利要求1-9任意一项所述基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法,该系统包括:

北斗接收机数据采集系统(1),用于布设北斗接收机设备,并进行观测数据的采集工作,获得观测数据;并接收岸上北斗参考站数据,将浮标上北斗主天线与岸上北斗参考站数据进行差分定位,获得浮标主天线相对于参考站的差分定位结果;

北斗动态基线精密处理模块(2),采用动态差分模式进行四个北斗接收机天线的基线向量解算;根据实时获取的四个北斗接收机天线的基线网数据,通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算,探测和削弱基线向量中的粗差结果,获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立基线向量结果;

浮标姿态精确估计与改正模块(3),通过利用实时计算的基线向量,获得当前实时姿态结果;基线向量确定的浮标姿态结果经过初始姿态改正,消除基线网与观测载体平台之间

由于安置导致的相对初始姿态误差;利用基线网获得的精确浮标姿态结果,改正浮标受姿态引起的高程误差,获得经过姿态改正后的精密海洋浮标观测结果。

基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于海洋测量技术领域,尤其涉及基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法及系统。

背景技术

[0002] 随着海洋科学研究和海上运输等领域的快速发展,海洋浮标作为海洋环境监测的重要工具,广泛应用于气象、海洋、环境等数据采集任务。

[0003] 浮标的姿态(包括航向角、俯仰角和横滚角)对于浮标的定位、方向和运动轨迹的准确性具有重要影响。然而,由于浮标工作环境的复杂性,包括海面波动、强烈的水流、以及浮标本身的动态漂移等因素,浮标的姿态通常容易受到干扰,导致其姿态精度降低,进而影响测量结果的可靠性。

[0004] 目前,传统的海洋浮标姿态监测方法主要依赖于单一的惯性测量单元(IMU)、陀螺仪、加速度计等传感器来进行姿态计算。但这些传感器往往存在精度不高、漂移大、对环境噪声敏感等问题。在一些极端的海洋环境中,这些传感器的误差积累会导致姿态的严重偏差,影响浮标的正常工作。

[0005] 近年来,北斗卫星导航系统在海洋测量中的应用逐渐得到重视。北斗具备高精度定位功能,能够为海洋浮标提供更精确的定位数据。但由于海洋浮标在动态环境中经常发生姿态变化,单一的北斗接收机天线无法直接提供浮标的实时姿态信息,因此,如何利用多天线分布的北斗接收机获取载体姿态,进行姿态的实时校正,成为当前海洋浮标姿态精确监测中的一个关键问题。

发明内容

[0006] 为克服相关技术中存在的问题,本发明公开实施例提供了一种基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法及系统,旨在提供一种低成本的高可靠和高精度的海洋载体姿态解算和校正系统,利用低成本多天线北斗设备,实现实时高精度的海上载体绝对姿态测量,大大提高海上载体作业效率和精度,减少人力定期维护成本,提高海洋作业智能化水平。

[0007] 为实现上述目的,所述技术方案如下:基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法,包括以下步骤:

[0008] S101,利用北斗接收机数据采集系统中的北斗接收机,获取浮标上四个北斗接收机天线的北斗观测数据;并接收岸上北斗参考站数据,将浮标上北斗主天线与岸上北斗参考站数据进行差分定位,获得浮标主天线相对于参考站的差分定位结果;

[0009] S102,浮标北斗实时观测数据经过数据预处理,剔除粗差和探测周跳后,采用动态差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量初值;

[0010] S103,根据实时获取的四个北斗接收机天线基线网数据,利用基线长度先验约束

和动态无约束网平差解算,探测和削弱基线向量解算初值结果中的粗差和闭合差;

[0011] S104,利用四天线解算得到的天线间实时基线向量结果,通过坐标转换,获得当前载体在航向、横滚和俯仰方向的实时姿态角;

[0012] S105,基于浮标物理参数进行浮标姿态校正后,获得精密的浮标大地高程观测结果;基于GNSS系统实时三维姿态角度信息,为海洋浮标观测载体提供实时姿态改正值,保证浮标载体上设备对海洋水面高度的垂直测量,修正浮标受波浪涌浪影响造成浮标体倾斜带来的高度误差,消除基于惯性设备测量姿态角改正带来的系统性偏移误差。

[0013] 在步骤S101中,北斗接收机数据采集系统,包括:浮标、北斗接收机、北斗接收机天线、数据采集模块和电源模块;

[0014] 四台北斗接收机布设在浮标上,呈现对称十字分布,四台北斗接收机与外置的四个北斗接收机天线连接;

[0015] 数据采集模块进行数据存储和数据传输;

[0016] 电源模块采用太阳能电池板和蓄电池组合供电方式,作为电力供应系统。

[0017] 在步骤S102中,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量初值,包括:

[0018] S1021,针对采集到的北斗观测数据,通过探测、识别、调节的方式对粗差进行后验处理;

[0019] S1022,对剔除粗差的北斗观测数据,采用双频码相组合法和电离层残差法进行周跳探测;

[0020] S1023,采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量值;

[0021] S1024,采用整周模糊度降相关整数最小二乘估计LAMBDA算法,解算模糊度并得到整数解。

[0022] 在步骤S1021中,通过探测、识别、调节的方式对粗差进行后验处理,包括:

[0023] 探测阶段通过统计量对数据进行检验,计算观测值的多余数量和方差矩阵,利用卡方检验判断是否存在异常数据;如果检验显著,进入识别步骤;若不显著,停止探测;

[0024] 识别阶段通过标准化残差构造检验统计量,超出显著性水平的检验值表示某观测值为异常数据,剔除该值后重新平差,并进行整体检验;如果仍有异常,继续识别,直到全局检验通过;

[0025] 调节阶段利用剩余观测值进行最小二乘估计,最终得到结果并输出。

[0026] 在步骤S1023中,动差分模式包括:利用安装在运动载体上的两个北斗接收机天线进行差分处理,作为参考站的北斗接收机天线坐标不设置为固定值,采用实时动态定位的结果;作为流动站的北斗接收机,与参考站进行差分处理,解算获得流动站相对于参考站的基线向量;

[0027] 采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量;在双差观测模型中,同一时刻,两台接收机对同一颗卫星的观测结果进行差分,消除接收机之间的共性误差;同一接收机在两个不同时间对两颗不同卫星的观测值进行差分,消除卫星之间的共性误差;构建的星站双差模型为:

$$[0028] \quad \nabla \Delta \rho_{i,r}^{j,s}(t) = \nabla \Delta R_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta I_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta T_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta \delta others_{i,r}^{j,s}(t);$$

$$[0029] \quad \lambda \nabla \Delta \varphi_{i,r}^{j,s}(t) = \nabla \Delta R_{i,r}^{j,s}(t) - \lambda \nabla \Delta N_{i,r}^{j,s}(t_0) + \nabla \Delta \delta I_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta \delta T_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta \delta others_{i,r}^{j,s}(t);$$

[0030] 式中, $\nabla \Delta \rho_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差伪距观测值, 单位为米, $\nabla \Delta R_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差几何距离, $\nabla \Delta \delta I_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差电离层误差, $\nabla \Delta \delta T_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差对流层误差, $\nabla \Delta \delta others_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差其他误差项, 单位为米, $\nabla \Delta \varphi_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差载波相位观测值, 单位为周, $\nabla \Delta N_{i,r}^{j,s}(t_0)$ 为初始历元 t_0 时确定的周模糊度的星站双差值, 单位为周, i, j 分别为流动站和非参考卫星编号, r, s 分别为参考站及参考卫星编号, ρ 为卫星到接收机的原始伪距观测量, 单位为米; R 为卫星到接收机的空间几何距离, 单位为米; I, T 分别为电离层和对流层误差, $\delta others$ 为其他误差, N 为载波相位观测值中整周模糊度值, 单位为周; λ 为频率的波长。

[0031] 在步骤S1024中, 采用整周模糊度降相关整数最小二乘估计LAMBDA算法, 解算模糊度并得到整数解, 包括: 通过转换浮点解模糊度值得方差协方差矩阵, 实现整数降相关, 削弱浮点解模糊度之间得相关性, 减少模糊度搜索空间, 实现模糊度快速固定; 具体步骤为:

[0032] (a) 在无外界约束条件下, 通过双差观测数据, 采用最小二乘方法解算多条基线得到的北斗双差观测, 得到参数解 $\hat{Z}$ 和 $\hat{B}$ 以及协因数矩阵 $Q_{\hat{Z}\hat{Z}}, Q_{\hat{B}\hat{B}}, Q_{\hat{Z}\hat{B}}$, 多条基线得到的北斗双差观测方程为:

$$[0033] \quad E(Y) = AZ + GB, Z \in Z^{m \times n}, B \in R^{3 \times n};$$

$$[0034] \quad D(\text{vec}(Y)) = Q_{YY} = P \otimes Q;$$

[0035] 式中, $E(Y)$ 为观测方程, Z 为基线的未知双差参数, $Z = [z_1 \ z_1 \ \cdots \ z_n]$, z_n 为 n 条基线未知的双差参数; B 为基线长度的未知参数, $B = [b_1 \ b_1 \ \cdots \ b_n]_{3 \times n}$, b_n 为第 n 条基线的未知基线长参数; $Z^{m \times n}$ 为 $m \times n$ 的基线的未知双差参数矩阵, $R^{3 \times n}$ 为 $3 \times n$ 的包含 n 条基线的矩阵, $D(\text{vec}(Y))$ 为观测向量的协方差, Q_{YY} 为观测量的协方差矩阵; $Y = [y_1 \ y_1 \ \cdots \ y_n]$, y_n 为 n 条基线的码和相位线性化观测向量; A 为 $2n \times n$ 的模糊度系数阵, G 为 $2m \times 3$ 的映射矩阵, P 为基线间的协因数阵, Q 为伪距和相位的协因数阵, $\otimes$ 为 Kronecker 积;

