



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 111948682 A

(43) 申请公布日 2020.11.17

(21) 申请号 202010845726.0

(22) 申请日 2020.08.20

(71) 申请人 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 张晨晰 于志刚 王清标 张纯连
赵心

(74) 专利代理机构 西安铭泽知识产权代理事务
所(普通合伙) 61223

代理人 耿路

(51) Int. Cl.

G01S 19/37 (2010.01)

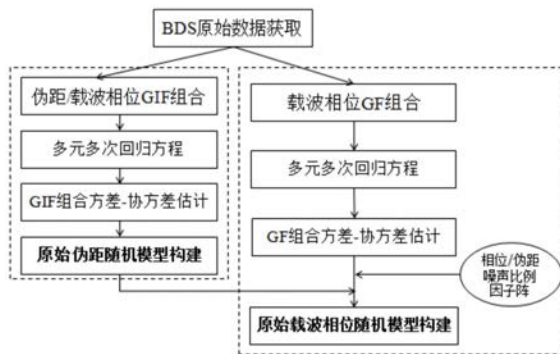
权利要求书4页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,涉及卫星导航定位技术领域,该方法包括:获取BDS三频原始观测数据;建立三频伪距和载波相位的GIF组合,估计该GIF组合的方差-协方差;根据GIF组合的方差-协方差,由线性组合关系变换构建原始伪距随机模型;建立三频载波相位的GF组合,并估计该GF组合的方差-协方差;引入载波/伪距噪声比例因子阵,根据原始伪距随机模型和GF组合的方差-协方差构建原始载波相位的随机模型。本发明极大地优化并改善了BDS随机模型的构建,削弱了由于随机模型不精确对精密定位结果的影响,提高了精密解算RTK、PPP、POD的精度,并改进了模糊度解算和状态估计。



1. 一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,其特征在于,该方法包括:

步骤1,获取BDS三频原始观测数据,包括三频伪距观测值和载波相位观测值;

步骤2,建立三频伪距和载波相位的GIF组合,并估计该GIF组合的方差-协方差;

步骤3,根据GIF组合的方差-协方差,由线性组合关系变换构建原始伪距随机模型;

步骤4,建立三频载波相位的GF组合,并估计该GF组合的方差-协方差;

步骤5,引入载波/伪距噪声比例因子阵,根据原始伪距随机模型和GF组合的方差-协方差构建原始载波相位的随机模型。

2. 如权利要求1所述的一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,其特征在于,步骤2建立三频伪距和载波相位GIF组合的方法为:

BDS的伪距和载波相位观测方程分别表示为:

$$P_k = \rho + \frac{I}{f_k^2} + (b_{k,r} - b_k^s) + \varepsilon_{P_k} \quad (1)$$

$$\Phi_k = \lambda_k \varphi_k = \rho - \frac{I}{f_k^2} - \lambda_k N_k - \lambda_k (B_k^s - B_{k,r}) + \varepsilon_{\Phi_k} \quad (2)$$

其中, P_k 、 Φ_k 分别代表频率 f_k 上以米为单位的伪距观测值和载波相位观测值, ρ 代表包括几何距离、接收机和卫星钟差和对流层延迟的等效距离, k 代表信号频率等级, $k=1,2,3$, λ_k 为频率 f_k 对应的波长, I 是一阶电离层延迟项, $b_{k,r}$ 、 b_k^s 分别为为频率 f_k 上接收机和卫星的伪距硬件延迟, B_k^s 、 $B_{k,r}$ 分别代表频率 f_k 上接收机和卫星的相位硬件延迟, N_k 代表频率 f_k 的整周模糊度, ε_{P_k} 、 ε_{Φ_k} 分别代表伪距和载波相位的观测噪声和多路径效应;

伪距和载波相位GIF组合表达式为:

$$\begin{aligned} GIF &= (lP_1 + mP_2 + nP_3) - (\alpha\Phi_1 + \beta\Phi_2 + \gamma\Phi_3) \\ &= (\alpha\lambda_1 N_1 + \beta\lambda_2 N_2 + \gamma\lambda_3 N_3) + \varepsilon_{GIF} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, l 、 m 、 n 、 α 、 β 、 γ 分别为以米为单位的伪距和载波相位观测量的组合系数。

3. 如权利要求2所述的一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,其特征在于,步骤2估计GIF组合的方差-协方差的方法为:

