

文章编号: 1001-1595(2011)S 0063-05

精密单点定位用户自主式完备性监测算法

秘金钟¹, 李 玮², 谷守周¹

1. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079

Precise Point Positioning RAIM Method

BI Jinzhong¹, LI Wei², GU Shouzhou¹

1. China Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract : Precise point positioning (PPP) is one of the key technologies in GNSS high precise positioning. Extended Kalman filtering estimation is adopted in PPP, the estimated parameters including station coordinates, receiver clock offset, tropospheric delay and virtual parameters. Based on parity method, correlation distances of design matrix vectors are mainly studied and taken as research objects of detection and recognition of gross error. The set of single and multiple gross errors can be distinguished by using the correlation distances time series of vectors and matrix. The RAIM method of PPP solves the issue of quality control. It makes the recognition of gross error more clear and can detect multiple gross errors.

Key words : PPP; RAIM; correlation distance; integrity

摘 要: 精密单点定位 PPP 是当前 GNSS 高精度定位中的关键技术之一, 使用的 PPP 采用扩展卡尔曼滤波估计, 未知参数包括站点坐标, 接收机钟差, 对流层延迟以及虚拟未知数。在 QR 奇偶检校法的基础上, 重点考察设计矩阵向量间的相关距离, 将其作为粗差探测和识别的研究对象。通过向量相关距离时间序列, 可以区分单个粗差和多个粗差的粗差集。提出精密单点定位的 RAIM 算法, 解决了精密单点定位中的质量控制问题, 使得多个粗差的识别更加清晰和快捷。

关键词: 精密单点定位; 用户自主式完备性监测; 相关距离; 完备性

中图分类号: P228

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2009AA121405); 国家自然科学基金(40874012)

1 引 言

精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 利用高精度精密星历、卫星钟差和双频载波相位观测数据, 采用非差定位模式进行精密定位^[1]。非差定位模式的优点包括保留所有观测信息, 直接解算测站坐标, 各个测站的观测值不相关, 有利于质量控制, 测站之间无距离限制等。PPP 参数估计一般采用最小二乘法或者卡尔曼滤波方法^[2]。

用户自主式完备性监测 (receiver autonomous integrity monitoring, RAIM), 是指根据用户接收机的多余观测值监测用户定位结果的完备性^[3]。最典型的情况是发现一颗有问题的卫星对定位结果的影响, 卫星的问题可能是钟差改正信息不正确或者卫星不能正常工作等^[4]。RAIM 算法的实质是以误差理论和可靠性分析为理论依据的粗差探测与识别^[5-6]。

实时 PPP 是当前 GNSS 高精度定位的关键技术, 也是未来高精度定位的重要方向之一, 而 PPP 的 RAIM 算法是 GNSS 完备性监测算法重要组成部分, 它可以保障高精度导航用户的安全使用。在基于向量相关距离 RAIM 算法的基础上, 进行 PPP 的 RAIM 算法研究, 实现多个粗差的探测和识别。

2 扩展卡尔曼滤波 PPP 定位方法

2.1 数学模型

无电离层组合模型是最常用的 PPP 观测模型, 采用双频 GPS 伪距和载波相位观测值组成无电离层组合来构成观测模型。观测方程如下

$$P_3 = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + C(dt'_{r} - dt'_{s'}) + T + E_3 \quad (1)$$

$$\Phi_3 = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + C(dt'_{r} - dt'_{s'}) + T + \lambda N'_{3+} + \varepsilon \quad (2)$$

式中, 下标 $i = 1, 2$ 表示各载波相位观测值的频段; r, s 分别对应某接收机和卫星; C 为真空中的光速; dt_r 为吸收接收机硬件延迟的接收机钟差; dt_s 为包含无电离层组合的卫星硬件延迟的卫星钟差; T 为对流层延迟影响; E_s, ε 分别为伪距和相位上多路径、观测噪声等未模型化的误差影响; P_3, Φ_3 为无电离层影响的组合观测值; ρ 为信号发射时刻的卫星位置到信号接收时刻接收机位置之间的几何距离; λ, f_i 分别为相应 L_i 载波的波长和频率; N'_3 为无电离层组合中包含初始相位偏差的非整模糊度。