[0036] (b) 构建模糊度搜索得最优问题, 表达式为:

$$[0037] \quad \check{Z}^U = \argmin_{Z \in i \times n} \| \text{vec}(Z - \hat{Z}) \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2;$$

$$[0038] \quad \Omega^U(\chi^2) = \{ Z \in Z^{n \times m} \mid \| \text{vec}(Z - \hat{Z}) \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2 \leq \chi^2 \};$$

[0039] 式中, $\check{Z}^U$ 为最优整数模糊度解, $i \times n$ 为搜索空间的维度, $\text{vec}()$ 为矩阵的向量化

运算, $\hat{Z}$ 为模糊度浮点解, $\| \cdot \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2$ 为加权欧几里得范数, 衡量了 Z 与 $\hat{Z}$ 之间的加权距离, Ω^U 为约束集合, 表示所有可能的模糊度解的集合, χ 为给定的常数, 用于定义搜索空间的大小;

[0040] 通过搜索条件 $\| \text{vec}(Z - \hat{Z}) \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2$ 的约束下, 距离 $\hat{Z}$ 最近的模糊度向量;

[0041] (c) LAMBDA 算法将初始的 $Q_{\hat{Z}\hat{Z}}$ 和模糊度浮点解 $\hat{Z}$ 进行高斯正交变换处理, 降低浮点解模糊度的内相关性, 对浮点解进行降低相关性处理, 最终获得整数解;

[0042] $\hat{n} = \hat{N}^T \cdot \hat{Z}$; $Q_{\hat{n}\hat{n}} = N^T \cdot Q_{\hat{Z}\hat{Z}} \cdot N$; 式中, $\hat{n}$ 为通过变换得到的整数模糊度向量, $\hat{N}^T$ 为正交变换矩阵 N 的转置, N^T 为正交变换矩阵 N 的转置, $Q_{\hat{n}\hat{n}}$ 为整数模糊度向量 $\hat{n}$ 的协方差矩阵, N 为正交整数变换矩阵, 模值为 1, 并且通过变换后的 $Q_{\hat{n}\hat{n}}$ 的非对角元素的小于或等于 0.5;

[0043] (d) 整周模糊度的检验与回代, 采用显著性比例检验, 设定阈值 ratio 值, 检验次小值与最小值的比值 F , 若检验值 F 大于阈值, 则模糊度搜索正确;

$$[0044] \quad \frac{F_{\text{次小}}}{F_{\text{最小}}} \geq \text{ratio};$$

[0045] 式中, $F_{\text{次小}}$ 为目标函数值的次小值, $F_{\text{最小}}$ 为目标函数值的最小值, 最优整数模糊度解 $\check{Z}^U$ 的目标函数值, ratio 为预先设定的阈值, 取值范围一般为 2 到 3;

[0046] 则认为 $F_{\text{最小}}$ 对应的整周模糊度值为正确的模糊度组合。

[0047] 在步骤 S103 中, 根据实时获取的四个北斗接收机天线基线网数据, 利用基线长度先验约束和动态无约束网平差解算, 探测和削弱基线向量解算初值结果中的粗差和闭合差, 获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立基线向量结果; 具体包括:

[0048] S1031, 基于基线长度约束的动态基线解算;

[0049] 添加的伪测量方程的量测值 y 、量测方程 $h(x)$ 、观测矩阵 H 、量测噪声的协方差 R 分别为:

$$[0050] \quad y = (r_{\text{baseline}});$$

$$[0051] \quad h(x) = (|r_r(t_r) - r_b(t_r)|);$$

$$[0052] \quad H = \left(\frac{(r_r(t_r) - r_b(t_r))^T}{|r_r(t_r) - r_b(t_r)|} \right);$$

$$[0053] \quad R = (\sigma_r^2);$$

[0054] 式中, r_{baseline} 为基线长度, r_r 为流动站的位置, t_r 为信号接收时间, r_b 为基站的位置, σ_r 为基线长度的误差, T 为表示转置;

[0055] S1032, 基于动态无约束网平差解算的动态基线解算;

[0056] 根据误差方程、基准方程以及方程-协方差阵,按照最小二乘原理进行平差解算,获得平差后的结果:

$$[0057] \quad \delta \mathbf{x} = (\mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{L};$$

[0058] 式中, $\delta \mathbf{x}$ 为平差后的参数改正数, $\mathbf{B}$ 为系数矩阵, $\mathbf{T}$ 为转置, $\mathbf{D}^{-1}$ 为观测值的协方差矩阵 $\mathbf{D}$ 的逆矩阵, $\mathbf{G}$ 为基准方程的系数矩阵, $\mathbf{L}$ 为观测值的误差向量;

[0059] 平差后各个点的坐标 $\mathbf{X}$ 表示为:

$$[0060] \quad \mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}} + \delta \mathbf{x};$$

[0061] 式中, $\hat{\mathbf{X}}$ 为平差前的初始坐标值;

[0062] 平差后的单位权中误差为:

$$[0063] \quad \hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V}}{3n - 3m + 3}};$$

[0064] 式中, n 为组成北斗网的基线数, m 为参与平差的总测站点数, $\hat{\sigma}_0$ 为单位权中误差, $\mathbf{V}$ 为改正数向量。

[0065] 在步骤S104中,利用四天线解算得到的天线间实时基线向量结果,通过坐标转换,获得当前载体在航向、横滚和俯仰方向的实时姿态角;包括:

[0066] S1041,基线向量在载体坐标系和导航坐标系下的关系;

$$[0067] \quad \mathbf{l}_n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{l}_b;$$

[0068] 式中, $\mathbf{l}_n, \mathbf{l}_b$ 分别为基线在导航坐标系和载体坐标系下的基线向量, $\mathbf{C}_b^n$ 为载体坐标系到导航坐标系的姿态转移矩阵;

[0069] S1042,直接法求解出航向角、俯仰角和横滚角的近似值 $\psi_0, \theta_0, \gamma_0$;

[0070] S1043,通过旋转变换的关系,利用最小二乘法进行姿态解算,求出载体的姿态信息。

[0071] 在步骤S105中,基于浮标物理参数进行浮标姿态校正后,获得精密的浮标大地高程观测结果,包括:

[0072] S1051,基于岸上北斗参考站数据,与海上浮标多天线构成基线动态解算,获得浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程 H_g ;

[0073] S1052,进行基于北斗接收机天线间的动态基线矢量的姿态解算,得到浮标体的倾斜角度 α ,已知浮标载体上的横滚角 γ 和俯仰角 θ ,设有横滚角、俯仰角和航向角方向上的单位矢量,则横滚角和俯仰角方向上的单位矢量分别在载体坐标系中的坐标向量为:

$$[0074] \quad \mathbf{a} = (\cos \gamma, 0, \sin \gamma);$$

$$[0075] \quad \mathbf{b} = (0, \cos \theta, \sin \theta);$$

[0076] 为了估计浮标载体倾斜角度,确定横滚角和俯仰角单位向量所在平面的法线与铅垂线的夹角,则方向向量 $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ 与法向量 $\mathbf{n}$ 的关系满足:

$$[0077] \quad \begin{cases} \mathbf{a} \cdot \mathbf{n} = 0; \\ \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} = 0; \end{cases}$$

[0078] 定义铅垂线方向的向量为 $\mathbf{c} = (0,0,1)$,则此处添加条件,令法向量 $\mathbf{n}$ 的 Z 轴方向为正,且值为1;获得法向量 $\mathbf{n} = (-\tan\gamma, -\tan\theta, 1)$,法向量 $\mathbf{n}$ 与 $\mathbf{c}$ 的夹角为浮标载体倾斜角度 α ,表达式为:

$$[0079] \quad \cos \alpha = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{c}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{c}|} = \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \gamma + \tan^2 \theta + 1}};$$

[0080] 式中, $\mathbf{c}$ 为铅垂线方向的向量;

[0081] S1053,根据测量结果,进行多天线北斗海面高度 H_s 的标定,海面高度标定公式表达为:

$$[0082] \quad H_s = H_g - (H_d \cos \alpha);$$

[0083] 式中, H_g 为浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程, H_d 为北斗接收机天线相位中心到水面的高度。

[0084] 本发明的另一目的在于提供一种基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正系统,该系统实施所述基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法,该系统包括:

[0085] 北斗接收机数据采集系统,用于布设北斗接收机设备,并进行观测数据的采集工作,获得观测数据;并接收岸上北斗参考站数据,将浮标上北斗主天线与岸上北斗参考站数据进行差分定位,获得浮标主天线相对于参考站的差分定位结果;

[0086] 北斗动态基线精密处理模块,采用动差模式进行四个北斗接收机天线的基线向量解算;根据实时获取的四个北斗接收机天线的基线网数据,通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算,探测和削弱基线向量中的粗差结果,获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立基线向量结果;

[0087] 浮标姿态精确估计与改正模块,通过利用实时计算的基线向量,获得当前实时姿态结果;基线向量确定的浮标姿态结果经过初始姿态改正,消除基线网与观测载体平台之间由于安置导致的相对初始姿态误差;利用基线网获得的精确浮标姿态结果,改正浮标受姿态引起的高程误差,获得经过姿态改正后的精密海洋浮标观测结果

[0088] 结合上述的所有技术方案,本发明所具备的有益效果为:本发明提出了一种基于多天线北斗的海洋浮标姿态精确校正系统及方法,进行浮标姿态校正,获得精密的浮标大地高程观测结果,减弱复杂海况对浮标测高结果的影响,提高海洋浮标在恶劣海况下的适用性和准确性。

