



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116794695 B

(45) 授权公告日 2023. 10. 24

(21) 申请号 202311055307.7

G01S 19/37 (2010.01)

(22) 申请日 2023.08.22

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 116794695 A

CN 115792980 A, 2023.03.14

CN 113589337 A, 2021.11.02

CN 115902982 A, 2023.04.04

(43) 申请公布日 2023.09.22

CN 113945954 A, 2022.01.18

(73) 专利权人 中国科学院空天信息创新研究院
地址 100190 北京市海淀区北四环西路19号

CN 111965685 A, 2020.11.20

EP 3859397 A1, 2021.08.04

(72) 发明人 罗瑞丹 纪明 陈潇 袁洪 杨光
徐佳佳

周舒涵 等. 低轨通信卫星多普勒定位性能分析.《天文学报》.2023,第64卷(第2期),第22-1~22-11页.

审查员 毕重连

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责
任公司 11251

专利代理师 金怡

(51) Int. Cl.

G01S 19/42 (2010.01)

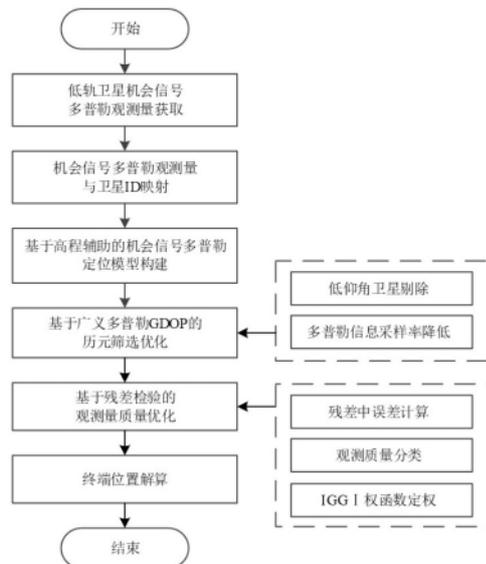
权利要求书5页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法

(57) 摘要

本发明公开了一种双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法。该方法包括：S1通过信号时频分析处理方法，获取低轨卫星机会信号多普勒观测量，结合采样时间戳，获得时间维度上的低轨卫星机会信号多普勒观测曲线；S2获得所述低轨卫星机会信号多普勒观测量对应的卫星ID，将机会信号多普勒观测量与卫星ID进行映射；S3构建基于高程辅助的机会信号多普勒定位观测模型；S4进行基于广义多普勒GDOP的历元筛选优化；S5进行基于残差检验的观测质量优化；S6基于上述双重优化进行终端位置结算。本发明实现了对观测历元和观测质量的双重优化，显著提升高程收敛模型下机会源定位精度，同时能够有效降低定位解算运算量。



1. 一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法,其特征在于,包括如下步骤:

S1通过信号时频分析处理方法,获取低轨卫星机会信号多普勒观测量,结合采样时间戳,获得时间维度上的低轨卫星机会信号多普勒观测曲线;

S2 获得所述低轨卫星机会信号多普勒观测量对应的卫星ID,将机会信号多普勒观测量与卫星ID进行映射;

S3 构建基于高程辅助的机会信号多普勒定位观测模型;

S4 进行基于广义多普勒GDOP的历元筛选优化;

S5 进行基于残差检验的观测量质量优化;

S6 基于所述历元筛选优化和观测量质量优化进行终端位置结算。

2. 根据权利要求1所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法,其特征在于,所述步骤S2具体包括:

获得所述低轨卫星多普勒观测量对应的卫星ID,长时观测多普勒,将观测多普勒曲线与预测多普勒曲线匹配进行映射。

3. 根据权利要求2所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法,其特征在于,所述步骤S2还包括:

将低轨卫星机会信号多普勒观测曲线与预测曲线进行比对,累计误差和小于20Hz即认为匹配成功,证明所获取的低轨卫星机会信号多普勒观测量为该卫星ID对应的观测量;未匹配成功则继续遍历其余可见卫星的预测多普勒曲线,直至索引出足够的可用卫星。

4. 根据权利要求1所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法,其特征在于,所述步骤S3具体包括:

多普勒定位观测模型表示为:

$$f_r^s(t) \cdot (-\lambda) = \dot{\rho}_r^s(t) = \mathbf{v}^s \cdot \frac{\mathbf{r}^s(t) - \mathbf{r}_r(t)}{\|\mathbf{r}^s(t) - \mathbf{r}_r(t)\|} + c \cdot \dot{dT}(t) + \varepsilon_r^s(t) \quad (1)$$

其中,s为卫星编号,r为接收机编号, f_r^s 为多普勒频移, t 为接收时刻, λ 为信号波长,

$\dot{\rho}$ 为伪距变化率, $\mathbf{v}^s = \begin{bmatrix} v_x^s & v_y^s & v_z^s \end{bmatrix}$ 为卫星的速度向量, $\mathbf{r}^s = \begin{bmatrix} x^s & y^s & z^s \end{bmatrix}^T$,

$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} x_r & y_r & z_r \end{bmatrix}^T$ 分别为卫星位置向量,接收机位置向量,c为光速, \dot{dT} 为卫星与接收机的组合钟漂, ε_r^s 为观测噪声。

5. 根据权利要求4所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法,其特征在于,所述步骤S3还包括:

若一段静态观测时间内,共计观测到N颗卫星 (S_1, S_2, \dots, S_N) ,待求参数初始解算值为 \mathbf{X}^0 ,待求参数真值为 $\hat{\mathbf{X}}$,则待求参数初始解算值 \mathbf{X}^0 和待求参数真值 $\hat{\mathbf{X}}$ 的关系表示为:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \Delta\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_r^0 \\ y_r^0 \\ z_r^0 \\ d\dot{T}_{S_1}^0 \\ \vdots \\ d\dot{T}_{S_N}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta d\dot{T}_{S_1} \\ \vdots \\ \Delta d\dot{T}_{S_N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\Delta\mathbf{X}$ 为待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量, 待求参数分别为接收机三维位置与N个卫星与接收机的钟漂组合误差; 其中 $\begin{bmatrix} x_r^0 & y_r^0 & z_r^0 \end{bmatrix}$ 为接收机位置参数初始解算值, $\begin{bmatrix} \Delta x_r & \Delta y_r & \Delta z_r \end{bmatrix}$ 为接收机位置参数改正值, $d\dot{T}_{S_N}^0$ 为第N颗卫星与接收机的组合钟漂的初始解算值, $\Delta d\dot{T}_{S_N}$ 为第N颗卫星与接收机组合钟漂的改正值;