GIF组合噪声的表达式为:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{GIF_1} \\ \varepsilon_{GIF_2} \\ \varepsilon_{GIF_3} \end{pmatrix}}_{\varepsilon_{GIF}} = \underbrace{\begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{P_1} \\ \varepsilon_{P_2} \\ \varepsilon_{P_3} \end{pmatrix}}_{\varepsilon_P} \quad (4)$$

$$\text{即: } \varepsilon_{GIF} = \mathbf{B} \varepsilon_P \quad (5)$$

其中,矩阵 \mathbf{B} 为三频线性组合系数阵;3个GIF组合随机模型为:

$$E(\varepsilon_{GIF}) = 0, \text{Cov}(\varepsilon_{GIF}) = \Sigma_{GIF}$$

由协方差传播定律,GIF组合的方差-协方差阵表示为:

$$\Sigma_{GIF} = \mathbf{B} \Sigma_P \mathbf{B}^T \quad (6)$$

采用多元线性回归方法同时对3个伪距和载波GIF组合进行多项式拟合,回归拟合模型为:

$$Y=H\mu+\varepsilon_Y \quad (7)$$

其中,

$$Y = \begin{pmatrix} \mathbf{GIF}_1 \\ \mathbf{GIF}_2 \\ \mathbf{GIF}_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{GIF}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{GIF}_i^1 \\ \mathbf{GIF}_i^2 \\ \vdots \\ \mathbf{GIF}_i^t \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_i = \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_i} \\ 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_i} \end{pmatrix}_{t \times p_i}$$

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{pmatrix}, \quad \mu_i = \begin{pmatrix} \mu_i^0 \\ \mu_i^1 \\ \vdots \\ \mu_i^{p_i} \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_Y = \begin{pmatrix} \varepsilon_{Y_1} \\ \varepsilon_{Y_2} \\ \varepsilon_{Y_3} \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_{Y_i} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{Y_i}^1 \\ \varepsilon_{Y_i}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{Y_i}^t \end{pmatrix}$$

其中,t代表历元数,x为历元采样点, p_i 为拟合阶数,i代表三种组合, $i=1,2,3$;

基于式(7),用普通最小二乘中得到的残差向量为:

$$V_i = (I - (H_i^T H_i)^{-1} H_i^T) Y_i \quad (8)$$

残差矩阵为:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_1 & \mathbf{V}_2 & \mathbf{V}_3 \end{pmatrix}_{t \times 3} \quad (9)$$

令 $p=p_1=p_2=p_3$,对残差统计得三频GIF组合的方差-协方差阵:

$$\hat{\Sigma}_{GIF} = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{V}}{t-p-1} \quad (10)$$

4.如权利要求3所述的一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,其特征在于,步骤3中构建原始伪距随机模型的方法为:

由式(6),由GIF组合的方差-协方差阵计算原始伪距的方差-协方差阵的计算公式为:

$$\hat{\Sigma}_P = \mathbf{B}^{-1} \hat{\Sigma}_{GIF} (\mathbf{B}^T)^{-1} \quad (11)$$

上式即为原始伪距随机模型; $\hat{\Sigma}_P$ 也表示为:

$$\hat{\Sigma}_P = \begin{pmatrix} \sigma_{P_1}^2 & \sigma_{P_1 P_2} & \sigma_{P_1 P_3} \\ \sigma_{P_1 P_2} & \sigma_{P_2}^2 & \sigma_{P_2 P_3} \\ \sigma_{P_1 P_3} & \sigma_{P_2 P_3} & \sigma_{P_3}^2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中的 $\sigma_{P_1}^2$ 、 $\sigma_{P_2}^2$ 、 $\sigma_{P_3}^2$ 分别为B1、B2、B3频点上伪距观测量的方差,不同频点上的伪距观测值的交叉相关系数按下式计算:

$$\rho_{P_1 P_2} = \frac{\sigma_{P_1 P_2}}{\sigma_{P_1} \cdot \sigma_{P_2}} \quad (13)$$

5.如权利要求1所述的一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,其特征在于,步骤4中建立的三频载波相位的GF组合为:

$$\Phi_{GF} = \lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2 = \frac{I}{f_1^2} - \frac{I}{f_2^2} + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{\Phi_{GF}} \quad (14)$$

其中, I 是一阶电离层延迟项, f_1 和 f_2 代表频率, λ_1 和 λ_2 代表波长, N_1 和 N_2 代表整周模糊度, $\varepsilon_{\Phi_{GF}}$ 代表 GF 组合噪声。

6. 如权利要求 5 所述的一种基于 BDS 三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法, 其特征在于, 步骤 4 中估计 GF 组合的方差-协方差的方法为:

载波相位无几何组合仅有 2 组不相关, 选用式 (14) 的电离层残差组合 (1, -1, 0) 和 (1, 0, -1), 那么 2 个 GF 组合噪声的表达式为:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{GF_1} \\ \varepsilon_{GF_2} \end{pmatrix}}_{\varepsilon_{GF}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}}_G \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{\Phi_1} \\ \varepsilon_{\Phi_2} \\ \varepsilon_{\Phi_3} \end{pmatrix}}_{\varepsilon_{\Phi}} \quad (15)$$

$$\text{即: } \varepsilon_{GF} = \mathbf{G} \varepsilon_{\Phi} \quad (16)$$

组合噪声的方差-协方差阵表示为:

$$\Sigma_{GF} = \mathbf{G} \Sigma_{\Phi} \mathbf{G}^T \quad (17)$$

采用多元线性回归方法同时对 2 个 GF 组合进行多项式拟合, 回归拟合模型为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\boldsymbol{\mu} + \varepsilon_Y \quad (18)$$