[0089] 本发明用于海洋浮标姿态的精确校准。主要包括北斗接收机数据采集系统、北斗动态基线精密处理模块和载体姿态精确估计与改正模块组成。利用全天候、实时性、高精度的北斗接收机获取载体上四个北斗接收机天线观测数据,北斗接收机天线呈现对称十字分布,尽可能在狭小的观测平台获得最大基线长度;北斗观测数据经过数据预处理,剔除粗差和探测周跳后,采用动差模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量值;根据实时获取的四个北斗接收机天线基线网数据,通过基线长度

先验约束和动态无约束网平差解算,探测和削弱北斗基线向量中的粗差结果,获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立基线向量结果;利用实时计算的基线向量,获得当前实时姿态结果;基于浮标观测载体设计参数进行姿态校正,获得经过姿态改正后的精密海洋浮标观测结果,减弱复杂海况对浮标载体观测平台结果的影响,提高海洋浮标在恶劣海况下的适用性。

[0090] 本发明采用低成本北斗接收机和改进算法,在保证精度的前提下大幅降低设备成本和维护费用,有效延长设备使用寿命,有效减少海洋设备维护成本。极大促进了低成本浮标在海洋观测中的应用,促进海洋经济活动的开展。与传统惯性设备相比,获得绝对的姿态信息,为国产海洋装备提供了高精度高可靠性的姿态观测系统,获得经过姿态改正后的精密海洋浮标观测结果,减弱复杂海况对浮标载体观测平台结果的影响,提高海洋浮标在恶劣海况下的适用性。

附图说明

[0091] 此处的附图被并入说明书中并构成本说明书的一部分,示出了符合本公开的实施例,并与说明书一起用于解释本公开的原理;

[0092] 图1是本发明实施例提供的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法流程图;

[0093] 图2是本发明实施例提供的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正系统示意图;

[0094] 图3是本发明实施例提供的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法原理图;

[0095] 图4是本发明实施例提供的四台接收机呈对称十字安装在浮标上示意图;

[0096] 图5是本发明实施例提供的载体坐标系示意图;

[0097] 图中:1、北斗接收机数据采集系统;2、北斗动态基线精密处理模块;3、浮标姿态精确估计与改正模块。

具体实施方式

[0098] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图对本发明的具体实施方式做详细的说明。在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明。但是本发明能够以很多不同于在此描述的其他方式来实施,本领域技术人员可以在不违背本发明内涵的情况下做类似改进,因此本发明不受下面公开的具体实施的限制。

[0099] 本发明的创新点在于:

[0100] (1) 本发明用于海洋浮标姿态的精确校准,主要包括北斗接收机数据采集系统、北斗动态基线精密处理模块和载体姿态精确估计与改正模块组成。利用全天候、实时性、高精度的北斗接收机获取载体上四个北斗接收机天线观测数据,采用动差模式获得高精度的动态基线向量;

[0101] (2) 根据实时获取的四个北斗接收机天线基线网数据,通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算,提高基线向量解算精度并探测和剔除粗差结果,为姿态测量提供高精度高可靠性的基线向量观测值,实时获得高精度的载体三维姿态值;

[0102] (3) 利用当前实时姿态结果,基于浮标观测载体设计参数,进行浮标姿态校正,获得经过姿态改正后的精密海洋浮标观测结果,减弱复杂海况对浮标载体观测平台结果的影响,提高海洋浮标在恶劣海况下的适用性。

[0103] 实施例1,如图1所示,本发明实施例提供的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法包括:

[0104] S101,利用北斗接收机数据采集系统中的北斗接收机,获取浮标上四个北斗接收机天线的北斗观测数据;并接收岸上北斗参考站数据,将浮标上北斗主天线与岸上北斗参考站数据进行差分定位,获得浮标主天线相对于参考站的差分定位结果;

[0105] 利用全天候、实时性、高精度的北斗接收机数据采集系统中的北斗接收机获取浮标上四个北斗接收机天线的北斗观测数据;北斗接收机数据采集系统包含浮标、北斗接收机、北斗接收机天线、数据采集模块和电源模块;

[0106] 四台北斗接收机布设在浮标上,呈现对称十字分布,并加以固定。四台北斗接收机与外置的四个北斗接收机天线连接;

[0107] 数据采集模块进行数据存储和数据传输;

[0108] 电源模块采用太阳能电池板和蓄电池组合供电方式,作为电力供应系统。

[0109] S102,浮标北斗实时观测数据经过数据预处理,剔除粗差和探测周跳后,采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量初值;具体包括:

[0110] S1021,对采集到的北斗观测数据通过“探测—识别—调节”的方式对粗差进行后验处理;

[0111] S1022,对剔除粗差的北斗观测数据采用双频码相组合法和电离层残差法进行更加严格的周跳探测;

[0112] S1023,采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量值;

[0113] S1024,采用整周模糊度降相关整数最小二乘估计LAMBDA算法,有效地解算模糊度并得到整数解,可以大大提高基线向量的精度。

[0114] S103,根据实时获取的四个北斗接收机天线基线网数据,利用基线长度先验约束和动态无约束网平差解算,探测和削弱基线向量解算初值结果中的粗差和闭合差;

[0115] 四天线的的设计具有较多的冗余观测,可以保证低成本北斗接收机设备提供稳定可靠的GNSS定位结果,并采用组网平差方式进一步提高解算的精度和可靠性,获得相对主天线的北斗天线间高精度基线向量值。具体包括:

[0116] S1031,基于基线长度约束的动态基线解算;

[0117] S1032,基于动态无约束网平差解算的动态基线解算。

[0118] S104,利用四天线解算得到的天线间实时基线向量结果,通过坐标转换,获得当前载体在航向、横滚和俯仰方向的实时姿态角;

[0119] 通过北斗四天线方法可以快速高精度的获得绝对姿态角,避免了传统惯性姿态设备在长时间运行中会发生较大偏移,需要定位定期维护校正的问题,有效解决海上观测设备维护难题。具体包括:

[0120] S1041,基线向量在载体坐标系和导航坐标系下的关系;

[0121] $l_n = C_b^n l_b;$

[0122] 式中, l_n, l_b 分别为基线在导航坐标系和载体坐标系下的基线向量, C_b^n 为载体坐标系到导航坐标系的姿态转移矩阵;

[0123] S1042, 直接法求解出姿态角(航向角、俯仰角和横滚角)的近似值 $\psi_0, \theta_0, \gamma_0$;

[0124] S1043, 通过旋转变换的关系, 利用最小二乘法进行姿态解算, 求出载体的姿态信息;

[0125] S105, 基于浮标物理参数进行浮标姿态校正后, 获得精密的浮标大地高程观测结果; 基于GNSS系统实时三维姿态角度信息, 为海洋浮标观测载体提供实时姿态改正值, 保证浮标载体上设备对海洋水面高度的垂直测量, 修正浮标受波浪涌浪影响造成浮标体倾斜带来的高度误差, 消除基于惯性设备测量姿态角改正带来的系统性偏移误差; 具体包括:

[0126] S1051, 基于岸上北斗参考站数据, 与海上浮标多天线构成基线动态解算, 获得浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程 H_g ;

[0127] S1052, 进行基于北斗接收机天线间的动态基线矢量的姿态解算, 得到浮标体的倾斜角度 α , 已知浮标载体上的横滚角 γ 和俯仰角 θ , 假设有横滚角、俯仰角和航向角方向上的单位矢量, 则横滚角和俯仰角方向上的单位矢量分别在载体坐标系中的坐标向量为:

[0128] $a = (\cos\gamma, 0, \sin\gamma);$

[0129] $b = (0, \cos\theta, \sin\theta);$

[0130] 为了估计浮标载体倾斜角度, 需要确定横滚角和俯仰角单位向量所在平面的法线与铅垂线的夹角。则方向向量 a, b 与法向量 n 的关系满足:

[0131]
$$\begin{cases} a \cdot n = 0 \\ b \cdot n = 0 \end{cases};$$

[0132] 定义铅垂线方向的向量为 $c = (0, 0, 1)$, 则此处添加条件, 令法向量 n 的 Z 轴方向为正, 且值为1; 获得法向量 $n = (-\tan\gamma, -\tan\theta, 1)$, 法向量 n 与 c 的夹角为浮标载体倾斜角度 α , 表达式为:

[0133]
$$\cos\alpha = \frac{n \cdot c}{|n||c|} = \frac{1}{\sqrt{\tan^2\gamma + \tan^2\theta + 1}};$$

[0134] 式中, c 为铅垂线方向的向量;

[0135] S1053, 根据测量结果, 进行多天线北斗海面高度 H_s 的标定, 海面高度标定公式表达为:

[0136] $H_s = H_g - (H_d \cos\alpha);$

[0137] 式中, H_g 为浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程, H_d 为北斗接收机天线相位中心到水面的高度。

[0138] 通过上述实施例可知, 本发明旨在基于浮标物理参数进行浮标姿态校正后, 获得精密的浮标大地高程观测结果, 减弱复杂海况对浮标测高结果的影响, 提高海洋浮标在恶

劣海况下的适用性。

[0139] 实施例2,如图2所示,本发明实施例提供的基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正系统包括:北斗接收机数据采集系统1、北斗动态基线精密处理模块2、浮标姿态精确估计与改正模块3。

[0140] 所述北斗接收机数据采集系统1,用于布设北斗接收机设备,并进行观测数据的采集工作,尽可能获得高质量的观测数据(北斗观测数据);

[0141] 所述北斗动态基线精密处理模块2,采用动差分模式进行四个北斗接收机天线的基线向量解算;根据实时获取的四个北斗接收机天线的基线网数据,通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算,探测和削弱基线向量(北斗基线向量)中的粗差结果,获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立基线向量结果;