将伪距变化率 $\dot{\rho}$ 在初始化参数处线性展开, 表示为:

$$\dot{\rho} \approx \dot{\rho}^0 + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial x_r} \cdot \Delta x_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial y_r} \cdot \Delta y_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial z_r} \cdot \Delta z_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial d\dot{T}} \cdot \Delta d\dot{T} \quad (3)$$

其中, $\dot{\rho}^0$ 为根据初始化参数计算得出的伪距变化率估计值, $\Delta d\dot{T}$ 为卫星与接收机组合钟漂的改正值。

6. 根据权利要求5所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于, 所述步骤S3还包括:

观测时间内共计有M个观测量, 将所有观测量基于最小二乘算法组成误差方程组, 表示为:

$$\mathbf{L}_{M \times 1} - \mathbf{L}_{M \times 1}^0 = \mathbf{G}_{M \times (3+N)} \cdot \Delta\mathbf{X}_{(3+N) \times 1} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{L}_{M \times 1}$ 为伪距率观测向量, $\mathbf{L}_{M \times 1}^0$ 为利用初始化参数计算得到的伪距率估计值向量, $\mathbf{G}_{M \times (3+N)}$ 为误差方程组的雅阁比矩阵; $\Delta\mathbf{X}_{(3+N) \times 1}$ 为待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量;

利用高程信息辅助基于批量最小二乘的多普勒定位, 将地心看做虚拟卫星, 则接收机到地心的虚拟伪距观测方程如下:

$$\tilde{\rho}_h(t) = \left\| \mathbf{r}^e(t) - \tilde{\mathbf{r}}_r(t) \right\| + \xi_r^e(t) \quad (5)$$

其中, $\tilde{\rho}_h$ 为接收机到地心的虚拟伪距, $\mathbf{r}^e = [0 \ 0 \ 0]^T$ 为地心坐标, $\tilde{\mathbf{r}}_r = [\tilde{x}_r \ \tilde{y}_r \ \tilde{z}_r]^T$ 为经过高程信息修正后的接收机估计位置, ξ_r^e 为虚拟观测值的测

量误差。

7. 根据权利要求6所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于, 所述步骤S3进一步包括:

将式(5)和式(4)联合得到的误差方程组表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ \tilde{\rho}_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{L}^0 \\ \tilde{\rho}_h^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{G}_h \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{X} \quad (6)$$

其中, $\tilde{\rho}_h^0$ 为虚拟伪距的估计值, \mathbf{G}_h 为虚拟观测方程的雅阁比矩阵, 带入线性化公式后构建基于高程辅助的机会信号多普勒定位观测模型, 如式(7), 虚线上部分为多普勒观测矩阵, 下部分为高程辅助矩阵, $\dot{\rho}^{S_N}(t_k)$ 为k时刻 S_N 卫星的伪距率, $\dot{\rho}^{0, S_N}(t_k)$ 为对应的伪距率估计值:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho}^{S_1}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_1}(t_k) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_N}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_N}(t_k) \\ \tilde{\rho}_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\rho}^{0, S_1}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0, S_1}(t_k) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0, S_N}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0, S_N}(t_k) \\ \tilde{\rho}_h^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial z_r} & c & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial z_r} & c & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial z_r} & 0 & \dots & c \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial z_r} & 0 & \dots & c \\ \hline -\frac{\tilde{x}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & -\frac{\tilde{y}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & -\frac{\tilde{z}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta d\dot{T}_{S_1} \\ \vdots \\ \Delta d\dot{T}_{S_N} \end{bmatrix}^T \quad (7)。$$

8. 根据权利要求1所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于, 所述步骤S4具体包括:

将观测矩阵中的位置参数除以归一化因子 γ , 得到广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$;

归一化因子 γ 的计算公式如下:

$$\gamma = \left[\frac{1}{1 - (R_E / a_{orb})} \right] \sqrt{\frac{\mu}{a_{orb}^3}} \quad (8)$$

其中, R_E 为地球半径, a_{orb} 为卫星轨道长半轴, μ 为地球引力常量;

利用 γ 将传统多普勒GDOP归一化处理得到广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$, 如下所示:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial z_r} / \gamma & 1 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial z_r} / \gamma & 1 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial z_r} / \gamma & 0 & \dots & 1 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial z_r} / \gamma & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)。$$

9. 根据权利要求8所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于, 所述步骤S4还包括:

利用广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$ 得到广义多普勒GDOP, 广义多普勒GDOP可作为表征卫星观测条件好坏的指标, 其计算公式为式(10), Trace为求迹运算:

$$GDOP_{doppler} = \sqrt{\text{Trace}[(\mathbf{G}_{doppler}^T \cdot \mathbf{G}_{doppler})^{-1}]} \quad (10)$$

根据多普勒定位观测模型, 通过适当降低多普勒信息采样率, 但依然保证卫星分布的多样性与运动方向的多样性, 从而获得较低的 $GDOP_{doppler}$, 且减少了冗余观测, 观测量更为精简。

10. 根据权利要求9所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于, 所述步骤S4还包括低仰角卫星剔除, 具体包括:

剔除天空轨迹较短, 高度角在 20° 以下的侧滑星, 将 $GDOP_{doppler}$ 维持在原有数值的150%以内。

11. 根据权利要求6所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于, 所述步骤S5包括残差的中误差计算, 具体包括:

将批量最小二乘解算得到的待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量 $\Delta \mathbf{X}$ 带入公式(4)得到残差计算公式:

$$\mathbf{e} = \mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{X} - (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0) = (\mathbf{G} \cdot (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{P} - \mathbf{I}) \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{e} = [e^{S_1}(t_1) \ \dots \ e^{S_1}(t_k) \ \dots \ e^{S_N}(t_1) \ \dots \ e^{S_N}(t_k)]^T$ 为残差向量, $e^{S_N}(t_k)$ 为 t_k 时刻 S_N 卫星的观测值残差, $\mathbf{P} = \text{diag}[P^{S_1}(t_1) \ \dots \ P^{S_1}(t_k) \ \dots \ P^{S_N}(t_1) \ \dots \ P^{S_N}(t_k)]$ 为权阵, $P^{S_N}(t_k)$ 为 t_k 时刻 S_N 卫星的观测值对应的权值, diag 为取对角矩阵符号;