其中,

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \Delta GF_1 \\ \Delta GF_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{GIF}_{\Phi} = \begin{pmatrix} \Delta GF_1^1 \\ \Delta GF_1^2 \\ \vdots \\ \Delta GF_1^t \end{pmatrix}, \quad \mathbf{DIF}_{\Phi} = \begin{pmatrix} \Delta GF_2^1 \\ \Delta GF_2^2 \\ \vdots \\ \Delta GF_2^t \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_j = \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_j} \\ 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_j} \end{pmatrix}_{t \times p_j}$$

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\mu}_1 \\ \boldsymbol{\mu}_2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu}_j = \begin{pmatrix} \mu_j^0 \\ \mu_j^1 \\ \vdots \\ \mu_j^{p_j} \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_Y = \begin{pmatrix} \varepsilon_{Y_1} \\ \varepsilon_{Y_2} \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_{Y_1} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\Delta GF_1}^1 \\ \varepsilon_{\Delta GF_1}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{\Delta GF_1}^t \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_{Y_2} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\Delta GF_2}^1 \\ \varepsilon_{\Delta GF_2}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{\Delta GF_2}^t \end{pmatrix}$$

其中, $j=1, 2$, 当 $j=1$ 代表 (1, -1, 0) 组合, $j=2$ 代表 (1, 0, -1) 组合, t 代表历元数, x 为历元采样点, p_j 为拟合阶数;

基于式 (18), 用普通最小二乘中得到的残差向量为:

$$\mathbf{V}_j = (\mathbf{I} - (\mathbf{H}_j^T \mathbf{H}_j)^{-1} \mathbf{H}_j^T) \mathbf{Y}_j \quad (19)$$

残差矩阵为:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{V}_1 \ \mathbf{V}_2) \quad (20)$$

当 $p=p_1=p_2$, 对残差统计得三频 GF 组合的方差-协方差阵:

$$\hat{\Sigma}_{\Delta GF} = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{V}}{t - p - 1} \quad (21)$$

采用滑动窗口,求出m个样本大小的窗口的噪声的方差矩阵作为下一个历元的噪声方差-协方差阵为:

$$\hat{\Sigma}_{\Delta GF}(k+1) = \frac{\mathbf{V}^T(k)\mathbf{V}(k)}{m-1} \quad (22)$$

则可求历元间非差的GF组合的方差-协方差阵 $\hat{\Sigma}_{GF}(k+1)$ 。

7.如权利要求6所述的一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,其特征在于,步骤5构建原始载波相位的随机模型的方法为:

引入载波相位与伪距方差-协方差比例因子阵 θ ,则GIF组合的载波相位方差-协方差阵与GF组合的伪距方差-协方差阵之间的关系表示为:

$$\Sigma_{\Phi} = \theta * \Sigma_P \quad (23)$$

$$\text{其中,“*”代表哈达马积, } \theta = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{12} & \theta_{22} & \theta_{23} \\ \theta_{13} & \theta_{23} & \theta_{33} \end{pmatrix};$$

令 θ' 为比例因子阵 θ 左上角 2×2 的子矩阵,表示为:

$$\theta' = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} \\ \theta_{12} & \theta_{22} \end{pmatrix} \quad (24)$$

结合式(23)、式(24)与式(17),有:

$$\Sigma_{GF} = \theta' * (G \Sigma_P G^T) \quad (25)$$

由式(24)计算比例因子子阵 θ' ;假设 $\theta_{33} = \theta_{22}$ 且 $\theta_{13} = \theta_{23} = \theta_{12}$,由式(23)得原始载波相位的方差-协方差为:

$$\Sigma_{\Phi} = \begin{pmatrix} \sigma_{\Phi_1}^2 & \sigma_{\Phi_1\Phi_2} & \sigma_{\Phi_1\Phi_3} \\ \sigma_{\Phi_1\Phi_2} & \sigma_{\Phi_2}^2 & \sigma_{\Phi_2\Phi_3} \\ \sigma_{\Phi_1\Phi_3} & \sigma_{\Phi_2\Phi_3} & \sigma_{\Phi_3}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{12} \\ \theta_{12} & \theta_{22} & \theta_{12} \\ \theta_{12} & \theta_{12} & \theta_{22} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sigma_{P_1}^2 & \sigma_{P_1P_2} & \sigma_{P_1P_3} \\ \sigma_{P_1P_2} & \sigma_{P_2}^2 & \sigma_{P_2P_3} \\ \sigma_{P_1P_3} & \sigma_{P_2P_3} & \sigma_{P_3}^2 \end{pmatrix} \quad (26)$$