[0142] 所述浮标姿态精确估计与改正模块3,通过利用实时计算的基线向量,获得当前实时姿态结果;基线向量确定的浮标姿态结果经过初始姿态改正,消除基线网与观测载体平台之间由于安置导致的相对初始姿态误差。利用基线网获得的精确浮标姿态结果,改正浮标受姿态引起的高程误差,获得经过姿态改正后的精密海洋浮标观测结果,减弱复杂海况对浮标载体观测平台结果的影响,提高海洋浮标在恶劣海况下的适用性;

[0143] 示例性的,北斗接收机数据采集系统包含浮标、北斗接收机、北斗接收机天线、数据采集模块和电源模块;

[0144] 所述浮标的底部设计有锚链附件,通过锚链将浮标安置在指定海域进行观测,确保浮标不发生大范围的漂移。

[0145] 所述的北斗接收机放置并固定在浮标工作舱内平台上,通过连接线与外置的四个北斗接收机天线连接。所述的四个北斗接收机天线布设在浮标桅杆顶部平台外侧边缘上,呈现对称十字分布,通过金属连接杆加以固定,保证顶部处于开阔无遮挡环境下。

[0146] 所述数据采集模块记录四个北斗接收机天线观测的北斗数据,并将北斗数据发送给处理器进行处理。

[0147] 所述电源模块采用太阳能电池板和蓄电池组合供电方式,作为电力供应系统,其电池电量保证设备在无太阳能情况下连续工作2周。

[0148] 所述北斗动态基线精密处理模块2包括采用动差分模式进行四个北斗接收机天线的基线向量解算;根据实时获取的四个北斗接收机天线的基线网数据,通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算,探测和削弱基线向量中的粗差结果,获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立的基线向量结果。

[0149] 采集到的观测数据通过“探测—识别—调节”的方式,对粗差进行处理。

[0150] 对已经剔除粗差的观测数据增加双频码相组合法和电离层残差法进行更加严格的周跳探测。

[0151] 采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量值。动差分模式包括:利用安装在运动载体上的两个北斗接收机天线进行差分处理,其中作为参考站的北斗接收机天线坐标不再设置为固定值,而是采用实时动态定位的结果。作为流动站的北斗接收机,与参考站进行差分处理,解算获得流动站相对于参考站的基线向量。

[0152] 具体包括:在双差观测模型中,同一时刻,两台接收机对同一颗卫星的观测结果进

行差分,消除接收机之间的共性误差。同一接收机在两个不同时间对两颗不同卫星的观测值进行差分,消除卫星之间的共性误差。构建的星站双差模型为:

$$[0153] \quad \nabla \Delta \rho_{i,r}^{j,s}(t) = \nabla \Delta R_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta I_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta T_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta \delta others_{i,r}^{j,s}(t);$$

$$[0154] \quad \begin{aligned} & \lambda \nabla \Delta \varphi_{i,r}^{j,s}(t) \\ & = \nabla \Delta R_{i,r}^{j,s}(t) - \lambda \nabla \Delta N_{i,r}^{j,s}(t_0) + \nabla \Delta I_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta T_{i,r}^{j,s}(t) + \nabla \Delta \delta others_{i,r}^{j,s}; \end{aligned}$$

[0155] 式中, $\nabla \Delta \rho_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差伪距观测值, 单位为米, $\nabla \Delta R_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差几何距离, 单位为米, $\nabla \Delta I_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差电离层误差, $\nabla \Delta T_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差对流层误差, $\nabla \Delta \delta others_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差其他误差项, 单位为米, $\nabla \Delta \varphi_{i,r}^{j,s}(t)$ 为在 t 时刻的星站双差载波相位观测值, 单位为周, $\nabla \Delta N_{i,r}^{j,s}(t_0)$ 为初始历元 t_0 时确定的周模糊度的星站双差值, 单位为周, i, j 分别为流动站和非参考卫星编号, r, s 分别为参考站及参考卫星编号, ρ 为卫星到接收机的原始伪距观测量, 单位为米; R 为卫星到接收机的空间几何距离, 单位为米; I, T 分别为电离层和对流层误差, $\delta others$ 为其他误差, N 为载波相位观测值中整周模糊度值, 单位为周; λ 为频率的波长。

[0156] 示例性的, 使用载波相位观测值进行模糊度的求解, 采用整周模糊度降相关整数最小二乘估计 (LAMBDA) 算法, 通过转换浮点解模糊度值得方差协方差矩阵, 实现整数降相关, 削弱浮点解模糊度之间得相关性, 减少模糊度搜索空间, 实现模糊度快速固定。

[0157] 示例性的, 所述根据实时获取的四个北斗接收机天线的基线网数据, 通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算, 探测和削弱北斗基线向量中的粗差结果, 获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立的基线向量结果包括:

[0158] (1) 基于基线长度约束的动态基线解算。

[0159] 添加的伪测量方程的量测值 y 、量测方程 $h(x)$ 、观测矩阵 H 、量测噪声的协方差 R 分别为:

$$[0160] \quad y = (r_{baseline});$$

$$[0161] \quad h(x) = (|r_r(t_r) - r_b(t_r)|);$$

$$[0162] \quad H = \left(\frac{(r_r(t_r) - r_b(t_r))^T}{|r_r(t_r) - r_b(t_r)|} \right);$$

$$[0163] \quad R = (\sigma_r^2);$$

[0164] 式中, $r_{baseline}$ 为基线长度, r_r 为流动站的位置, t_r 为信号接收时间, r_b 为基站的位置, σ_r 为基线长度的误差, T 表示转置;

[0165] (2) 基于动态无约束网平差解算的动态基线解算。

[0166] 根据误差方程、基准方程以及方程-协方差阵, 按照最小二乘原理进行平差解算, 即可获得平差后的结果:

[0167] $\delta \mathbf{x} = (\mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{L};$

[0168] 式中, $\delta \mathbf{x}$ 为平差后的参数改正数, $\mathbf{B}$ 为系数矩阵, $\mathbf{T}$ 为转置, $\mathbf{D}^{-1}$ 为观测值的协方差矩阵 $\mathbf{D}$ 的逆矩阵, $\mathbf{G}$ 为基准方程的系数矩阵, $\mathbf{L}$ 为观测值的误差向量;

[0169] 平差后各个点的坐标 $\mathbf{X}$ 表示为:

[0170] $\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}} + \delta \mathbf{x};$

[0171] 式中, $\hat{\mathbf{X}}$ 为平差前的初始坐标值;

[0172] 平差后的单位权中误差为:

[0173] $\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V}}{3n - 3m + 3}};$

[0174] 式中, n 为组成北斗网的基线数, m 为参与平差的总测站点数, $\hat{\sigma}_0$ 为单位权中误差, $\mathbf{V}$ 为改正数向量。

[0175] 示例性的, 浮标姿态精确估计与改正模块3中, 通过利用实时计算的基线向量, 获得当前实时姿态结果; 基线向量确定的浮标姿态结果经过初始姿态改正, 消除基线网与观测载体平台之间由于安置导致的相对初始姿态误差。利用基线网获得的精确浮标姿态, 改正浮标受姿态引起的高程误差, 获得经过姿态改正后的精密海洋浮标观测结果, 具体包括:

[0176] (1) 基于岸上北斗参考站数据, 与海上浮标多天线构成基线动态解算, 获得浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程 H_g ;

[0177] (2) 进行基于北斗接收机天线间的动态基线矢量的姿态解算, 估计得到浮标体的倾斜角度 α , 已知浮标载体上的横滚角 γ 和俯仰角 θ , 假设有横滚角、俯仰角和航向角方向上的单位矢量, 则横滚角和俯仰角方向上的单位矢量分别在载体坐标系中的坐标向量为:

[0178] $\mathbf{a} = (\cos \gamma, 0, \sin \gamma);$

[0179] $\mathbf{b} = (0, \cos \theta, \sin \theta);$

[0180] 为了估计浮标载体倾斜角度, 需要确定横滚角和俯仰角单位向量所在平面的法线与铅垂线的夹角。则方向向量 $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ 与法向量 $\mathbf{n}$ 的关系满足:

[0181]
$$\begin{cases} \mathbf{a} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} = 0 \end{cases};$$

[0182] 定义铅垂线方向的向量为 $\mathbf{c} = (0, 0, 1)$, 则此处添加条件, 令法向量 $\mathbf{n}$ 的 Z 轴方向为正, 且值为1; 获得法向量 $\mathbf{n} = (-\tan \gamma, -\tan \theta, 1)$, 法向量 $\mathbf{n}$ 与 $\mathbf{c}$ 的夹角为浮标载体倾斜角度 α , 表达式为:

[0183]
$$\cos \alpha = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{c}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{c}|} = \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \gamma + \tan^2 \theta + 1}};$$

[0184] (3) 根据测量结果, 进行多天线北斗海面高度 H_s 的标定, 海面高度标定公式表达

为:

$$[0185] \quad H_s = H_g - (H_d \cos \alpha);$$

[0186] 式中, H_g 为浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程, H_d 为北斗接收机天线相位中心到水面的高度。

[0187] 实施例3, 示例性的, 作为本发明的另一种实施方式, 如图3所示, 基于多天线北斗的海洋浮标观测载体姿态校正方法包括:

[0188] S1, 利用全天候、实时性、高精度的北斗接收机获取浮标上四个北斗接收机天线观测数据; 北斗接收机天线呈现对称十字分布, 尽可能在狭小的浮标平台获得最大基线长度。