残差的中误差 σ_e 为:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum e^{S_N}(t_k) \times e^{S_N}(t_k)}{M}} \quad (12),$$

其中, M 为观测值总量。

12. 根据权利要求11所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于, S_5 还包括观测质量分类, 具体包括:

基于IGGI权函数公式, 根据残差大小将对应观测量分为正常段、可疑段与淘汰段, 残差小于 k_0 倍 σ_e 的为正常段, 大于 k_1 倍 σ_e 的为淘汰段, 二者之间的为可疑段, 观测量分类后的定权公式如下:

$$P^{S_N}(t_k) = \begin{cases} 1 & , |e^{S_N}(t_k)| \leq k_0 \sigma_e \\ \frac{\sigma_e}{|e^{S_N}(t_k)|} & , k_0 \sigma_e < |e^{S_N}(t_k)| < k_1 \sigma_e \\ 0 & , |e^{S_N}(t_k)| \geq k_1 \sigma_e \end{cases} \quad (13)$$

其中, k_0 取值范围为1.0~1.5, k_1 取值范围为2.5~6.0。

13. 根据权利要求12所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于, S_5 还包括IGGI权函数定权, 具体包括,

根据加权最小二乘原理和经过优化后的观测矩阵式(9)与观测量解算定权策略, 得到待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量 ΔX :

$$\Delta X = (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot [\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{P} \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0)] \quad (14)$$

则待求参数 $\mathbf{X} = \mathbf{X}^0 + \Delta X$, 判断位置参数改正值是否小于阈值 $10e-5$, 如小于阈值 $10e-5$, 则输出定位解。

14. 根据权利要求13所述的一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法, 其特征在于,

判断位置参数改正值是否小于阈值 $10e-5$, 若不满足, 用公式(13)更新权阵 P 后返回公式(14)继续迭代计算, 直至定位解收敛。

基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法

技术领域

[0001] 本发明涉及机会信号导航领域,尤其涉及一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法。

背景技术

[0002] 现有PNT系统高度依赖GNSS,其PNT服务尽管具有全天候、全天时和全球覆盖的特点,但存在明显弱点,在复杂环境下信号易被遮蔽、干扰、欺骗等,需要寻找利用一切可利用的PNT信息源,从而提供连续、可用、可靠、稳健的PNT服务。

[0003] 随着低轨卫星建造运营技术的进步与成本降低,低轨星座建设迅速,形成了丰富的轨道资源与频点资源,不仅可以增强现有GNSS导航能力,也是具有全球独立定位服务能力的导航新平台。目前低轨星座以非导航合作信号居多,因此多采用机会信号的方式进行低轨卫星导航。

[0004] 由于非合作低轨卫星时空基准较差,不公开或缺少精密的轨道信息与时钟信息,只能依靠TLE星历进行简单的轨道模型外推,存在较大的时空基准误差,定位精度差,为了获得更高精度,往往需要配合基站差分观测以及惯导设备的辅助,或者长时间观测和多星座联合观测,又会使得定位过程复杂,带来信息的冗余与运算压力。因此,低轨卫星导航需要一种简单便捷的观测模式,通过筛选观测值与星历,用较少的观测量提高定位精度。

发明内容

[0005] 本发明为弥补低轨卫星机会信号定位时空基准粗略且难获取,依赖长时大量历元观测才能实现定位等缺陷,提出一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法,实现了对观测矩阵和观测量质量的双重优化,显著提升高程收敛模型下机会源定位精度,同时能够有效降低定位解算运算量。

[0006] 本发明公开一种基于双重优化的高程辅助低轨卫星机会信号定位方法,包括如下步骤:

[0007] S1通过信号时频分析处理方法,获取低轨卫星机会信号多普勒观测量,结合采样时间戳,获得时间维度上的低轨卫星机会信号多普勒观测曲线;

[0008] S2 获得所述低轨卫星机会信号多普勒观测量对应的卫星ID,将机会信号多普勒观测量与卫星ID进行映射;

[0009] S3 构建基于高程辅助的机会信号多普勒定位观测模型;

[0010] S4 进行基于广义多普勒GDOP的历元筛选优化;

[0011] S5 进行基于残差检验的观测量质量优化;

[0012] S6 基于所述历元筛选优化和观测量质量优化进行终端位置结算。

[0013] 进一步地,所述步骤S2具体包括:

[0014] 获得所述低轨卫星多普勒观测量对应的卫星ID,长时观测多普勒,将观测多普勒曲线与预测多普勒曲线匹配进行映射。

[0015] 进一步地,所述步骤S2还包括:

[0016] 将低轨机会信号多普勒观测曲线与预测曲线进行比对,累计误差和小于20Hz即认为匹配成功,证明所获取的低轨卫星机会信号多普勒观测值为该卫星ID对应的观测量;未匹配成功则继续遍历其余可见卫星的预测多普勒曲线,直至索引出足够的可用卫星。

[0017] 进一步地,所述步骤S3具体包括:

[0018] 多普勒定位观测模型表示为:

$$[0019] \quad f_r^s(t) \cdot (-\lambda) = \dot{\rho}_r^s(t) = \mathbf{v}^s \cdot \frac{\mathbf{r}^s(t) - \mathbf{r}_r(t)}{\|\mathbf{r}^s(t) - \mathbf{r}_r(t)\|} + c \cdot \dot{dT}(t) + \varepsilon_r^s(t) \quad (1)$$

[0020] 其中,s为卫星编号,r为接收机编号, f_r^s 为多普勒频移,t为接收时刻, λ 为信号波长, $\dot{\rho}$ 为伪距变化率, $\mathbf{v}^s = \begin{bmatrix} v_x^s & v_y^s & v_z^s \end{bmatrix}$ 为卫星的速度向量,

$\mathbf{r}^s = \begin{bmatrix} x^s & y^s & z^s \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} x_r & y_r & z_r \end{bmatrix}^T$ 分别为卫星位置向量,接收机位置向量,c为光速, \dot{dT} 为卫星与接收机的组合钟漂, ε_r^s 为观测噪声。

