

GPS 单频精密单点定位的研究实现

涂 锐, 黄观文, 凌 晴

(长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054)

【摘 要】 本文研究建立了电离层参数估计的单频精密单点定位的数学模型, 并综合考虑各项误差模型改正, 运用卡尔曼滤波算法, 开发了单频精密单点定位程序, 最后利用实测数据进行实验。实验结果表明: 静态平面、高程方向精度均优于 0.15m, 动态精度优于 0.3m。

【关键词】 精密单点定位; 单频; 电离层延迟; 参数估计

【中图分类号】 P228.4

【文献标识码】 A

【文章编号】 1009-2307(2011) 03-0068-03

1 引言

精密单点定位技术(Precise Point Positioning, 简称 PPP) 因为其成本低、作业效率高、厘米级定位精度等优点, 成为当今的一个研究热点, 并广泛应用于科学卫星精密定轨、大范围的科学考察、国土资源大调查等方面^[1]。目前, 的研究主要是双频观测值, 并实现了静态毫米-厘米、动态厘米-分米的定位精度。使用廉价的单频接收机来实现高精度单点定位是许多导航定位用户的需求。国内外已有不少人进行了 GPS 单频的研究工作。在国外, 加拿大的 New Brunswick 大学的 Tomas Beran 等学者, 在其滤波模型和接收机钟差模型的基础上, 分别讨论了伪距和载波相位模型的状态方程和观测方程, 提出了相应的状态向量和参数矩阵, 论证了用非线性卡尔曼滤波处理单频达到了米级精度(2003)。加拿大卡里加里大学的 GaoYang 教授采用码和载波的无电离层组合, 在快速固定模糊度的基础上, 论证了实时单频的精度达到了米级。在国内, 武汉大学的张小红教授采用相位/伪距半合合法消除了电离层延迟, 在周跳探测中只探测不修复, 通过增加周跳参数进行解决, 参数估计采用改进的最小二乘, 可以实现单天静态平面与高程方向均达到 cm 级, 动态平面精度为 0.2~0.3m, 高程 0.5m 的单频实验结果(2008)^[2]。海军大连舰艇学院的王双喜利用码和载波的组合消电离层, 在低动态情况下, 通过相邻历元求差, 消除了模糊度, 采用非线性滤波估计模型, 其单频动态定位精度也达到了米级(2006)^[3]。

本文在已有的精密单点定位软件平台 P3TEXT 的基础上, 建立电离层参数估计的单频精密单点定位的数学模型, 综合考虑各项误差改正, 采用卡尔曼滤波算法, 进行了程序实现, 并分别对静态和动态数据进行了实验, 取得了静态平面、高程方向均优于 0.15m, 动态优于 0.3m 的精度。

2 单频精密单点定位的数学模型

2.1 单频精密单点定位观测方程

$$C_1 = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + T_{DCB} + d_{orb} + d_{trop} + d_{ion} + d_{rel} + \varepsilon(C_1)$$

$$\Phi_1 = \rho_r^s + c \cdot (dt_r - dt^s) + d_{orb} + d_{trop} - d_{ion} + d_{rel} + \lambda_1 \cdot N_1 + \varepsilon(\Phi_1)$$

(1)



作者简介: 涂锐(1985-), 男, 硕士, 主要从事 GPS 数据处理方面研究工作。
E-mail: turui-2004@126.com

收稿日期: 2009-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40902081, 40774001, 40841021); 国家 863 项目(2007AA12Z331)

其中: C_1 为 C/A 码伪距观测值; Φ_1 为 L1 相位观测值; ρ_r^s 为站星几何距离; c 为光速; dt_r 为接收机钟差; dt^s 为卫星钟差; T_{DCB} 为硬件延迟; d_{orb} 为轨道误差; d_{ion} 为电离层误差; d_{rel} 为相对论效应; λ_1 为 L1 载波波长; N_1 为模糊度; $\varepsilon(C_1)$ 与 $\varepsilon(\Phi_1)$ 为观测噪声。

采用 IGS 站精密星历和精密钟差产品计算卫星位置和卫星钟差, 可舍去式中的 dt_r 、 dt^s , 硬件延迟由 IGS 站提供的 DCB 进行改正; 对流层延迟和相对论效应等采用模型改正, 电离层采用参数估计, 上方方程可简化为:

$$C_1 = \rho_r^s + c \cdot dt_r + F \cdot d_{ion}^{zenith} + \varepsilon(C_1)$$

$$\Phi_1 = \rho_r^s + c \cdot dt_r - F \cdot d_{ion}^{zenith} + \lambda_1 \cdot N_1 + \varepsilon(\Phi_1) \quad (2)$$

其中 F 为电离层映射函数, d_{ion}^{zenith} 为天顶方向电离层延迟参数。

2.2 数据准备与预处理

将采集的观测数据采用开窗法进行粗差剔除, 并对钟差数据进行质检, 将 IGS 站下载的精密星历和精密钟差采用拉格朗日内插得到 30s 间隔的钟差和星历数据。单频中周跳探测与修复的好坏将直接影响定位精度。而单频接收机只能接收伪距观测值、单频载波观测值和多普勒观测值, 常用的无电离层组合法、电离层残差法、TurboEdit 方法等都无法使用, 本文综合使用改进的多项式拟合法和载波相位变化率法探测周跳, 并采用切比雪夫多项式拟合法确定周跳大小进行修复。