其中 $\sigma_{\Phi_1}^2$ 、 $\sigma_{\Phi_2}^2$ 、 $\sigma_{\Phi_3}^2$ 分别为B1、B2、B3频点上的载波相位观测值的方差, θ_{11} 和 θ_{22} 分别为B1和B2频点上的载波相位与伪距方差的比例因子, θ_{12} 为B1和B2频点的载波相位与伪距相关系数的比例因子;

根据式(26)提供的原始载波相位的方差-协方差构建原始载波相位的随机模型。

一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法

技术领域

[0001] 本发明涉及卫星导航定位技术领域,特别是涉及一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法。

背景技术

[0002] 北斗卫星导航系统(以下简称“BDS”)是中国着眼于国家安全和经济社会发展需要,自主建设、独立运行的卫星导航系统,是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务(Positioning Navigation and Timing,PNT)的国家重要空间基础设施。BDS是目前国际上首个提供全星座三频信号服务的系统,三频信号相比单频或双频信号,能够为用户提供更多的观测冗余信息和更灵活的处理方法,在精密导航定位中具有更大的优势。

[0003] 用于描述观测值与未知参数之间关系的模型称为函数模型或数学模型。而描述观测值本身统计特性的模型称为随机模型,主要通过一个适当的协方差矩阵来进行定义。在卫星精密定位中,观测值的随机模型构建起到非常重要的作用。卫星信号的噪声受卫星系统、接收机类型、高度角、测量模式和观测环境等复杂条件的影响,难以确定普遍适用的方差-协方差阵。Feng等提出基于三频无几何无电离层组合的方法实现了对GPS、QZSS三频信号观测噪声的实时估计。Wang等在原始的伪距和相位信号中生成4个线性无关的无几何无电离层(以下简称“GIF”)组合来计算方差-协方差阵,应用方差分量估计(VCE)算法获得每个历元三频伪距和相位的协方差阵。

[0004] 利用GIF组合方法更适合于伪距观测值精度的估计,而对载波相位方差-协方差阵的估计一般假设各频点间独立等精度,这忽略了各频点间精度的差异和各频点间的交叉相关性;或结合方差分量估计算法,计算较为复杂,且未区分各频点伪距和载波相位的交叉相关性。随着三频技术的发展,如何充分利用三频组合优势实现对载波观测值的随机模型构建,是提高BDS精密定位的关键问题。

发明内容

[0005] 为了优化BDS三频精密定位的随机模型,精化BDS历元更新的定权策略,提高实时及后处理精密定位的精度,本发明充分利用BDS三频数据,基于GIF组合确定历元更新的非差BDS观测值的方差-协方差矩阵,经过基于多元多次回归分析的GIF组合随机噪声估计、原始伪距观测值随机模型构建、原始载波相位观测值随机模型构建等流程,提供了一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,可以解决现有技术中存在的问题。

[0006] 本发明提供了一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,该方法包括:

[0007] 步骤1,获取BDS三频原始观测数据,包括三频伪距观测值和载波相位观测值;

[0008] 步骤2,建立三频伪距和载波相位的GIF组合,并估计该GIF组合的方差-协方差;

[0009] 步骤3,根据GIF组合的方差-协方差,由线性组合关系变换构建原始伪距随机模

型；

[0010] 步骤4,建立三频载波相位的GF组合,并估计该GF组合的方差-协方差；

[0011] 步骤5,引入载波/伪距噪声比例因子阵,根据原始伪距随机模型和GF组合的方差-协方差构建原始载波相位的随机模型。

[0012] 本发明中的一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,其有益效果为:

[0013] 基于GIF组合的多元多次回归法估计原始三频BDS伪距的随机模型,并引入载波/伪距噪声比例因子阵,结合载波相位GF组合构建实时更新的载波相位的随机模型。该方法极大地优化并改善了BDS随机模型的构建,削弱了由于随机模型不精确对精密定位结果的影响,提高了精密解算RTK、PPP、POD的精度,并改进了模糊度解算和状态估计等。随着目前多频GNSS接收机的发展,对于GPS等其他导航卫星数据,该方法可应用到其他卫星导航系统轨道确定,对于多系统联合精密定位具有重要的意义。

附图说明

[0014] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0015] 图1为本发明中一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法的流程图。

具体实施方式

[0016] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0017] 参照图1,本发明提供了一种基于BDS三频组合的伪距和载波相位随机模型构建方法,该方法主要包括:获取BDS三频原始观测数据,三频伪距和载波相位GIF组合及其方差-协方差估计,再由线性组合关系变换构建原始伪距随机模型,三频载波相位GF组合及其方差-协方差估计,最后引入载波/伪距噪声比例因子阵,构建历元更新的载波相位的随机模型。下面将对每个步骤进行详细说明。