[0021] 进一步地,所述步骤S3还包括:

[0022] 若一段静态观测时间内,共计观测到N颗卫星(S_1, S_2, \dots, S_N),待求参数初始解算值为 \mathbf{X}^0 ,待求参数真值为 $\hat{\mathbf{X}}$,则待求参数初始解算值 \mathbf{X}^0 和待求参数真值 $\hat{\mathbf{X}}$ 的关系表示为:

$$[0023] \quad \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \Delta\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_r^0 \\ y_r^0 \\ z_r^0 \\ d\dot{T}_{S_1}^0 \\ \vdots \\ d\dot{T}_{S_N}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta d\dot{T}_{S_1} \\ \vdots \\ \Delta d\dot{T}_{S_N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0024] 其中, $\Delta\mathbf{X}$ 为待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量,待求参数分别为接收机三维位置与N个卫星与接收机的钟漂组合误差;其中 $\begin{bmatrix} x_r^0 & y_r^0 & z_r^0 \end{bmatrix}$ 为接收机位置参数初始解算值, $\begin{bmatrix} \Delta x_r & \Delta y_r & \Delta z_r \end{bmatrix}$ 为接收机位置参数改正值, $d\dot{T}_{S_N}^0$ 为第N颗卫星与接收机的组合钟漂的初始解算值, $\Delta d\dot{T}_{S_N}$ 为第N颗卫星与接收机组合钟漂的改正值;

[0025] 将伪距变化率 $\dot{\rho}$ 在初始化参数处线性展开,表示为:

$$[0026] \quad \dot{\rho} \approx \dot{\rho}^0 + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial x_r} \cdot \Delta x_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial y_r} \cdot \Delta y_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial z_r} \cdot \Delta z_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial dT} \cdot \Delta dT \quad (3)$$

[0027] 其中, $\dot{\rho}^0$ 为根据初始化参数计算得出的伪距变化率估计值, ΔdT 为卫星与接收机组合钟漂的改正值。

[0028] 进一步地, 所述步骤S3还包括:

[0029] 观测时间内共计有M个观测量, 将所有观测量基于最小二乘算法组成误差方程组, 表示为:

$$[0030] \quad \mathbf{L}_{M \times 1} - \mathbf{L}_{M \times 1}^0 = \mathbf{G}_{M \times (3+N)} \cdot \Delta \mathbf{X}_{(3+N) \times 1} \quad (4)$$

[0031] 其中, $\mathbf{L}_{M \times 1}$ 为伪距率观测向量, $\mathbf{L}_{M \times 1}^0$ 为利用初始化参数计算得到的伪距率估计值向量, $\mathbf{G}_{M \times (3+N)}$ 为误差方程组的雅阁比矩阵; $\Delta \mathbf{X}_{(3+N) \times 1}$ 为待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量。

[0032] 利用高程信息辅助基于批量最小二乘的多普勒定位, 将地心看做虚拟卫星, 则接收机到地心的虚拟伪距观测方程如下:

$$[0033] \quad \tilde{\rho}_h(t) = \left\| \mathbf{r}^e(t) - \tilde{\mathbf{r}}_r(t) \right\| + \xi_r^e(t) \quad (5)$$

[0034] 其中, $\tilde{\rho}_h$ 为接收机到地心的虚拟伪距, $\mathbf{r}^e = [0 \ 0 \ 0]^T$ 为地心坐标,

$\tilde{\mathbf{r}}_r = [\tilde{x}_r \ \tilde{y}_r \ \tilde{z}_r]^T$ 为经过高程信息修正后的接收机估计位置, ξ_r^e 为虚拟观测值的测量误差。

[0035] 进一步地, 所述步骤S3进一步包括:

[0036] 将式(5)和式(4)联合得到的误差方程组表示为:

$$[0037] \quad \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ \tilde{\rho}_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{L}^0 \\ \tilde{\rho}_h^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{G}_h \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{X} \quad (6)$$

[0038] 其中, $\tilde{\rho}_h^0$ 为虚拟伪距的估计值, \mathbf{G}_h 为虚拟观测方程的雅阁比矩阵, 带入线性化公式后构建基于高程辅助的机会信号多普勒定位观测模型, 如式(7), 虚线上部分为多普勒观测矩阵, 下部分为高程辅助矩阵, $\dot{\rho}^{S_N}(t_k)$ 为k时刻 S_N 卫星的伪距率, $\dot{\rho}^{0, S_N}(t_k)$ 为对应的伪距率估计值:

$$[0039] \quad \begin{bmatrix} \dot{\rho}^{S_1}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_1}(t_k) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_N}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_N}(t_k) \\ \tilde{\rho}_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\rho}^{0,S_1}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0,S_1}(t_k) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0,S_N}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0,S_N}(t_k) \\ \tilde{\rho}_h^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial z_r} & c & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial z_r} & c & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial z_r} & 0 & \dots & c \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial z_r} & 0 & \dots & c \\ \hline -\frac{\tilde{x}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & -\frac{\tilde{y}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & -\frac{\tilde{z}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta d\dot{T}_{S_1} \\ \vdots \\ \Delta d\dot{T}_{S_N} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

[0040] 进一步地,所述步骤S4具体包括:

[0041] 将观测矩阵中的位置参数除以归一化因子 γ ,得到广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$;

[0042] 归一化因子 γ 的计算公式如下:

$$[0043] \quad \gamma = \left[\frac{1}{1 - (R_E / a_{orb})} \right] \sqrt{\frac{\mu}{a_{orb}^3}} \quad (8)$$

[0044] 其中, R_E 为地球半径, a_{orb} 为卫星轨道长半轴, μ 为地球引力常量;

[0045] 利用 γ 将传统多普勒GDOP归一化处理得到广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$,如下所示:

$$[0046] \quad \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial z_r} / \gamma & 1 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial z_r} / \gamma & 1 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial z_r} / \gamma & 0 & \dots & 1 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial z_r} / \gamma & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0047] 进一步地,所述步骤S4还包括:

[0048] 利用广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$ 得到广义多普勒GDOP,广义多普勒GDOP可作为表征卫星观测条件好坏的指标,其计算公式为式(10),Trace为求迹运算:

$$[0049] \quad GDOP_{doppler} = \sqrt{\text{Trace}[(\mathbf{G}_{doppler}^T \cdot \mathbf{G}_{doppler})^{-1}]} \quad (10)$$