[0189] 在步骤S1中, 组装北斗接收机数据采集系统, 包括浮标、北斗接收机、四个北斗接收机天线、数据采集模块和电源模块, 完成整个系统的组装。

[0190] S11, 组装北斗接收机数据采集系统: 浮标体底部设计有锚链附件, 通过锚链将浮标安置在指定海域进行观测, 确保浮标不发生大范围的漂移。北斗接收机放置并固定在浮标工作舱内平台上, 通过连接线与外置的四个北斗接收机天线连接。所述的四个北斗接收机天线布设在浮标桅杆顶部平台外侧边缘上, 呈现对称十字分布, 通过金属连接杆加以固定, 保证顶部处于开阔无遮挡环境下。北斗接收机天线采用扼流圈天线, 设备数据接入数据采集模块。如图4所示的四台接收机天线呈对称十字安装在浮标上示意图;

[0191] S12, 数据采集模块包含: 数据存储方案和数据传输方案。

[0192] 数据存储方案: 采用TF卡作为存储介质, TF卡具有功耗低、体积小、替换便捷的优点, 且写入速度完全满足存储的需要。

[0193] 数据传输方案: 采用基于4G模块的无线传输方式, 同时预留了RJ45网口和USART串口, 提供的网口可接入有线网、无线路由器等设备, USART串口可供数据调试和外接大功率电台等设备。

[0194] 使用北斗接收机采集北斗卫星的原始观测数据如伪距、载波相位观测值、多普勒频移等基本观测量, 存储采集观测的数据, 完成数据采集。

[0195] S13, 电源模块: 提供稳定连续的电源, 供电模块采用9-36V宽电压设计, 采用太阳能电池板和蓄电池组合供电方式, 对数据采集系统提供单一工作电压。太阳能电池板安装在浮标平台侧面, 浮标侧面装有密封的电池舱, 电池舱中装有免维护蓄电池, 其电池电量保证设备在无太阳能情况下连续工作2周。

[0196] S2, 北斗观测数据经过数据预处理, 剔除粗差和探测周跳后, 采用动态差分模式进行高精度的动态基线向量解算, 获取四个北斗接收机天线之间的基线向量值。

[0197] S21, 在海洋复杂条件下, 北斗观测值通常不可避免地包含粗差。采用数据探测的方法对粗差进行后验处理, 具体分为以下3个步骤:

[0198] S211, 探测: 通过统计量对数据进行探测, 计算出观测值的多余数量及其方差矩阵。利用卡方检验进行假设检验, 设定显著性水平。如果检验结果显著, 则说明观测值中存在异常数据, 备选假设成立, 进入进一步识别步骤; 反之, 若检验结果不显著, 则说明数据中无异常, 原假设成立, 探测过程终止。

[0199] S212, 识别: 通过标准化残差来构造检验统计量, 基于观测数据的残差和协方差矩阵进行计算。该检验量服从标准正态分布, 若检验结果超出显著性水平的临界值, 则表示异

常数据最可能出现在某个观测值上。此时,剔除该观测值后,重新进行平差,并使用整体检验的统计量判断是否还存在异常数据。如果发现异常,继续进行识别步骤,直到通过全局检验为止。

[0200] S213调节:最后利用剩余的观测值重新进行最小二乘估计得到可靠的结果,并将其输出;

[0201] S22,卫星信号被某些障碍物阻挡而无法到达接收机,或者由于外界干扰或接收机所处的动态条件恶劣而引起卫星信号的暂时失锁等会引起周跳问题,本发明采用双频码相组合法和电离层残差法进行更加严格的周跳探测。

[0202] S23,采用动差分模式进行高精度的动态基线向量解算,获取四个北斗接收机天线之间的基线向量值。动差分模式:利用安装在运动载体上的两个天线进行差分处理,基站的坐标不再设置为固定值。移动站不断接收卫星信号,同时接收来自移动基站的实时卫星观测数据,通过解算获得移动站到移动基站的基线向量;包括:

[0203] S231,北斗动差分定位采用双差观测模型。同一时刻,两台接收机对同一颗卫星的观测结果进行差分,消除接收机之间的共性误差。同一接收机在两个不同时间对两颗不同卫星的观测值进行差分,消除卫星之间的共性误差。

[0204] S232,构建星站双差模型;

[0205] S24,采用最小二乘模糊度降相关平差法(LAMBDA)算法,实现模糊度快速固定。

[0206] S241,在无外界约束条件下,直接采用了最小二乘方法解算多条基线得到的北斗双差观测,得到参数解 $\hat{Z}$ 和 $\hat{B}$ 以及协因数矩阵 $Q_{\hat{Z}\hat{Z}}, Q_{\hat{B}\hat{B}}, Q_{\hat{Z}\hat{B}}$,多条基线得到的北斗双差观测方程为:

$$[0207] \quad E(Y) = AZ + GB, Z \in Z^{m \times n}, B \in R^{3 \times n};$$

$$[0208] \quad D(\text{vec}(Y)) = Q_{YY} = P \otimes Q;$$

[0209] 式中, $E(Y)$ 为观测方程, Z 为基线的未知双差参数, $Z = [z_1 \ z_1 \ \cdots \ z_n]$, z_n 为 n 条基线未知的双差参数; B 为基线长度的未知参数, $B = [b_1 \ b_1 \ \cdots \ b_n]_{3 \times n}$, b_n 为第 n 条基线的未知基线长参数; $Z^{m \times n}$ 为 $m \times n$ 的基线的未知双差参数矩阵, $R^{3 \times n}$ 为 $3 \times n$ 的包含 n 条基线的矩阵, $D(\text{vec}(Y))$ 为观测向量的协方差, Q_{YY} 为观测量的协方差矩阵; $Y = [y_1 \ y_1 \ \cdots \ y_n]$, y_n 为 n 条基线的码和相位线性化观测向量; A 为 $2n \times n$ 的模糊度系数阵, G 为 $2m \times 3$ 的映射矩阵, P 为基线间的协因数阵, Q 为伪距和相位的协因数阵, $\otimes$ 为Kronecker积;

[0210] S242,构建模糊度搜索得最优问题:

$$[0211] \quad \check{Z}^U = \arg \min_{Z \in i \times n} \|\text{vec}(Z - \hat{Z})\|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2;$$

$$[0212] \quad \Omega^U(\chi^2) = \left\{ Z \in Z^{n \times m} \mid \|\text{vec}(Z - \hat{Z})\|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2 \leq \chi^2 \right\};$$

[0213] 式中, $\check{Z}^U$ 为最优整数模糊度解, $i \times n$ 为搜索空间的维度, $\text{vec}()$ 为矩阵的向量化

运算, $\hat{Z}$ 为模糊度浮点解, $\| \cdot \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2$ 为加权欧几里得范数, 衡量了 Z 与 $\hat{Z}$ 之间的加权距离, Ω^U 为约束集合, 表示所有可能的模糊度解的集合, χ 为给定的常数, 用于定义搜索空间的大小;

[0214] 通过搜索条件 $\| \text{vec}(Z - \hat{Z}) \|_{Q_{\hat{Z}\hat{Z}}}^2$ 的约束下, 距离 $\hat{Z}$ 最近的模糊度向量; 由于此时的搜索椭圆 $Q_{\hat{Z}\hat{Z}}$ 趋近于长条状, 搜索半径较大, 预备的模糊度值数据较多, 降低了模糊度搜索的效率。

[0215] S243, LAMBDA 算法将初始的 $Q_{\hat{Z}\hat{Z}}$ 和模糊度浮点解 $\hat{Z}$ 进行高斯正交变换处理, 降低浮点解模糊度的内相关性, 对浮点解进行一系列的降低相关性处理, 最终获得整数解。

[0216] $\hat{n} = \hat{N}^T \cdot \hat{Z}; Q_{\hat{n}\hat{n}} = N^T \cdot Q_{\hat{Z}\hat{Z}} \cdot N;$

[0217] 式中, $\hat{n}$ 为通过变换得到的整数模糊度向量, $\hat{N}^T$ 为正交变换矩阵 N 的转置, N^T 为正交变换矩阵 N 的转置, $Q_{\hat{n}\hat{n}}$ 为整数模糊度向量 $\hat{n}$ 的协方差矩阵, N 为正交整数变换矩阵, 模值为 1, 并且通过变换后的 $Q_{\hat{n}\hat{n}}$ 的非对角元素的小于或等于 0.5;

[0218] S244, 整周模糊度的检验与回代: 采用显著性比例检验, 即设定一个阈值, 称为 ratio 值, 检验次小值与最小值的比值 F , 若检验值 F 大于一定阈值, 说明模糊度搜索正确。

[0219] $\frac{F_{\text{次小}}}{F_{\text{最小}}} \geq \text{ratio};$

[0220] 式中, $F_{\text{次小}}$ 为目标函数值的次小值, $F_{\text{最小}}$ 为目标函数值的最小值, 最优整数模糊度解 $\hat{Z}^U$ 的目标函数值, ratio 为预先设定的阈值, 取值范围一般为 2 到 3;

[0221] 则认为 $F_{\text{最小}}$ 对应的整周模糊度值为正确的模糊度组合。

[0222] S25, 基线解算完成, 基线解算结果输出独立基线向量及其完整的方差-协方差阵。

[0223] 具体可表示为:

[0224] $D = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta X}^2 & \sigma_{\Delta X \Delta Y} & \sigma_{\Delta X \Delta Z} \\ \sigma_{\Delta Y \Delta X} & \sigma_{\Delta Y}^2 & \sigma_{\Delta Y \Delta Z} \\ \sigma_{\Delta Z \Delta X} & \sigma_{\Delta Z \Delta Y} & \sigma_{\Delta Z}^2 \end{bmatrix};$

[0225] 式中, $\sigma_{\Delta X}^2$ 、 $\sigma_{\Delta Y}^2$ 、 $\sigma_{\Delta Z}^2$ 分别表示获得基线向量在三轴方向的方差, 其余元素表示协方差。