[0018] (一) 获取BDS三频原始观测数据

[0019] 原始数据为BDS系统信号,其包括BDS卫星导航星历和卫星原始观测数据。所述卫星原始观测数据包括三个频率的伪距观测值和载波相位观测值。

[0020] (二) 三频伪距和载波相位GIF组合及其方差-协方差估计

[0021] 1. 三频伪距和载波相位GIF组合

[0022] BDS的伪距和载波相位观测方程,可表示为:

$$[0023] \quad P_k = \rho + \frac{I}{f_k^2} + (b_{k,r} - b_k^s) + \varepsilon_{P_k} \quad (1)$$

$$[0024] \quad \Phi_k = \lambda_k \varphi_k = \rho - \frac{I}{f_k^2} - \lambda_k N_k - \lambda_k (B_k^s - B_{k,r}) + \varepsilon_{\Phi_k} \quad (2)$$

$$[0025] \quad \Phi_k = \lambda_k \varphi_k = \rho - \frac{I}{f_k^2} - \lambda_k N_k - \lambda_k (B_k^s - B_{k,r}) + \varepsilon_{\Phi_k} \quad (2)$$

[0026] 其中, P_k 、 Φ_k 分别代表频率 f_k 上以米为单位的伪距观测值和载波相位观测值, ρ 代表包括几何距离、接收机和卫星钟差和对流层延迟的等效距离, k 代表信号频率等级, $k=1, 2, 3$, λ_k 为频率 f_k 对应的波长, I 是一阶电离层延迟项, $b_{k,r}$ 、 b_k^s 分别为为频率 f_k 上接收机和卫星的伪距硬件延迟, B_k^s 、 $B_{k,r}$ 分别代表频率 f_k 上接收机和卫星的相位硬件延迟, N_k 代表频率 f_k 的整周模糊度, ε_{P_k} 、 ε_{Φ_k} 分别代表伪距和载波相位的观测噪声和多路径效应。

[0027] 无几何无电离层 (GIF) 组合能够消除站星间的几何距离、接收机和卫星钟差、电离层延迟一阶项等误差。伪距和载波相位 GIF 组合 (以米为单位) 表达式为:

$$[0028] \quad \begin{aligned} GIF &= (lP_1 + mP_2 + nP_3) - (\alpha\Phi_1 + \beta\Phi_2 + \gamma\Phi_3) \\ &= (\alpha\lambda_1 N_1 + \beta\lambda_2 N_2 + \gamma\lambda_3 N_3) + \varepsilon_{GIF} \end{aligned} \quad (3)$$

[0029] 其中, l 、 m 、 n 、 α 、 β 、 γ 分别为以米为单位的伪距和载波相位观测量的组合系数。由于伪距噪声远大于载波相位噪声, 所以, 假定忽略载波相位噪声影响, 式中组合噪声 ε_{GIF} 表示为: $\varepsilon_{GIF} = l\varepsilon_{P_1} + m\varepsilon_{P_2} + n\varepsilon_{P_3}$ 。

[0030] 为保证满足无几何无电离层条件, 又由 BDS 卫星的三个频率值 ($B1=1561.098\text{MHz}$ 、 $B2=1207.140\text{MHz}$ 和 $B3=1268.520\text{MHz}$), GIF 组合的组合系数如表 1。

[0031] 表 1 BDS 三频 GIF 组合的组合系数

	l	m	n	α	β	γ
[0032] GIF_1	1	0	0	-3.9743	2.9743	0
GIF_2	0	1	0	-4.9743	3.9743	0
GIF_3	0	0	1	-4.8874	0	4.8874

[0033] GIF 组合噪声的表达式为:

$$[0034] \quad \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{GIF_1} \\ \varepsilon_{GIF_2} \\ \varepsilon_{GIF_3} \end{pmatrix}}_{\varepsilon_{GIF}} = \underbrace{\begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{P_1} \\ \varepsilon_{P_2} \\ \varepsilon_{P_3} \end{pmatrix}}_{\varepsilon_P} \quad (4)$$

$$[0035] \quad \text{即: } \varepsilon_{GIF} = \mathbf{B} \varepsilon_P \quad (5)$$

[0036] 其中, 矩阵 \mathbf{B} 为三频线性组合系数阵。3 个 GIF 组合随机模型为:

$$[0037] \quad E(\varepsilon_{GIF}) = 0, \text{Cov}(\varepsilon_{GIF}) = \Sigma_{GIF}$$

[0038] 由协方差传播定律, GIF 组合的方差-协方差阵可表示为:

$$[0039] \quad \Sigma_{GIF} = \mathbf{B} \Sigma_P \mathbf{B}^T \quad (6)$$

[0040] 接下来采用多元多次回归模型估计 3 个 GIF 组合的常数偏差项, 计算 GIF 组合噪声

的方差协方差阵 Σ_{GIF} 。

[0041] 2. 基于多元多次回归方程的GIF组合的方差-协方差估计

[0042] 引入一个时间的函数来描述每个GIF观测量的时间序列,常用的为 p 阶多项式拟合:

$$[0043] \quad y_{j,i} = \mu_{i0} + \mu_{i1}(t_j - t_0) + \cdots + \mu_{ip_i}(t_j - t_0)^{p_i} + \varepsilon_{j,i} \quad (7)$$