[0050] 根据多普勒定位观测模型,通过适当降低多普勒信息采样率,但依然保证卫星分布的多样性与运动方向的多样性,从而获得较低的 $GDOP_{doppler}$,且减少了冗余观测,观测量更为精简。

[0051] 进一步地,所述步骤S4还包括低仰角卫星剔除,具体包括:

[0052] 剔除天空轨迹较短,高度角在 20° 以下的侧滑星,将 $GDOP_{doppler}$ 维持在原有数值的150%以内。

[0053] 进一步地,所述步骤S5包括残差的中误差计算,具体包括:

[0054] 将批量最小二乘解算得到的待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量 $\Delta\mathbf{X}$ 带入公式(4)得到残差计算公式:

$$[0055] \quad \mathbf{e} = \mathbf{G} \cdot \Delta\mathbf{X} - (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0) = (\mathbf{G} \cdot (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{P} - \mathbf{I}) \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0) \quad (11)$$

[0056] 其中, $\mathbf{e} = [e^{S_1}(t_1) \cdots e^{S_1}(t_k) \cdots e^{S_N}(t_1) \cdots e^{S_N}(t_k)]^T$ 为残差向量, $e^{S_N}(t_k)$ 为 t_k 时刻 S_N 卫星的观测值残差, $\mathbf{P} = \text{diag}[P^{S_1}(t_1) \cdots P^{S_1}(t_k) \cdots P^{S_N}(t_1) \cdots P^{S_N}(t_k)]$ 为权阵, $P^{S_N}(t_k)$ 为 t_k 时刻 S_N 卫星的观测值对应的权值, diag 为取对角矩阵符号;

[0057] 残差的中误差 σ_e 为:

$$[0058] \quad \sigma_e = \sqrt{\frac{\sum e^{S_N}(t_k) \times e^{S_N}(t_k)}{M}} \quad (12)$$

[0059] 其中, M 为观测值总量。

[0060] 进一步地, S5还包括观测质量分类,具体包括:

[0061] 基于IGGI权函数公式,根据残差大小将对应观测量分为正常段、可疑段与淘汰段,残差小于 k_0 倍 σ_e 的为正常段,大于 k_1 倍 σ_e 的为淘汰段,二者之间的为可疑段,观测量分类后的定权公式如下:

$$[0062] \quad P^{S_N}(t_k) = \begin{cases} 1 & , |e^{S_N}(t_k)| \leq k_0 \sigma_e \\ \frac{\sigma_e}{|e^{S_N}(t_k)|} & , k_0 \sigma_e < |e^{S_N}(t_k)| < k_1 \sigma_e \\ 0 & , |e^{S_N}(t_k)| \geq k_1 \sigma_e \end{cases} \quad (13)$$

[0063] 其中, k_0 取值范围为1.0~1.5, k_1 取值范围为2.5~6.0。

[0064] 进一步地, S5还包括IGGI权函数定权,具体包括,

[0065] 根据加权最小二乘原理和经过优化后的观测矩阵式(9)与观测量解算定权策略,得到待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量 $\Delta\mathbf{X}$:

$$[0066] \quad \Delta X = (G^T \cdot P \cdot G)^{-1} \cdot [G^T \cdot P \cdot (L - L^0)] \quad (14)$$

[0067] 则待求参数 $X = X^0 + \Delta X$, 判断位置参数改正值是否小于阈值 $10e-5$, 如小于阈值 $10e-5$, 则输出定位解。

[0068] 进一步地, 判断位置参数改正值是否小于阈值 $10e-5$, 若不满足, 用公式(13)更新权阵P后返回公式(14)继续迭代计算, 直至定位解收敛。

[0069] 本发明相对于现有技术的有益效果:

[0070] 根据本发明所利用的算法创新和特点, 对比传统低轨卫星机会信号导航具有以下技术优势:

[0071] A. 定位简单便捷且精度高

[0072] 为了弥补低轨卫星时空基准误差, 常采用惯性导航设备辅助定位, 或者利用双测站差分消除时空基准误差, 模型上使用更加复杂的轨道与时钟模型进行时空基准约束, 算法难度高。本发明仅采用单个机会信号采集平台即可完成定位, 模型采用简化模型, 通过残差检验筛选出观测误差较小的观测值并提高权重, 提高观测精度, 同时剔除星历误差较大的卫星观测值, 以此优化高程辅助效果, 达到良好的定位精度。

[0073] B. 运算压力小

[0074] 长时间观测增加了观测量的冗余度和运算负担, 本发明基于广义多普勒GDOP分析保留完整的卫星轨迹, 在保证卫星分布和运动方向多样性的前提下, 降低多普勒信息的采样率, 剔除对GDOP贡献小的侧滑卫星观测值, 有效缩减了观测量, 并仍然维持原有的定位精度。

附图说明

[0075] 图1示出基于双重优化的高程辅助低轨机会信号定位方法流程图;

[0076] 图2示出低轨卫星机会信号采集处理终端框架图。

具体实施方式

[0077] 本发明为弥补低轨卫星机会信号定位时空基准粗略且难获取, 依赖长时大量历元观测才能实现定位等缺陷, 提出一种基于双重优化的高程辅助低轨机会信号定位方法, 实现对观测矩阵和观测量质量的双重优化, 显著提升高程收敛模型下机会源定位精度, 同时能够有效降低定位解算运算量。

[0078] 该方法首先利用广义多普勒GDOP分析对长时观测量进行精度预测, 通过剔除低仰角卫星与降低多普勒信息采样率等方法, 优化观测矩阵, 实现保证GDOP稳定的情况下, 缩减观测量, 减小运算压力。其次, 该方法利用残差检验对观测量质量进行分类定权, 降低粗略观测值权重, 优化观测量解算定权策略, 提升高程辅助效果, 进而提高定位精度。

[0079] 本发明方法流程图如图1所示, 其技术方案如下所述:

[0080] 1). 低轨卫星机会信号多普勒观测量获取

[0081] 本发明使用天线、高精度时钟、USRP软件无线电采集平台与数据处理终端搭建起低轨卫星机会信号采集平台, 硬件结构如图2所示。通过信号时频分析处理方法, 获取低轨卫星机会信号多普勒观测量, 结合采样时间戳, 获得时间维度上的低轨机会信号多普勒观