从式中可看出, 观测值无法消除硬件延迟影响。由于 IGS 发布的卫星钟差产品中包含了消电离层组合的卫星硬件延迟 HD_3 的影响, 所以在无电离层组合的 PPP 中采用 IGS 提供的精密钟差不需要考虑卫星的硬件延迟, 而接收机的硬件延迟将被接收机钟差吸收。对于载波相位来说, 非整的初始相位也不能忽视, 它将被无电离层组合的模糊度吸收, 所以无电离层组合的模糊度为一个实数。

假定在历元 i , 测站 r 同时观测到 n 颗卫星, 则观测方程的未知数为 $n + 5$, 联合所有卫星类似于式(1)、(2)的观测方程, 可以得到如下的观测方程

$$y(i) = A(i) \cdot X(i) + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, Q_y) \quad (3)$$

式中

$$y_{2n \times 1}^{(i)} = \begin{bmatrix} P_3(i)^T \\ \Phi_3(i)^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_3(i)_{n \times 1} = [\Delta p_{r,3}^1(i) \quad \dots \quad \Delta p_{r,3}^n(i)] \quad (5)$$

$$\Phi_3(i)_{n \times 1} = [\Delta \Phi_{r,3}^1(i) \quad \dots \quad \Delta \Phi_{r,3}^n(i)] \quad (6)$$

其中, $\Delta p_{r,3}^s(i)$ 、 $\Delta \Phi_{r,3}^s(i)$ 分别表示历元 i 测站 r 至卫星 s 无电离层组合 $O-C$ 的码、相位观测值。

$$A_{2n \times (n+5)}^{(i)} = \begin{bmatrix} B(i) & O \\ B(i) & \Gamma_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_{(n \times 5) \times 1}^{(i)} = \begin{bmatrix} -\mu_r^1(i) & 1 & n f_r^1(i) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\mu_r^n(i) & 1 & n f_r^n(i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$X_{(n+5) \times 1}^{(i)} = [x \quad y \quad z \quad \delta t_R \quad \delta Q_{td} \quad N'_3 \quad \dots \quad N'_3]^T \quad (9)$$

式中, O 为 n 维零矩阵; Γ_3 为 n 维对角元素为 λ_3 的对角阵; $n f_r^n(i)$ 为卫星的对流层延迟的投影函数。 x, y, z 为接收机三维位置参数; δt_R 为接收机钟差参数; δQ_{td} 为测站天顶对流层延迟参数; N'_3

为无电离层组合的模糊度参数, $j = 1, \dots, n$ 表示卫星的个数。

GPS 精密单点定位采用伪距和载波相位两类观测值, 两类观测值的观测精度各不相同。观测值协方差矩阵 Q_0 用于衡量各类观测值的精度及其相关性, 若忽略各类观测值之间的交互相关及时间相关性, 则 Q_0 为对角阵, 对角元可以表示为

$$Q_{ii} = \frac{\sigma_0^2}{\sin^2(E_r^s)} \quad (10)$$

式中, E_r^s 为每颗卫星的高度角; σ_0 为各类观测值的观测精度。

2.2 误差改正与数据预处理

非差观测模型需精确估计三类误差源的影响, 即信号发生源误差、信号接收源误差、信号传播路径误差。这些误差可利用各种精确模型计算改正。

PPP 必须先进行剔除粗差、修正周跳和相位平滑伪距等数据预处理工作, 以得到高质量的非差相位(或伪距)观测值。主要包括 Melbourne-Wübbena 组合观测值, Ionosphere-Free 组合观测值, Geometry-Free 组合观测值等几种清除非差周跳的相位组合方法。

2.3 参数估计

本文 PPP 算法采用扩展卡尔曼滤波模型, 其状态方程可表示为

$$X(i+1) = \Phi_{+1,i} \cdot X(i) + \omega(i), \omega \sim N(0, Q_\omega) \quad (11)$$

$$\Phi_{+1,i} = \begin{bmatrix} P_{3 \times 3} & & & \\ & 0 & & \\ & & 1 & \\ & & & I_{m \times m} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} q_p \cdot \Delta t & & & \\ & q_r \cdot \Delta t & & \\ & & q_z \cdot \Delta t & \\ & & & 0_{m \times m} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $X(i)$ 和 $X(i+1)$ 分别表示相邻历元的状态向量; $\Phi_{+1,i}$ 为对应的状态转移矩阵; ω 为服从正态分布的过程噪声, 其均值和协方差矩阵分别为 0 和 Φ_0 ; Δt 为相邻历元的时间间隔; 式(12)中的 P 矩阵表示位置参数的转移矩阵, 在静态或动态定位的条件下, 其分别为单位阵或零矩阵; 其余矩