[0044] 采用多元线性回归方法同时对3个伪距和载波GIF组合进行多项式拟合,具体多元多次线性回归拟合模型为:

$$[0045] \quad Y = H\mu + \varepsilon_Y \quad (8)$$

[0046] 其中,

$$[0047] \quad Y = \begin{pmatrix} \text{GIF}_1 \\ \text{GIF}_2 \\ \text{GIF}_3 \end{pmatrix}, \quad \text{GIF}_i = \begin{pmatrix} \text{GIF}_i^1 \\ \text{GIF}_i^2 \\ \vdots \\ \text{GIF}_i^t \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} H_1 & 0 & 0 \\ 0 & H_2 & 0 \\ 0 & 0 & H_3 \end{pmatrix}, \quad H_i = \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_i} \\ 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_i} \end{pmatrix}_{t \times p_i}$$

$$[0048] \quad \mu = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{pmatrix}, \quad \mu_i = \begin{pmatrix} \mu_i^0 \\ \mu_i^1 \\ \vdots \\ \mu_i^{p_i} \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_Y = \begin{pmatrix} \varepsilon_{Y_1} \\ \varepsilon_{Y_2} \\ \varepsilon_{Y_3} \end{pmatrix}, \quad \varepsilon_{Y_i} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{Y_i}^1 \\ \varepsilon_{Y_i}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{Y_i}^t \end{pmatrix}$$

[0049] 其中, $i=1,2,3$, 分别代表3个GIF组合, t 代表历元数, x 为历元采样点, p_i 为拟合阶数。

[0050] 基于式(8),用普通最小二乘中得到的残差向量为:

$$[0051] \quad V_i = (I - (H_i^T H_i)^{-1} H_i^T) Y_i \quad (9)$$

[0052] 残差矩阵为:

$$[0053] \quad V = \begin{pmatrix} V_1 & V_2 & V_3 \end{pmatrix}_{t \times 3} \quad (10)$$

[0054] 令 $p=p_1=p_2=p_3$, 对残差统计可得三频GIF组合的方差-协方差阵:

$$[0055] \quad \hat{\Sigma}_{\text{GIF}} = \frac{V^T V}{t - p - 1} \quad (11)$$

[0056] (三) 原始伪距随机模型构建

[0057] 由式(6),GIF组合的方差-协方差阵计算原始伪距的方差-协方差阵的计算公式为:

$$[0058] \quad \hat{\Sigma}_p = B^{-1} \hat{\Sigma}_{\text{GIF}} (B^T)^{-1} \quad (12)$$

[0059] 上式即为原始伪距随机模型。 $\hat{\Sigma}_p$ 可表示为:

$$[0060] \quad \hat{\Sigma}_p = \begin{pmatrix} \sigma_{P_1}^2 & \sigma_{P_1 P_2} & \sigma_{P_1 P_3} \\ \sigma_{P_1 P_2} & \sigma_{P_2}^2 & \sigma_{P_2 P_3} \\ \sigma_{P_1 P_3} & \sigma_{P_2 P_3} & \sigma_{P_3}^2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

[0061] 其中的 $\sigma_{P_1}^2$ 、 $\sigma_{P_2}^2$ 、 $\sigma_{P_3}^2$ 分别为B1、B2、B3频点上伪距观测量的方差,不同频点上的

伪距观测值的交叉相关系数按下式计算：

$$[0062] \quad \rho_{R_1 R_2} = \frac{\sigma_{R_1 R_2}}{\sigma_{R_1} \cdot \sigma_{R_2}} \quad (14)$$

[0063] 多元回归分析建模顾及了观测值间的交叉相关性,可实现非差伪距随机模型的实时单站估计。

[0064] (四) 三频载波相位GF组合及其方差-协方差估计

[0065] 1. 三频载波相位GF组合

[0066] 为准确地计算载波相位的方差-协方差阵,采用无几何载波相位(以下简称“GF”)组合。GF组合消除了星站间与频率无关的几何距离项,虽然仍有电离层残余,但是由于电离层延迟以及多路径效应和硬件延迟等误差在采样间隔不大的历元间变化较小,历元间差分可进一步削弱电离层延迟、多路径和伪距硬件延迟,在周跳已经修复和剔除干净的前提下,也消除了整周模糊度。GF的表达式为：

$$[0067] \quad \Phi_{GF} = \lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2 = \frac{I}{f_1^2} - \frac{I}{f_2^2} + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{\Phi_{GF}} \quad (15)$$

[0068] 其中,I是一阶电离层延迟项, f_1 和 f_2 代表频率, λ_1 和 λ_2 代表波长, N_1 和 N_2 代表整周模糊度, $\varepsilon_{\Phi_{GF}}$ 代表GF组合噪声。