测曲线。

[0082] 2). 机会信号多普勒观测量与卫星ID映射

[0083] 机会源的随机性与不确定性导致机会信号定位终端无法充分解析机会信号信息, 获得所测量低轨卫星机会信号多普勒观测量对应的卫星ID, 需要长时观测多普勒, 将低轨卫星机会信号多普勒观测曲线与预测曲线匹配完成映射。

[0084] 根据观测时间和终端概略观测位置筛选出可见的机会源卫星, 基于低轨卫星公开TLE星历与SGP4轨道模型, 完成观测时段内卫星的速度、位置状态估计, 刻画预测多普勒曲线。将观测曲线与预测曲线进行比对, 累计误差和小于20Hz即认为匹配成功, 证明所获取的多普勒观测量为该卫星ID对应的观测量; 未匹配成功则继续遍历其余可见卫星的预测多普勒曲线, 直至能够索引出足够的可用卫星。

[0085] 3). 构建基于高程辅助的机会信号多普勒定位观测模型

[0086] 多普勒观测模型可写作:

$$[0087] \quad f_r^s(t) \cdot (-\lambda) = \dot{\rho}_r^s(t) = \mathbf{v}^s \cdot \frac{\mathbf{r}^s(t) - \mathbf{r}_r(t)}{\|\mathbf{r}^s(t) - \mathbf{r}_r(t)\|} + c \cdot \dot{T}(t) + \varepsilon_r^s(t) \quad (1)$$

[0088] 其中, s 为卫星编号, r 为接收机编号, f_r^s 为多普勒频移, t 为接收时刻, λ 为信号波长, $\dot{\rho}$ 为伪距变化率, $\mathbf{v}^s = \begin{bmatrix} v_x^s & v_y^s & v_z^s \end{bmatrix}$ 为卫星的速度向量,

$\mathbf{r}^s = \begin{bmatrix} x^s & y^s & z^s \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} x_r & y_r & z_r \end{bmatrix}^T$ 分别为卫星位置向量, 接收机位置向量, c 为光速, \dot{T} 为卫星与接收机的组合钟漂, ε_r^s 为观测噪声。

[0089] 进一步地, 所述S3还包括:

[0090] 若一段静态观测时间内, 共计观测到 N 颗卫星 (S_1, S_2, \dots, S_N), 待求参数初始解算值为 \mathbf{X}^0 , 待求参数真值为 $\hat{\mathbf{X}}$, 则待求参数初始解算值 \mathbf{X}^0 和待求参数真值 $\hat{\mathbf{X}}$ 的关系表示为:

$$[0091] \quad \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \Delta\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_r^0 \\ y_r^0 \\ z_r^0 \\ d\dot{T}_{S_1}^0 \\ \vdots \\ d\dot{T}_{S_N}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta d\dot{T}_{S_1} \\ \vdots \\ \Delta d\dot{T}_{S_N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0092] 其中, $\Delta\mathbf{X}$ 为待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量, 待求参数分别为接收机三维位置与 N 个卫星与接收机的钟漂组合误差; 其中 $\begin{bmatrix} x_r^0 & y_r^0 & z_r^0 \end{bmatrix}$ 为接收机位置参数初始解算值, $\begin{bmatrix} \Delta x_r & \Delta y_r & \Delta z_r \end{bmatrix}$ 为接收机位置参数改正值, $d\dot{T}_{S_N}^0$ 为第 N 颗卫星与接

收机的组合钟漂的初始解算值, $\Delta d\dot{T}_{S_N}$ 为第N颗卫星与接收机组合钟漂的改正值;

[0093] 将伪距变化率 $\dot{\rho}$ 在初始化参数处线性展开, 表示为:

$$\dot{\rho} \approx \dot{\rho}^0 + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial x_r} \cdot \Delta x_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial y_r} \cdot \Delta y_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial z_r} \cdot \Delta z_r + \frac{\partial \dot{\rho}}{\partial dT} \cdot \Delta dT \quad (3)$$

[0094] 其中, $\dot{\rho}^0$ 为根据初始化参数计算得出的伪距变化率估计值, ΔdT 为卫星与接收机组合钟漂的改正值。

[0095] 观测时间内共计有M个观测量, 将所有观测量基于最小二乘算法组成误差方程组, 表示为:

$$[0096] \quad \mathbf{L}_{M \times 1} - \mathbf{L}_{M \times 1}^0 = \mathbf{G}_{M \times (3+N)} \cdot \Delta \mathbf{X}_{(3+N) \times 1} \quad (4)$$

[0097] 其中, $\mathbf{L}_{M \times 1}$ 为伪距率观测向量, $\mathbf{L}_{M \times 1}^0$ 为利用初始化参数计算得到的伪距率估计值向量, $\mathbf{G}_{M \times (3+N)}$ 为误差方程组的雅阁比矩阵; $\Delta \mathbf{X}_{(3+N) \times 1}$ 为待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量。

[0098] 利用高程信息可辅助基于批量最小二乘的多普勒定位, 将地心看做虚拟卫星, 则接收机到地心的虚拟伪距观测如下:

$$[0099] \quad \tilde{\rho}_h(t) = \left\| \mathbf{r}^e(t) - \tilde{\mathbf{r}}_r(t) \right\| + \xi_r^e(t) \quad (5)$$

[0100] 其中, $\tilde{\rho}_h$ 为接收机到地心的虚拟伪距, $\mathbf{r}^e = [0 \ 0 \ 0]^T$ 为地心坐标,

$\tilde{\mathbf{r}}_r = [\tilde{x}_r \ \tilde{y}_r \ \tilde{z}_r]^T$ 为经过高程信息修正后的接收机估计位置, ξ_r^e 为虚拟观测值的测量误差。

[0101] 将虚拟观测方程和伪距率误差方程组联合得到的误差方程组可写作:

$$[0102] \quad \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ \tilde{\rho}_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{L}^0 \\ \tilde{\rho}_h^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{G}_h \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{X} \quad (6)$$