[0226] S3, 根据实时获取的四个北斗接收机天线的基线网数据, 通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算, 探测和削弱北斗基线向量中的粗差结果, 获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立的基线向量结果。具体包括:

[0227] S31, 基于基线长度约束的动态基线解算。

[0228] 在构建北斗的观测方程时, 将基线长度约束添加为伪测量方程, 来提升在观测环

境较差时的浮点解精度。

[0229] 添加的伪测量方程的量测值 y 、量测方程 $h(x)$ 、观测矩阵 H 、量测噪声的协方差 R 分别为：

$$[0230] \quad y = (r_{baseline});$$

$$[0231] \quad h(x) = (|r_r(t_r) - r_b(t_r)|);$$

$$[0232] \quad H = \left(\frac{(r_r(t_r) - r_b(t_r))^T}{|r_r(t_r) - r_b(t_r)|} \right);$$

$$[0233] \quad R = (\sigma_r^2);$$

[0234] 式中, $r_{baseline}$ 表示基线长度, r_b 表示基站的位置, r_r 表示流动站的位置, t_r 表示信号接收时间, σ_r 表示基线长度的误差。

[0235] S32,基于动态无约束网平差解算的动态基线解算。

[0236] S321,北斗网平差的误差方程。

[0237] 北斗网三维无约束平差所采用的观测值均为基线向量,即基线的起点到终点的坐标差,因此,对于每一条基线向量都可以列出如下误差方程

$$[0238] \quad \begin{bmatrix} v_{\Delta x} \\ v_{\Delta y} \\ v_{\Delta z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_i \\ dY_i \\ dZ_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_j \\ dY_j \\ dZ_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} - X_i + X_j \\ \Delta Y_{ij} - Y_i + Y_j \\ \Delta Z_{ij} - Z_i + Z_j \end{bmatrix};$$

[0239] 式中, (X_i, Y_i, Z_i) 和 (X_j, Y_j, Z_j) 分别表示 i 、 j 点的坐标, $(\Delta X_{ij}, \Delta Y_{ij}, \Delta Z_{ij})$ 表示基线解算求得的 i 、 j 点构成的基线向量, $(v_{\Delta x}, v_{\Delta y}, v_{\Delta z})$ 表示通过点位坐标之差求出的基线向量和基线解算求得的基线向量差异值, (dX_i, dY_i, dZ_i) 、 (dX_j, dY_j, dZ_j) 表示改正值。

[0240] S322,本发明采用秩亏自由网基准的方法构建北斗网基准方程。

[0241] 秩亏自由网基准以整个网的质心为基准,所有测站的坐标都根据平差进行改正,得到对应的改正值。则此时基准方程可写为:

$$[0242] \quad G\hat{X} = 0;$$

$$[0243] \quad \text{式中: } G = [I_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3}];$$

[0244] S323,北斗网平差的观测值权阵。

[0245] 在北斗网的三维无约束平差中,基线向量观测值权阵通常由基线解算时得出各基线向量的方差-协方差阵来确定。方差-协方差阵可在进行基线解算的时候获得,具体可表示为:

$$[0246] \quad D = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta X}^2 & \sigma_{\Delta X \Delta Y} & \sigma_{\Delta X \Delta Z} \\ \sigma_{\Delta Y \Delta X} & \sigma_{\Delta Y}^2 & \sigma_{\Delta Y \Delta Z} \\ \sigma_{\Delta Z \Delta X} & \sigma_{\Delta Z \Delta Y} & \sigma_{\Delta Z}^2 \end{bmatrix};$$

[0247] 式中, $\sigma_{\Delta X}^2$ 、 $\sigma_{\Delta Y}^2$ 、 $\sigma_{\Delta Z}^2$ 分别表示获得基线向量在三轴方向的方差,其余元素表示协方差。对方差协方差阵进行求逆后,即可得到观测值的权阵 P ,即:

[0248] $\mathbf{P} = \mathbf{D}^{-1};$

[0249] 利用协方差矩阵和权阵进行网平差,可以将所有测站的观测值进行有效的整合,提高测量精度和减小误差,同时还可以提高数据处理效率和自动化程度。

[0250] S324,北斗网最小二乘法平差。

[0251] 根据上面的误差方程、基准方程以及方差-协方差阵,按照最小二乘原理进行平差解算,即可获得平差后的结果:

[0252] $\delta \mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{L};$

[0253] 此时,平差后各个点的坐标 $\mathbf{X}$ 可表示为:

[0254] $\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}} + \delta \mathbf{X};$

[0255] 平差后的单位权中误差:

[0256] $\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V}}{3n - 3m + 3}};$

[0257] 上式中, n 为组成北斗网的基线数, m 为参与平差的总测站点数。

[0258] 至此,完成了通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算,探测和削弱北斗基线向量中的粗差结果,获得高精度高可靠性的四个北斗接收机天线独立基线向量结果。

[0259] S4,利用实时计算的基线向量,获得当前实时姿态结果;

[0260] S41,同一基线在载体坐标系中的位置矢量和在导航坐标系中的位置矢量之间的关系反应了载体坐标系和导航坐标系间的旋转变换的关系,通过旋转变换的关系,利用最小二乘法进行姿态解算,求出载体的姿态信息。

[0261] 航向角、俯仰角和横滚角分别用 ψ 、 θ 、 γ 来表示,表示绕Z轴、X轴和Y轴进行旋转的角度,旋转满足右手定则为正,反之为负。则三次旋转用姿态矩阵 $\mathbf{C}_n^b$ 的方式可表示为:

[0262]
$$\begin{aligned} \mathbf{C}_n^b &= \mathbf{R}_2(\gamma) \mathbf{R}_1(\theta) \mathbf{R}_3(-\psi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi + \sin \gamma \sin \theta \sin \psi & -\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \sin \theta \cos \psi & -\sin \gamma \cos \theta \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \\ \sin \gamma \cos \psi - \cos \gamma \sin \theta \sin \psi & -\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \sin \theta \cos \psi & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix}; \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{13} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \mathbf{C}_{23} \\ \mathbf{C}_{31} & \mathbf{C}_{32} & \mathbf{C}_{33} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

[0263] 则姿态角可表示为:

[0264] $\theta = \sin^{-1} \mathbf{C}_{23}, \gamma = -\tan^{-1} \frac{\mathbf{C}_{13}}{\mathbf{C}_{33}}, \psi = \tan^{-1} \frac{\mathbf{C}_{21}}{\mathbf{C}_{22}};$

[0265] S42,坐标系的建立。

[0266] 根据几何原理,三个不共线的点可以确定一个平面。设有四个北斗接收机天线 $\mathbf{A}_0$ 、 $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$ 、 $\mathbf{A}_3$,四个天线呈对称十字分布。 $\mathbf{A}_0$ 指向 $\mathbf{A}_1$ 记为向量 $\mathbf{l}_1$, $\mathbf{A}_0$ 指向 $\mathbf{A}_2$ 记为向量 $\mathbf{l}_2$,在

载体坐标系下,基线向量 $\mathbf{l}_{1,b}(x_1, y_1, z_1)$ 与载体坐标系的Y轴重合, $\mathbf{l}_{2,b}(x_2, y_2, z_2)$ 位于X轴与Y轴构成平面,Z轴垂直于XY构成的平面并指向天顶方向,XYZ三轴构成右手坐标系。

[0267] S43,基于直接法求解姿态角(航向角、俯仰角和横滚角)的近似值 $\psi_0, \theta_0, \gamma_0$;

[0268] 通过基线解算分别获得两条基线向量 $\mathbf{l}_1$ 和 $\mathbf{l}_2$ 在地心地固坐标系(ECEF)下的值 $\mathbf{l}_{1,e}(\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1)$ 、 $\mathbf{l}_{2,e}(\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2)$,以 A_0 为原点建立站心坐标系(ENU)(与当地导航坐标系重合),计算 $\mathbf{l}_1$ 、 $\mathbf{l}_2$ 在站心坐标系(ENU)下的坐标,记为 $\mathbf{l}_{1,n}(e_1, n_1, u_1)$ 、 $\mathbf{l}_{2,n}(e_2, n_2, u_2)$ 。

[0269] 将S3中通过基线长度先验约束和动态无约束网平差解算得到的ECEF坐标系下的基线向量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 转换到当地坐标系下,可利用如下公式:

$$[0270] \quad \begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix};$$

[0271] 式中, $[e, n, u]^T$ 为站心坐标系下的基线向量, B 为站心纬度, L 为站心经度。

[0272] 在获得站心坐标系(ENU)下的基线向量 $\mathbf{l}_{1,n}$ 和 $\mathbf{l}_{2,n}$,可利用 $\mathbf{l}_{1,n}$ 计算出航向角和俯仰角,其中航向角 ψ 和俯仰角 θ 分别表示为:

$$[0273] \quad \psi = \tan^{-1}\left(\frac{e_1}{n_1}\right); \theta = \tan^{-1}\left(\frac{u_1}{\sqrt{(e_1)^2 + (n_1)^2}}\right);$$

[0274] 对于基线向量 $\mathbf{l}_{2,n}$,载体坐标系和站心坐标系之间的关系可表示为:

[0275] $\mathbf{l}_{2,b} = \mathbf{C}_n^b \mathbf{l}_{2,n}$;利用上式中求出航向角 ψ 和俯仰角 θ 后,整理可得有:

$$[0276] \quad \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \cos \psi - n_2 \sin \psi \\ e_2 \cos \theta \sin \psi + n_2 \cos \theta \cos \psi + u_2 \sin \theta \\ -e_2 \sin \theta \sin \psi - n_2 \sin \theta \cos \psi + u_2 \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2'' \\ n_2'' \\ u_2'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma e_2'' - \sin \gamma u_2'' \\ n_2'' \\ \sin \gamma e_2'' + u_2'' \cos \gamma \end{bmatrix};$$