[0069] 载波相位无几何组合仅有2组不相关,选用电离层残差组合(1,-1,0)(如式15)和(1,0,-1),那么2个GF组合噪声的表达式为：

$$[0070] \quad \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{GF_1} \\ \varepsilon_{GF_2} \end{pmatrix}}_{\varepsilon_{GF}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}}_G \underbrace{\begin{pmatrix} \varepsilon_{\Phi_1} \\ \varepsilon_{\Phi_2} \\ \varepsilon_{\Phi_3} \end{pmatrix}}_{\varepsilon_{\Phi}} \quad (16)$$

$$[0071] \quad \text{即: } \varepsilon_{GF} = \mathbf{G} \varepsilon_{\Phi} \quad (17)$$

[0072] 那么,组合噪声的方差-协方差阵可表示为：

$$[0073] \quad \Sigma_{GF} = \mathbf{G} \Sigma_{\Phi} \mathbf{G}^T \quad (18)$$

[0074] 2. 基于多元多次回归方程的GF组合的方差-协方差估计

[0075] 要计算载波相位噪声的方差-协方差阵首先需要计算历元间差分的GF组合噪声的方差协方差阵 $\Sigma_{\Delta GF}$ 。类似地,采用多元线性回归方法同时对2个GF组合进行多项式拟合,具体多元多次线性回归拟合模型如式(7)、(8),其中的各元素表示如下：

$$[0076] \quad \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \Delta GF_1 \\ \Delta GF_2 \end{pmatrix}, \mathbf{GIF}_{\Phi} = \begin{pmatrix} \Delta GF_1^1 \\ \Delta GF_1^2 \\ \vdots \\ \Delta GF_1^t \end{pmatrix}, \mathbf{DIF}_{\Phi} = \begin{pmatrix} \Delta GF_2^1 \\ \Delta GF_2^2 \\ \vdots \\ \Delta GF_2^t \end{pmatrix}, \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_2 \end{pmatrix}, \mathbf{H}_j = \begin{pmatrix} 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_j} \\ 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x & x^2 & \cdots & x^{p_j} \end{pmatrix}_{t \times p_j}$$

$$[0077] \quad \boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\mu}_1 \\ \boldsymbol{\mu}_2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu}_j = \begin{pmatrix} \mu_j^0 \\ \mu_j^1 \\ \vdots \\ \mu_j^{p_j} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_Y = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{Y_1} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{Y_2} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{Y_1} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\Delta GF_1}^1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\Delta GF_1}^2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\Delta GF_1}^t \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{Y_2} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\Delta GF_2}^1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\Delta GF_2}^2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\Delta GF_2}^t \end{pmatrix}$$

[0078] 其中, $j=1, 2$ 。当 $j=1$ 代表 $(1, -1, 0)$ 组合, $j=2$ 代表 $(1, 0, -1)$ 组合, t 代表历元数, x 为历元采样点, p_j 为拟合阶数。

[0079] 基于上式, 用普通最小二乘中得到的残差向量为:

$$[0080] \quad V_j = (I - (H_j^T H_j)^{-1} H_j^T) Y_j \quad (19)$$

[0081] 残差矩阵为:

$$[0082] \quad V = (V_1 \ V_2) \quad (20)$$

[0083] 当 $p=p_1=p_2$, 对残差统计可得三频GF组合的方差-协方差阵:

$$[0084] \quad \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{\Delta GF} = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{V}}{t - p - 1} \quad (21)$$

[0085] 采用滑动窗口, 求出 m 个样本大小的窗口的噪声的方差矩阵作为下一个历元的噪声方差-协方差阵为:

$$[0086] \quad \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{\Delta GF}(k+1) = \frac{\mathbf{V}^T(k) \mathbf{V}(k)}{m-1} \quad (22)$$

[0087] 则可求历元间非差的GF组合的方差-协方差阵 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{GF}(k+1)$ 。

[0088] 由于不相关的载波相位组合仅有两个, 所以, 无法直接由GF组合的方差-协方差阵计算原始载波相位的方差-协方差阵。

[0089] (五) 原始载波相位随机模型构建

[0090] 引入一个载波相位与伪距方差-协方差比例因子阵 $\boldsymbol{\theta}$, 则载波相位方差-协方差阵与伪距方差-协方差阵之间的关系可表示为:

$$[0091] \quad \boldsymbol{\Sigma}_\Phi = \boldsymbol{\theta} * \boldsymbol{\Sigma}_P \quad (23)$$

$$[0092] \quad \text{其中, “*” 代表哈达马积, } \boldsymbol{\theta} = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \\ \theta_{12} & \theta_{22} & \theta_{23} \\ \theta_{13} & \theta_{23} & \theta_{33} \end{pmatrix}。$$

[0093] 由式(17)知, 组合系数阵 G 为 2×3 的矩阵, 所以式(18)中的 $(G \boldsymbol{\Sigma}_P G^T)$ 矩阵为 2×2 阶矩阵, $\boldsymbol{\Sigma}_{GF}$ 也是 2×2 阶矩阵, 令 $\boldsymbol{\theta}'$ 为比例因子阵 $\boldsymbol{\theta}$ 左上角 2×2 的子矩阵, 表示为:

$$[0094] \quad \boldsymbol{\theta}' = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} \\ \theta_{12} & \theta_{22} \end{pmatrix} \quad (24)$$