[0103] 其中, $\tilde{\rho}_h^0$ 为虚拟伪距的估计值, \mathbf{G}_h 为虚拟观测方程的雅阁比矩阵, 带入线性化公式后构建基于高程辅助的机会信号多普勒定位观测模型, 如式(7), 虚线上部分为多普勒观测矩阵, 下部分为高程辅助矩阵, $\dot{\rho}^{S_N}(t_k)$ 为k时刻 S_N 卫星的伪距率, $\dot{\rho}^{0, S_N}(t_k)$ 为对应的伪距率估计值:

$$[0104] \quad \begin{bmatrix} \dot{\rho}^{S_1}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_1}(t_k) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_N}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{S_N}(t_k) \\ \tilde{\rho}_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\rho}^{0,S_1}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0,S_1}(t_k) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0,S_N}(t_1) \\ \vdots \\ \dot{\rho}^{0,S_N}(t_k) \\ \tilde{\rho}_h^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial z_r} & c & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial z_r} & c & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial z_r} & 0 & \dots & c \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial x_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial y_r} & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial z_r} & 0 & \dots & c \\ \hline -\frac{\tilde{x}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & -\frac{\tilde{y}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & -\frac{\tilde{z}_r}{\|\mathbf{r}^e - \tilde{\mathbf{r}}_r\|} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta d\dot{T}_{S_1} \\ \vdots \\ \Delta d\dot{T}_{S_N} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

[0105] 4). 基于广义多普勒GDOP的历元筛选优化

[0106] 传统多普勒定位GDOP具有量纲,无法表征观测条件的好坏,且测量单位与估计量单位不一致,将观测矩阵中的位置参数除以归一化因子 γ ,可得到广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$ 。归一化因子 γ 的计算公式如下:

$$[0107] \quad \gamma = \left[\frac{1}{1 - (R_E / a_{orb})} \right] \sqrt{\frac{\mu}{a_{orb}^3}} \quad (8)$$

[0108] 其中, R_E 为地球半径, a_{orb} 为卫星轨道长半轴, μ 为地球引力常量。

[0109] 利用 γ 将传统多普勒GDOP归一化处理得到广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$:

$$[0110] \quad \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_1)}{\partial z_r} / \gamma & 1 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_1}(t_k)}{\partial z_r} / \gamma & 1 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_1)}{\partial z_r} / \gamma & 0 & \dots & 1 \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial x_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial y_r} / \gamma & \frac{\partial \dot{\rho}^{S_N}(t_k)}{\partial z_r} / \gamma & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0111] 利用广义多普勒观测矩阵 $\mathbf{G}_{doppler}$ 得到广义多普勒GDOP,广义多普勒GDOP可作为表征卫星观测条件好坏的指标,其计算公式为式(10),Trace为求迹运算:

$$[0112] \quad GDOP_{doppler} = \sqrt{\text{Trace}[(\mathbf{G}_{doppler}^T \cdot \mathbf{G}_{doppler})^{-1}]} \quad (10)$$

[0113] 根据多普勒定位观测模型,通过适当降低多普勒信息采样率,但依然保证卫星分布的多样性与运动方向的多样性,从而获得较低的 $GDOP_{doppler}$,且减少了冗余观测,观测量更为精简。

[0114] 根据多普勒定位观测模型,通过保证卫星分布的多样性与运动方向的多样性获得较低的 $GDOP_{doppler}$ 。因此在筛选策略上保留完整的卫星轨迹,但降低多普勒观测值采样率,对于天空轨迹较短,高度角在 20° 以下的侧滑星,其对于 $GDOP_{doppler}$ 贡献有限,也选择剔除,将 $GDOP_{doppler}$ 维持在原有数值的150%以内。该策略可以有效缩减观测量,优化观测矩阵,减小运算压力的同时保证 $GDOP_{doppler}$ 不会显著降低,维持原有定位精度。

[0115] 5). 基于残差检验的观测量质量优化

[0116] 将批量最小二乘解算得到的待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量 $\Delta \mathbf{X}$ 带入公式(4)可得到残差计算公式:

$$[0117] \quad \mathbf{e} = \mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{X} - (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0) = (\mathbf{G} \cdot (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{P} - \mathbf{I}) \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0) \quad (11)$$

[0118] 其中, $\mathbf{e} = [e^{S_1}(t_1) \quad \dots \quad e^{S_1}(t_k) \quad \dots \quad e^{S_N}(t_1) \quad \dots \quad e^{S_N}(t_k)]^T$ 为残差向量, $e^{S_N}(t_k)$ 为 t_k 时刻 S_N 卫星的观测值残差, $\mathbf{P} = \text{diag}[P^{S_1}(t_1) \quad \dots \quad P^{S_1}(t_k) \quad \dots \quad P^{S_N}(t_1) \quad \dots \quad P^{S_N}(t_k)]$ 为权阵, $P^{S_N}(t_k)$ 为 t_k 时刻 S_N 卫星的观测值对应的权值, diag 为取对角矩阵符号;

[0119] 残差的中误差 σ_e 为:

$$[0120] \quad \sigma_e = \sqrt{\frac{\sum e^{S_N}(t_k) \times e^{S_N}(t_k)}{M}} \quad (12)$$

[0121] 其中, M 为观测值总量。

[0122] 基于IGGI权函数公式,根据残差大小将对应观测值分为正常段、可疑段与淘汰段,残差小于 k_0 倍 σ_e 的为正常段,大于 k_1 倍 σ_e 的为淘汰段,二者之间的为可疑段,观测值分类后定权公式如下:

$$[0123] \quad P^{S_N}(t_k) = \begin{cases} 1 & , |e^{S_N}(t_k)| \leq k_0 \sigma_e \\ \frac{\sigma_e}{|e^{S_N}(t_k)|} & , k_0 \sigma_e < |e^{S_N}(t_k)| < k_1 \sigma_e \\ 0 & , |e^{S_N}(t_k)| \geq k_1 \sigma_e \end{cases} \quad (13)$$

[0124] 其中, k_0 取值范围为1.0~1.5, k_1 取值范围为2.5~6.0。

[0125] 6). 终端位置解算

[0126] 根据加权最小二乘原理和经过优化后的观测矩阵式(9)与观测量解算定权策略,得到待求参数初始解算值到待求参数真值的改正量 $\Delta\mathbf{X}$:

$$[0127] \quad \Delta\mathbf{X} = (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot [\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{P} \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0)] \quad (14)$$