阵分别对应于接收机钟差、天顶对流层延迟、以及无电离层模糊度参数的转移矩阵。

采用扩展的卡尔曼滤波技术进行参数估计, 上述各参数的估计策略分别为: 时不变参数(动态观测时描述为白噪声参数)、白噪声参数、模型化为随机游走过程、时不变参数(发生周跳时引入新的模糊度参数)。

3 向量相关距离的 RAIM 算法

描述向量之间的关系一般可以用相似系数和距离来表示^[7], 文献[8]曾引用相似系数进行 GPS 大网平差, 文献[9-10]提出向量相关距离的 RAIM 算法。该方法从最基本的误差方差出发, 构造全设计矩阵, 利用矩阵向量之间的相关系数和相关距离进行粗差的判断和识别。

由向量相关距离 RAIM 算法的 PPP 误差方程

$$V = B \delta x - l \tag{14}$$

经过最小二乘法和 QR 分解, 对 l 向量作线性变换, 则有

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \vdots \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (B^T P B)^{-1} B^T P \\ \vdots \\ T \end{bmatrix} l \tag{15}$$

进一步构造 QR 奇偶向量方程式

$$t = T \varepsilon \tag{16}$$

式中, t 为奇偶向量; T 为奇偶向量产生矩阵; ε 为负残差。

对(16)式进行向量式展开

$$\varepsilon T_1 + \varepsilon T_2 + \dots + \varepsilon T_n = t \tag{17}$$

对(17)式进行矩阵形式的转换, 可以得到全设计矩阵

$$\begin{bmatrix} T_{11} \varepsilon & T_{12} \varepsilon & \dots & T_{1n} \varepsilon & t_1 \\ T_{21} \varepsilon & T_{22} \varepsilon & \dots & T_{2n} \varepsilon & t_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ T_{m1} \varepsilon & T_{m2} \varepsilon & \dots & T_{mn} \varepsilon & t_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{n+1} \end{bmatrix} \tag{18}$$

利用改造的全设计矩阵计算各个向量 a 间的相关系数和相关距离。

全设计矩阵的相关距离采用如下公式

$$d'_{ij}(2) = \left[\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{19}$$

d_{a_i, a_j} 称为 a_i 与 a_j 的相关距离, 反映各个向量之间的相关程度。

在多元统计分析中, 将样品看做 m 维空间的

点, 用点间的距离来表示样品之间的亲疏关系。距离越小, 表明样品之间的关系越密切; 反之, 距离越大, 相似程度越差。在 RAIM 算法中, 亦可以将样品看做 m 维空间的 n 维向量, 用向量间的距离来表示向量之间的亲疏关系。距离越小, 表明向量之间的关系越密切; 反之, 距离越大, 相似程度越差。故此, 可以采用 d_{a_i, a_j} 数值指标, 判别粗差存在于哪个观测值上。

假设当 ε 中含有一个粗差时, 则该列向量 a_i 与最后一列向量 a_{n+1} 的相关距离 $d_{a_i, a_{n+1}}$ 会明显变小, 说明相关性越强, 说明最后一列 a_{n+1} 受到 ε 的影响越大, 则其出现粗差的可能性就越大; 而其他列向量 a_i 与最后一列向量 a_{n+1} 的相关距离 $d_{a_i, a_{n+1}}$ 会变大, 且具有同向性。当 ε 中含有多个粗差时, 相关距离 $d_{a_i, a_{n+1}}$ 的变化规律将表现为来自这些粗差对其影响的叠加。

在粗差分离的过程中, 当 ε 中含有多个粗差时, 由于多个粗差共同作用, 这可能使某个并不含有粗差的 ε 的相关距离出现误判, 从而犯了弃真错误, 这就要求在粗差探测和分离之后, 需要进行反向检查, 以去伪存真。

全设计矩阵的相关系数可以采用如下公式, 该公式表征了各列向量 a_i 之间的相关关系

$$c_{ij}(2) = \frac{\sum_{k=1}^n (a_{ki} - \bar{a}_i)(a_{kj} - \bar{a}_j)}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^n a_{ki} - \bar{a}_i \right)^2 \left(\sum_{k=1}^n a_{kj} - \bar{a}_j \right)^2}} \tag{20}$$