[0277] 式中, e_2'' 、 n_2'' 、 u_2'' 为简写,表示经过两次旋转后基线向量 $\mathbf{l}_{2,n}$ 。

[0278] 整理可得:

$$[0279] \quad \gamma = -\tan^{-1}\left(\frac{u_2''}{e_2''}\right);$$

[0280] 公式展开,可得到横滚角:

$$[0281] \quad \gamma = -\tan^{-1}\left(\frac{-e_2 \sin(\theta) \sin(\psi) - n_2 \sin(\theta) \cos(\psi) + u_2 \cos(\theta)}{e_2 \cos(\psi) - n_2 \sin(\psi)}\right);$$

[0282] 求解出的姿态角的近似值标记为 $\psi_0, \theta_0, \gamma_0$ 。

[0283] S44,基于多天线的最小二乘法求解姿态角(航向角、俯仰角和横滚角)

[0284] 对于任意一条基线向量在载体坐标系和导航坐标系下的关系可表示为:

[0285] $l_n = C_b^n l_b;$

[0286] 载体坐标系下的基线向量在安装时已知,导航坐标系下的基线向量通过求解基线向量获得,求解姿态即为求解转换矩阵 C_b^n 中包含的三个未知数 ψ 、 θ 、 γ 。

[0287] 设置 A_0 天线为主天线,为载体坐标系的原点,主天线到其他天线在载体坐标系下的基线向量为 $l_{i,b}$,即: $l_{i,n} = C_b^n l_{i,b} \ (i = 1,2,3)$ 。

[0288] 将 ψ_0 、 θ_0 、 γ_0 并带入 $l_{i,n} = C_b^n l_{i,b} \ (i = 1,2,3)$ 整理,则误差方程可表示为:

[0289] $v = l_{i,n} - C_b^n (\psi_0, \theta_0, \gamma_0) l_{i,b};$

[0290] 对上式进行线性化,进一步简化得到:

[0291] $v_{s_{li,n}} + B_i v_{s_{li,b}} = A_i \delta - s_i;$

[0292] $Q_i = \begin{bmatrix} Q_{s_{li,n}} & 0 \\ 0 & Q_{s_{li,b}} \end{bmatrix};$

[0293] 式中, Q_i 为观测值 $(l_{i,n}, l_{i,b})$ 的协方差矩阵,其余各符号分别表示为:

[0294] $A_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_b^n}{\partial \gamma} s_{li,b} & \frac{\partial C_b^n}{\partial \theta} s_{li,b} & \frac{\partial C_b^n}{\partial \psi} s_{li,b} \end{bmatrix};$

[0295] $\delta = \begin{bmatrix} \delta \gamma \\ \delta \theta \\ \delta \psi \end{bmatrix};$

[0296] $B_i = C_b^n (\gamma_0, \theta_0, \psi_0);$

[0297] $s_i = l_{i,n} - C_b^n (\gamma_0, \theta_0, \psi_0) l_{i,b};$

[0298] $\delta = \left[\sum_{i=2}^t A_i^T (Q_{s_{li,n}} + B_i Q_{s_{li,b}} B_i^T)^{-1} A_i \right]^{-1} \cdot \left[\sum_{i=2}^t A_i^T (Q_{s_{li,n}} + B_i Q_{s_{li,b}} B_i^T)^{-1} l_i \right];$

[0299] 则姿态角的估值为:

[0300] $\begin{bmatrix} \hat{\gamma} \\ \hat{\theta} \\ \hat{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_0 \\ \delta \theta \\ \psi_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \gamma \\ \delta \theta \\ \delta \psi \end{bmatrix};$

[0301] 协方差矩阵为:

[0302] $Q = \left[\sum_{i=2}^t A_i^T (Q_{l_{i,n}} + B_i Q_{l_{i,b}} B_i^T)^{-1} A_i \right]^{-1};$

[0303] 通过最小二乘法的多次迭代,直至改正值 δ 的大小小于阈值,即可完成迭代。求解出姿态角(航向角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚角 γ)。

[0304] S45,桅杆倾斜角度 α 的确定。

[0305] 浮标姿态(航向角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚角 γ) 发生变化时,浮标桅杆的垂直高度也会

发生变化。航向角 ψ 与物体的水平位置或方位有关,但它并不会直接影响垂直方向的高。俯仰角 θ 和横滚角 γ 会影响桅杆的高度。将这两种角度通过向量投影得到桅杆倾斜角度 α 。

[0306] S5,基于浮标物理参数进行浮标姿态校正后,获得精密的浮标大地高程观测结果,减弱复杂海况对浮标测高结果的影响,提高海洋浮标在恶劣海况下的适用性。

[0307] S51,基于岸上北斗参考站数据,与海上浮标多天线构成基线动态解算,获得浮标北斗主天线相位中心的瞬时大地高程 H_g ;

[0308] S52,多天线北斗浮标姿态解算,估计得到浮标体的桅杆倾斜角度 α 。

[0309] 上述步骤S45,已知浮标载体上的横滚角 γ 和俯仰角 θ ,假设有横滚角、俯仰角和航向角方向上的单位矢量,则横滚角和俯仰角方向上的单位矢量分别在载体坐标系中的坐标向量为

[0310] $\mathbf{a} = (\cos \gamma, 0, \sin \gamma);$

[0311] $\mathbf{b} = (0, \cos \theta, \sin \theta);$

[0312] 其中,载体坐标系如图5所示。

[0313] 为了估计浮标载体倾斜角度,需要确定横滚角和俯仰角单位向量所在平面的法线与铅垂线的夹角。则方向向量 $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ 与法向量 $\mathbf{n}$ 的关系满足:

[0314]
$$\begin{cases} \mathbf{a} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} = 0 \end{cases};$$

[0315] 定义铅垂线方向的向量为 $\mathbf{c} = (0, 0, 1)$,则此处添加条件,令 $\mathbf{n}$ 的Z轴方向为正,且值为1。因此,获得法向量 $\mathbf{n} = (-\tan \gamma, -\tan \theta, 1)$ 。

[0316] 则法向量 $\mathbf{n}$ 与 $\mathbf{c}$ 的夹角就是浮标载体倾斜角度 α ,即

[0317]
$$\cos \alpha = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{c}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{c}|} = \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \gamma + \tan^2 \theta + 1}};$$

[0318] S53,据以上测量结果,进行多天线的浮标海面高度 H_s 的标定。海面高度标定公式表达为:

[0319] $H_s = H_g - (H_d \cos \alpha);$

[0320] 式中, H_d 为北斗接收机天线相位中心到水面的高度。

[0321] 以上所述,仅为本发明较优的具体的实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,都应涵盖在本发明的保护范围之内。