[0128] 则待求参数 $\mathbf{X} = \mathbf{X}^0 + \Delta\mathbf{X}$,判断位置参数改正值是否小于阈值 $10\mathbf{e}-5$,如小于阈值 $10\mathbf{e}-5$,则输出定位解。否则用公式(13)更新权阵后返回公式(14)继续迭代计算,直至定位解收敛。

[0129] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,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,均应包含在本发明的保护范围之内。

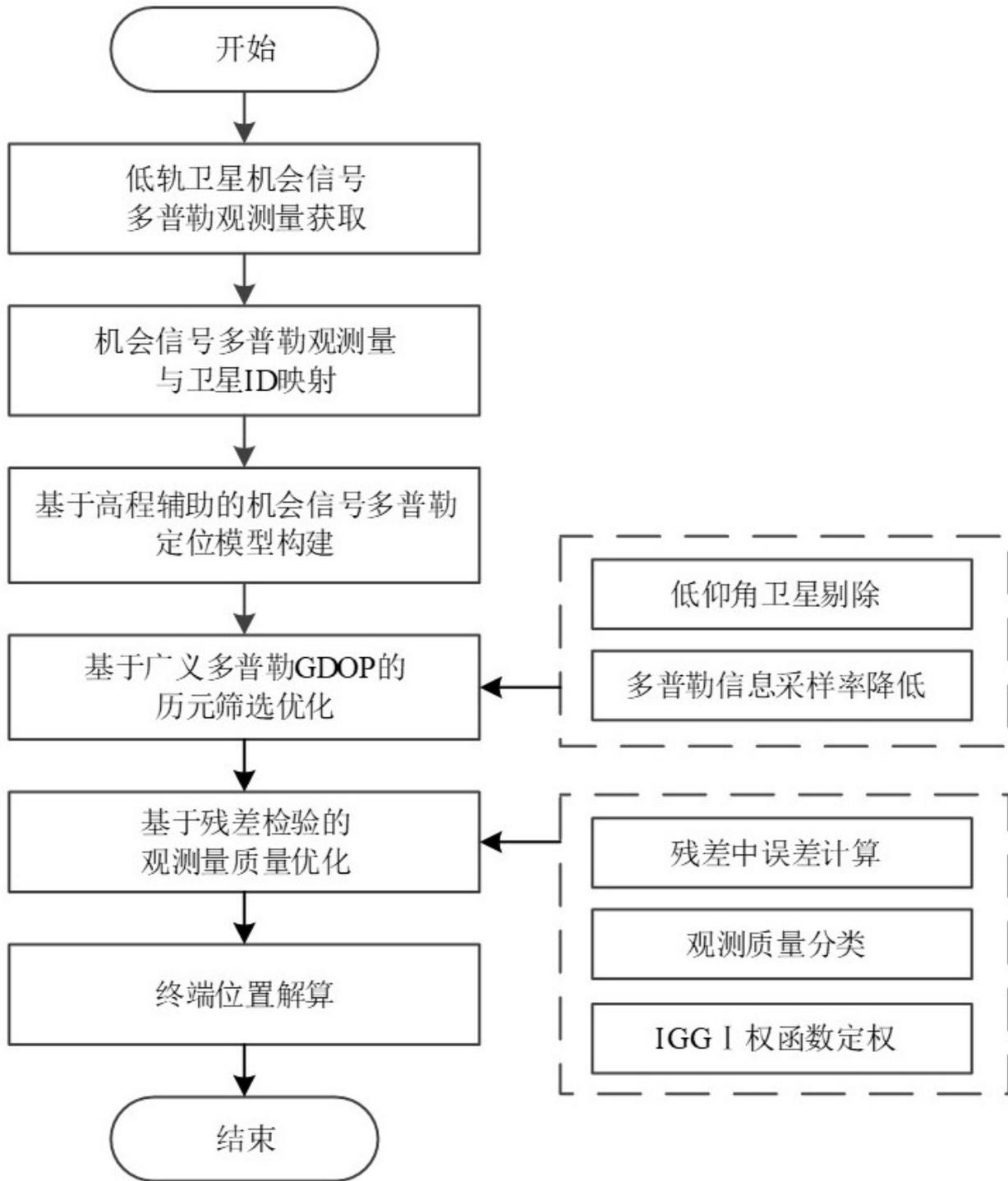


图 1

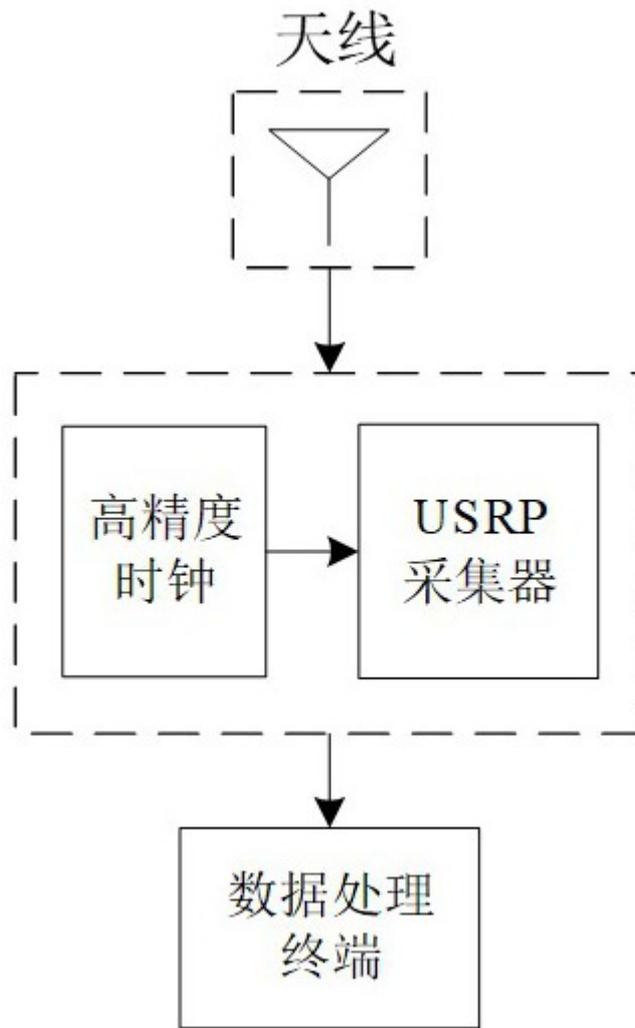


图 2