相关系数 RAIM 算法仅作为与相关距离 RAIM 算法的比较使用。

在相关系数的几何解释中, 可以将相关系数理解为矩阵两列数据的夹角, 夹角越小, 则两列的相关性越强, 则两列中的因变量列存在的粗差可能性越大, 当夹角接近于 0 即两列接近平行的时候, 则两列中的因变量列存在的可能性最大, 但若多个数据列出现夹角为 0 的情况, 则会导致粗差的不可区分性问题。在相关距离的几何解释中, 可以理解为平行矩阵两列数据的距离, 当距离越近时, 则粗差的影响越大, 当距离接近于 0 时, 则粗差的可能性最大。

4 基于 PPP 的 RAIM 实例

4.1 PPP 定位数据来源

PPP 计算的数据为河北省 CORS 网络中的

XTNH 站, 数据时间是 2009-08-01 UTC 00: 00-24: 00。该站是静态站, 模拟动态进行数据处理。数据处理采用 IGS 的 15 min 间隔的最终星历和 30 s 间隔的钟差产品, 卫星截止高度角选取为 5° , 对流层先验改正模型为 Saastamoinen 模型, 投影函数选取为 Neill 投影函数; 对流层天顶延迟和视线电离层延迟的过程噪声谱密度分别选取为 $10^{-5} \text{ m}^2/\text{min}$ 和 $10^{-2} \text{ m}^2/\text{min}$ 。

PPP 算法观测值包括三类: 伪距观测值, 载波相位观测值, 虚拟观测值。

PPP 组合观测模型特点是估计参数为 $n+5$ 个, 包括三维坐标参数 3 个、接收机钟差 1 个、对流层天顶延迟湿分量 1 个、L3 的整周模糊度 n 个; 消除了电离层延迟, 放大了观测噪声和多路径效应; 抗差性较好, 数据预处理简单, 只需要探测 L3 上的粗差与周跳; 待估参数较少, 计算速度较快。

由 PPP 数学模型, 观测量为 $(3n+5)$, 待估参数为 $(n+5)$ 个。根据 QR 奇偶检校法, 则 QR 奇偶检校法产生矩阵 T 的维数为 $(2n) \times (3n+5)$ 。

4.2 PPP RAIM 算法算例

根据相关系数 RAIM 算法和相关距离 RAIM 算法, 分别计算全相关系数矩阵和全相关距离矩阵, 矩阵中的互相关系数、距离反映向量之间的相互关系, 最后一列的相关系数、距离反映粗差的位置, 重点考察互相关系数、距离以及最后一列的相关系数、距离。列示的数据为 PPP 数据处理随机抽取的数据, 以含有多个粗差方式进行处理。

相关系数、距离矩阵为 $(3n+6) \times (3n+6)$ 的方阵, 从矩阵的数据来看, 全相关系数数据为离散值, 除了主元为 1 外, 有正有负且不连续, 全相关距离数据为离散值, 除了主元为 0 外, 都为正数。以 surf 软件对数据进行图形方式显示, 便于理解和解释。

图 1 是全相关系数示意图, 横轴为全相关系数矩阵的列数, 纵轴为全相关系数矩阵的行数, 竖轴为全相关系数值, 有正有负, 示意图以提高显示度, 将数值连续作图。为了更加明显的显示系数之间的关系, 对全相关系数取绝对值, 将主元系数变 1 为 0, 形成对全相关系数经过处理的图 2, 横轴为全相关系数矩阵的列数, 纵轴为全相关系数矩阵的行数, 竖轴为取绝对值之后的全相关系数值, 皆为正值。图 3 是相关距离矩阵示意图, 横轴为全相关距离矩阵的列数, 纵轴为全相关距离矩

阵的行数, 竖轴为相关距离值。

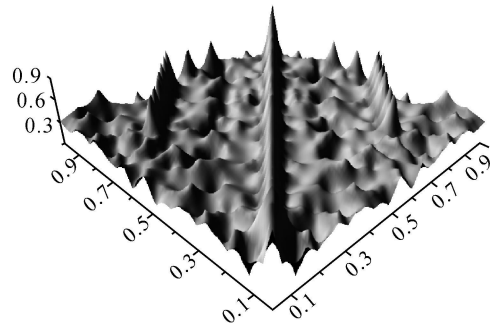


图 1 全相关系数矩阵系数示意图

Fig. 1 Matrix coefficient of total correlation coefficient

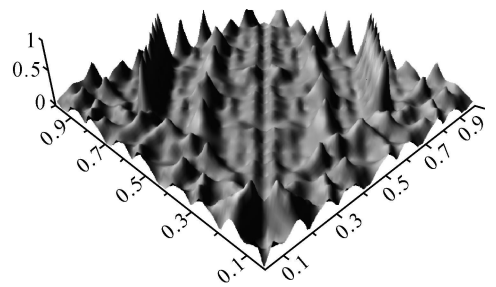


图 2 全相关系数矩阵系数示意图(处理图, 系数取绝对值, 主元系数变 1 为 0)