[0095] 结合式(23)、式(24)与式(18), 有:

$$[0096] \quad \boldsymbol{\Sigma}_{GF} = \boldsymbol{\theta}' * (G \boldsymbol{\Sigma}_P G^T) \quad (25)$$

[0097] 由式(24)即可计算比例因子子阵 $\boldsymbol{\theta}'$ 。假设 $\theta_{33} = \theta_{22}$ 且 $\theta_{13} = \theta_{23} = \theta_{12}$, 由式(23), 得原始载波相位的方差-协方差为:

$$[0098] \quad \Sigma_{\Phi} = \begin{pmatrix} \sigma_{\Phi_1}^2 & \sigma_{\Phi_1\Phi_2} & \sigma_{\Phi_1\Phi_3} \\ \sigma_{\Phi_1\Phi_2} & \sigma_{\Phi_2}^2 & \sigma_{\Phi_2\Phi_3} \\ \sigma_{\Phi_1\Phi_3} & \sigma_{\Phi_2\Phi_3} & \sigma_{\Phi_3}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{12} \\ \theta_{12} & \theta_{22} & \theta_{12} \\ \theta_{12} & \theta_{12} & \theta_{22} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sigma_{P_1}^2 & \sigma_{P_1P_2} & \sigma_{P_1P_3} \\ \sigma_{P_1P_2} & \sigma_{P_2}^2 & \sigma_{P_2P_3} \\ \sigma_{P_1P_3} & \sigma_{P_2P_3} & \sigma_{P_3}^2 \end{pmatrix} \quad (26)$$

[0099] 其中, $\sigma_{\Phi_1}^2$ 、 $\sigma_{\Phi_2}^2$ 、 $\sigma_{\Phi_3}^2$ 分别为B1、B2、B3频点上的载波相位观测值的方差。 θ_{11} 和 θ_{22} 分别为B1和B2频点上的载波相位与伪距方差的比例因子。 θ_{12} 为B1和B2频点的载波相位与伪距相关系数的比例因子。该方法顾及了载波相位各频点间的交叉相关系数,按式(26)可以为双频、三频非组合或组合观测提供准确的方差-协方差阵,得以构建精确的随机模型。

[0100] 尽管已描述了本发明的优选实施例,但本领域内的技术人员一旦得知了基本创造性概念,则可对这些实施例作出另外的变更和修改。所以,所附权利要求意欲解释为包括优选实施例以及落入本发明范围的所有变更和修改。

[0101] 显然,本领域的技术人员可以对本发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内,则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

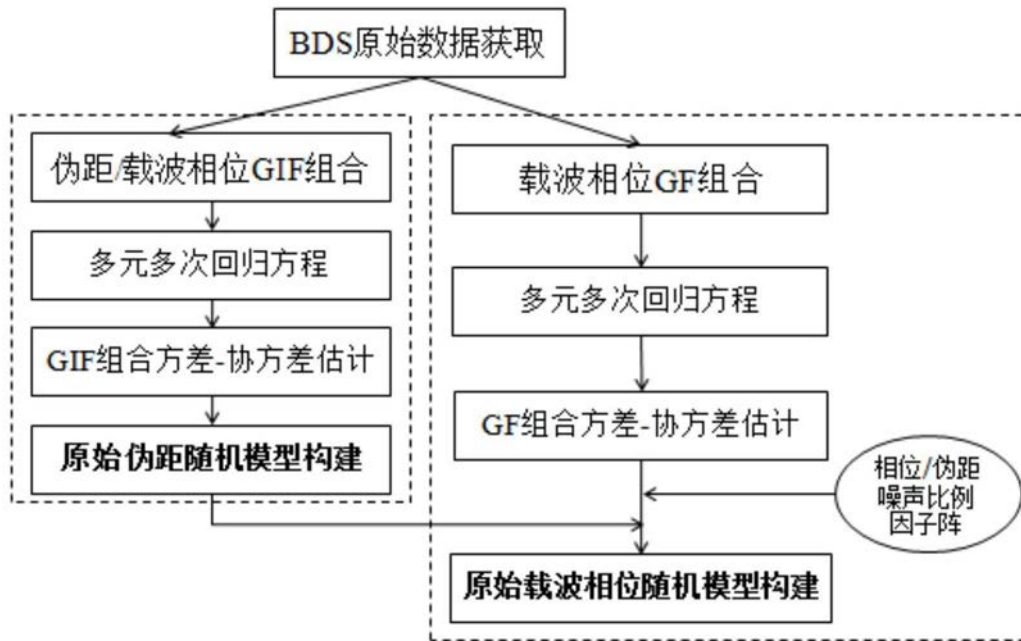


图1