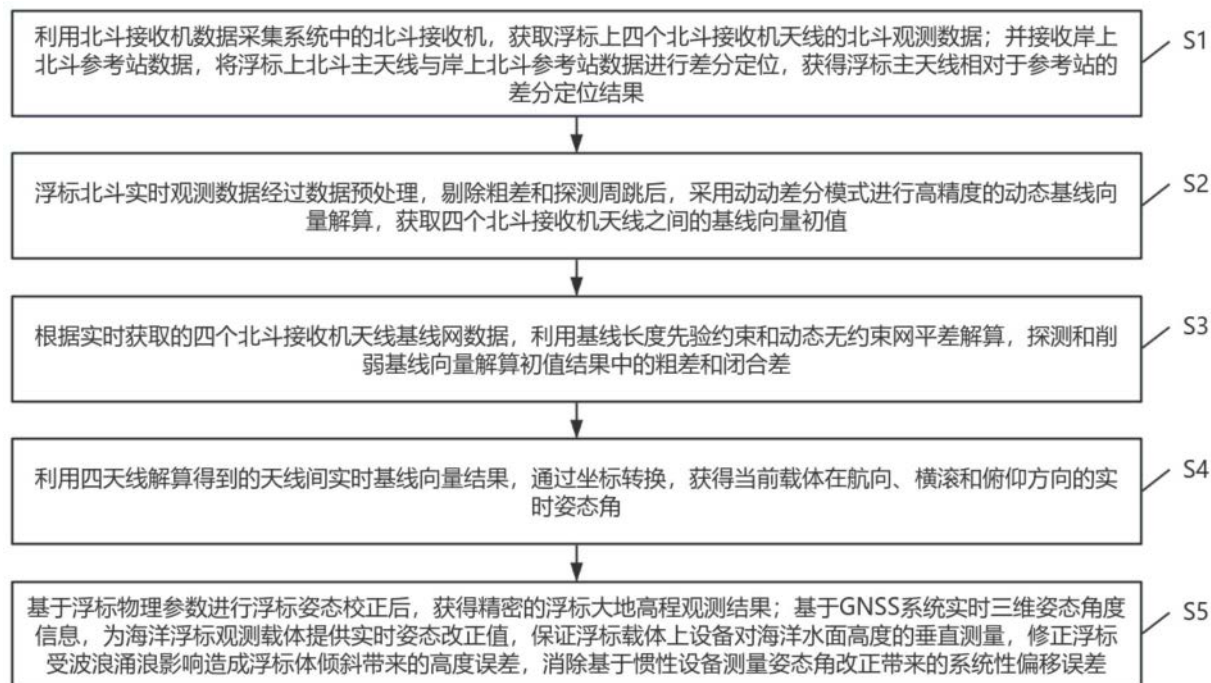


图1

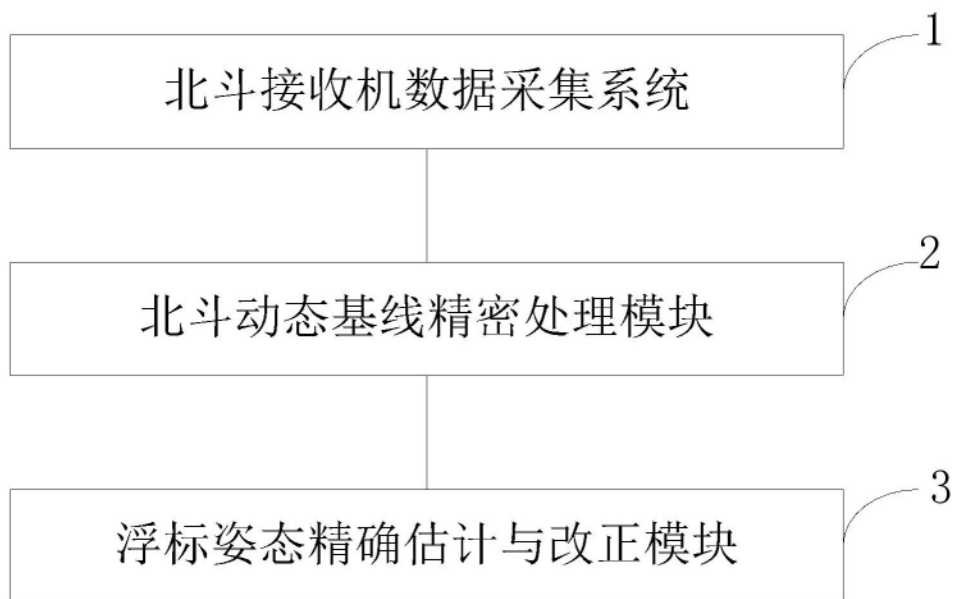


图2

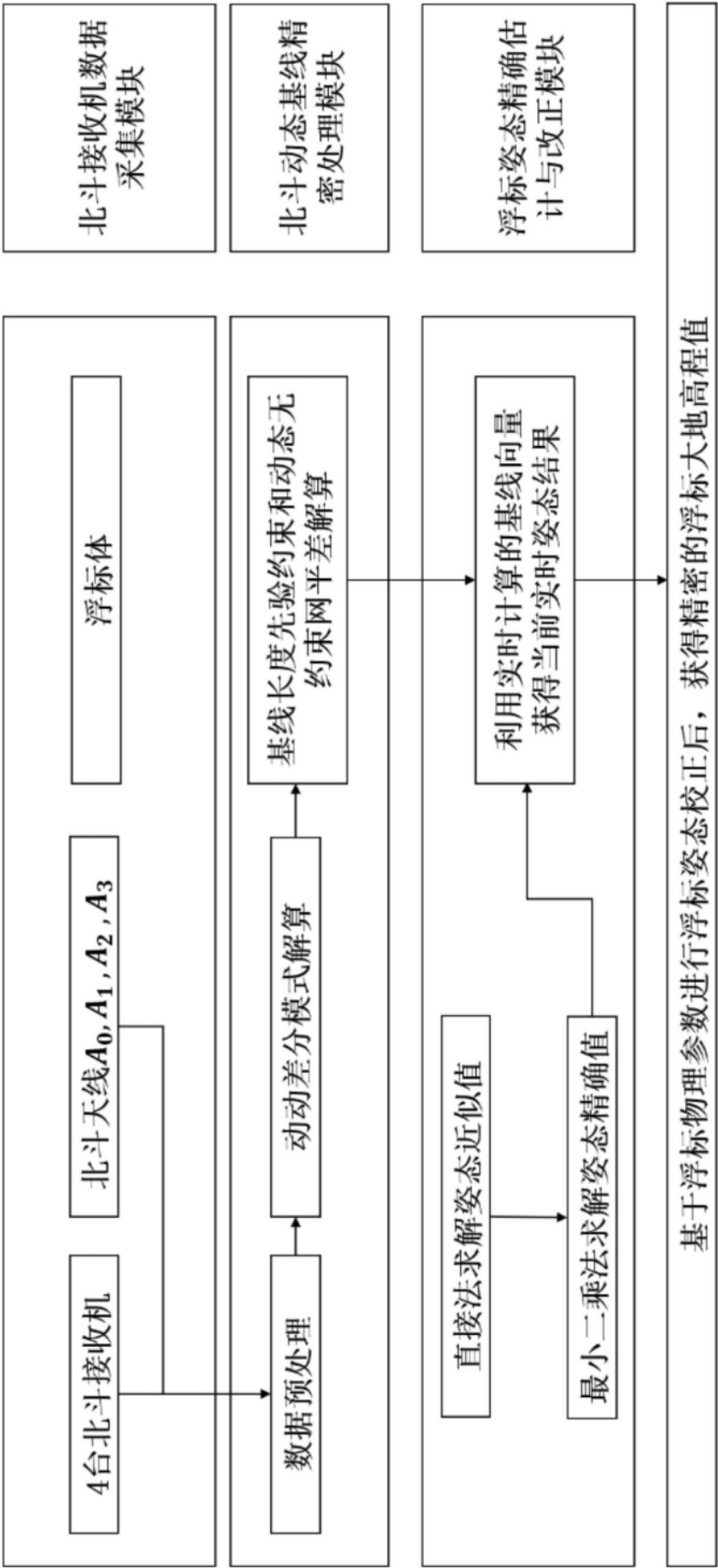


图3

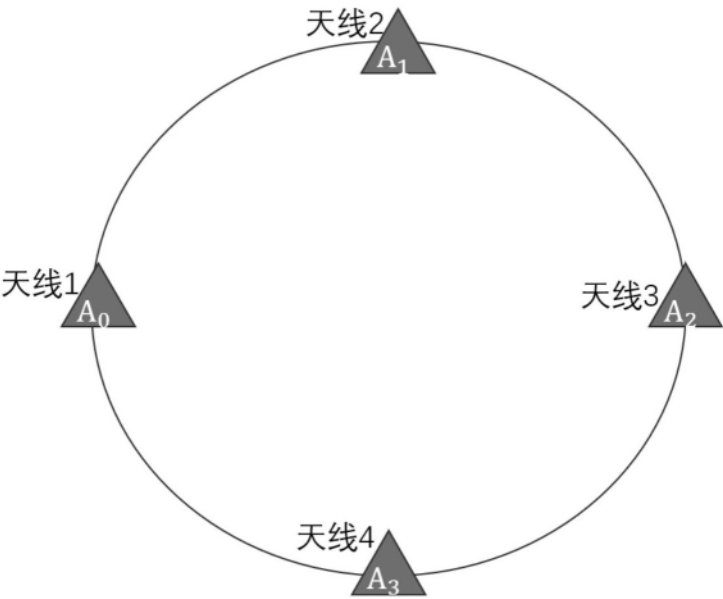


图4

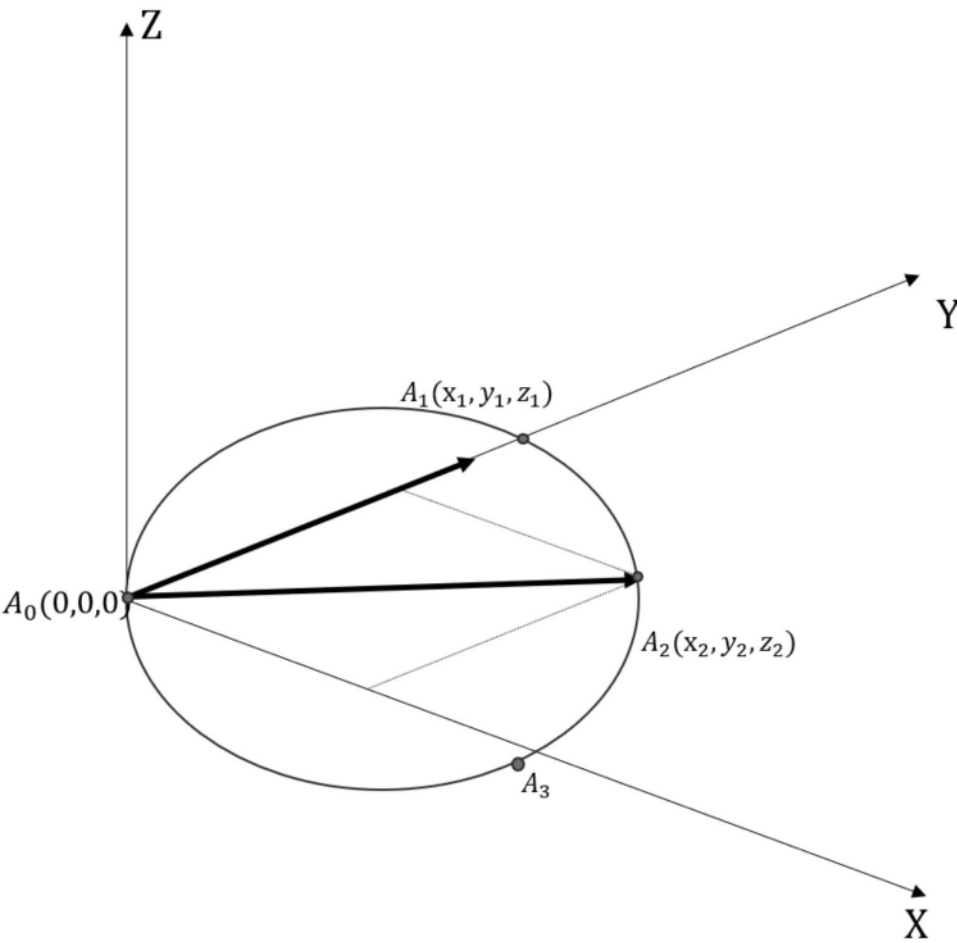


图5