Fig. 2 Matrix coefficient of total correlation coefficient (processed result, main diagonal elements changed into 0 from 1)

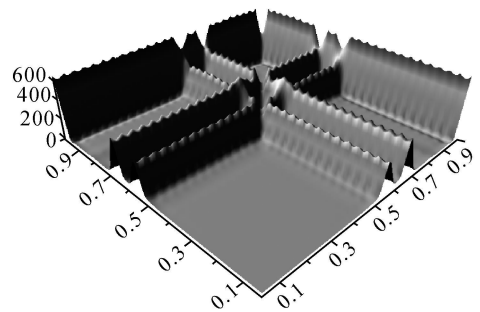


图 3 相关距离矩阵系数示意图

Fig. 3 Matrix coefficient of correlation distance

从相关系数矩阵示意图可以看到, 由于向量之间的相关性, 无法识别多个粗差。

从相关距离矩阵示意图可以看到, 第 15 个位置与第 18 个位置是最小的, 反映了第 15 个观测量与第 18 个观测量可能含有粗差, 应予剔除。

5 结论

基于 PPP 数学模型, 根据 PPP 不同观测类

型, 对 PPP 数学模型引入 QR 奇偶检校法, 并根据多元统计分析中的向量相关距离和相关系数, 构造 QR 全系数、距离矩阵, 进行 PPP RAIM 算法的研究和应用。结合河北省 CORS 网络数据的 PPP, 进一步证明全系数矩阵法由于自身数据相关的原因, 无法准确的探测和识别多个粗差; 而相关距离法克服了数据相关的缺点, 明确无误的显示粗差与观测值之间的相关关系, 可以进行多维粗差的探测和识别。

参考文献:

- [1] YE Shirong. Theory and Its Realization of GPS Precise Point Positioning Using Upr differenced Phase Observation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. (叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2002.)
- [2] LI Wei. GPS Precise Point Positioning Algorithms: Implementation and Performances [D]. Beijing: Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2010. (李玮. GPS 精密单点定位算法研究与软件实现 [D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2010.)
- [3] PARKINSON B W, SPILKER J, ENGE P. Global Positioning System: Theory and Applications [M]. Washington DC: AIAA, 1996.
- [4] LIU Jingnan, CHEN Junyong, ZHANG Yanping, et al. Principles and Methods of WADGPS [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999. (刘经南, 陈俊勇, 张燕平, 等. 广域差分 GPS 原理和方法 [M]. 北京: 测绘出版社, 1999.)
- [5] LI Deren. Error Processing and Reliability Theory [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1988. (李德仁. 误差处理和可靠性理论 [M]. 北京: 测绘出版社, 1988.)
- [6] SHI Jinfeng, LIU Guangzong. Modern Error Theory and Data Processing [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994. (石金峰, 刘光宗. 近代误差理论与数据处理 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994)
- [7] ZHANG Xianda. Matrix Analysis and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (张贤达. 矩阵分析与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.)
- [8] SHI Chuang. Large Scale GPS Network Adjustment and Analysis Theory and Its Application [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2002. (施闯. 大规模高精度 GPS 网平差处理与分析理论及其应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2002.)
- [9] BI Jinzhong. GNSS Integrity Monitoring Method, Technology and Application [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. (秘金钟. GNSS 完备性监测方法、技术与应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2010.)
- [10] BI Jinzhong, GU Shouzhou, FANG Shushan. A New RAIM Method Based on Vector Correlation Distance [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica, 2010(5): 638-643. (秘金钟, 谷守周, 方书山. 基于向量相关距离的新型 RAIM 算法研究 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010(5): 638-643.)

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2011-01-31

修回日期: 2011-03-22

第一作者简介: 秘金钟(1975—), 男, 博士, 主要从事卫星导航方面的研究。

First author: BI Jinzhong(1975—), male, PhD, majors in satellite navigation technology.

E mail: goldheal@casm.ac.cn