2.3 误差源消除

2.3.1 电离层延迟改正

电离层延迟误差是单频最主要的误差源之一, 并且无法通过双频观测值进行消除。当前, 解决单频精密单点定位中电离层延迟的方法有半合模型改正、单层模型改正、Klobuchar 模型改正、格网模型改正法等^[4]。由于影响电离层的因素很多, 许多因素又带有较大的随意性, 我们对各因素的相互关系、变化规律及其内部机制不清楚, 从而使电离层延迟中产生了很多不规则的变化, 利用这些模型得到的电离层延迟的精度都不太理想。基于上述情况, 本文提出一种将电离层延迟作为参数估计的方法, 引入了三个电离层参数, 相应的观测方程为:

$$C_1 = \rho_r^s + c \cdot dt_r + ((1 + \sin\varphi^*) J_1 + \cos\varphi^* \cdot \cos\lambda^* \cdot C_{11} + \cos\varphi^* \cdot \sin\lambda^* \cdot S_{11}) + \varepsilon(C_1)$$

(3)

$$\Phi_1 = \rho_r^s + c \cdot dt_r - ((1 + \sin\varphi^*) J_1 + \cos\varphi^* \cdot \cos\lambda^* \cdot C_{11} + \cos\varphi^* \cdot \sin\lambda^* \cdot S_{11}) + \lambda_1 \cdot N_1 + \varepsilon(\Phi_1)$$

(4)

其中, φ^* 、 λ^* 分别代表太阳共轭坐标系中足下点的经度和纬度, J_1 、 C_{11} 、 S_{11} 为引入的估计电离层延迟的 3 个未知参数。

2.3.2 DCB 硬件延迟改正

由于 IGS 发布的精密钟差产品是利用无电离层组合得到的, 对于单频用户, 为了正确使用精密钟差产品, 必须

在卫星钟差上加上硬件延迟改正^[5]。GPS 卫星的硬件延迟偏差既可以采用广播星历中的 T_{CD} 改正, 本文通过 IGS 提供的 DCB 文件进行改正:

$$\Delta t = m \cdot B_{p1-p2} + n \cdot B_{p1-C1}$$

(5)

IGS 一般提供两种 GPS 硬件延迟偏差: B_{p1-C1} 和 B_{p1-p2} 。根据不同的 GPS 信号, 具体的改正数如表 1 所示。

CODE 分析中心每月生成 2 个 DCB 文件: P1P2yymm.DCB、P1C1yymm.DCB, 且为了满足实时用户的需要, 提供每天的预报。表 1 单频的 GPS 硬件延迟改正 DCB 产品。

2.3.3 其他改正

卫星轨道和钟差	P1	$+1.546 \cdot B_{p1-p2}$
采用 IGS 精密星历和钟差, 其影响可以忽略, 对流层延迟、相对论效应、地球自转、天线相位中心改正、固体潮、海洋潮、引力延迟等误差与双频 PPP 一样, 都采用相应的模型改正。	C1	$+1.546 \cdot B_{p1-p2} + B_{p1-C1}$

3 解算步骤与实现过程

3.1 估计参数

单频 PPP 中, 所估计的参数主要包括 4 个测站参数 (3 个位置参数、1 个接收机钟差), 电离层参数 N_{ion} (本文中电离层参数 $N_{ion} = 3$) 和模糊度参数 N_{amb} ($N_{amb} > 4$)。总的待估参数 S 可用下式表述:

$$S = 4Ck + N_{ion} + N_{amb}$$

(6)

对于静态定位, $k = 1$, 对于动态定位, 由于接收机钟差和位置每个历元都在变化, k 为有效历元数。

3.2 平差计算

目前, 对于后处理的参数估计, 主要有最小二乘和卡尔曼滤波。滤波算法能很好的继承上一历元的信息, 提高收敛效率, 尤其对动态数据更有效。文中采用三次正反卡尔曼滤波算法, 考虑到滤波初值确定不合理容易造成发散, 定位结果会严重偏离真值。因此, 在数据计算时, 依据观测值的质量因子, 确定观测值的方差-协方差, 采用卫星高度角定权的方法。

3.3 解算流程

单频的解算过程如下: 输入观测文件、硬件延迟文件、精密星历和精密钟差, 进行数据预处理, 误差消除后, 解算位置参数, 同时解算非差模糊度、接收机钟差、电离层参数, 其解算流程如图 1。

```
graph TD
    Rinex[Rinex文件  
(单频伪距、相位观测值)] --> PreProc[观测数据预处理]
    Sp3[Sp3文件  
(精密星历、精密钟差)] --> Interp[内插轨道和钟差]
    PreProc --> ModelCorr[各项模型改正]
    Interp --> ModelCorr
    ModelCorr --> ParamEst[参数估计  
测站坐标、接收机钟差、  
电离层延迟、模糊度]
```

图 1 单频 PPP 流程图

4 算例分析

4.1 静态实验

选用西安市地裂缝与地面沉降一对观测点 (XJ03、XJ04) 2009 年 6 月 20 日年积日第 171 天的数据 (XJ031711.09°和 XJ041711.09°), 并下载相应的精密星历和精密钟差文件 (igs15366.sp3、igs15366.clk)。实验中, 将多期实测的地裂缝数据用 Gamit 软件解算基线, 并用长安大学空间信息研究所自主研发的 GPS 网平差软件 HGPS-ADJ 平差得到各点 WGS84 坐标 (点位水平方向精度优于 $\pm 5\text{mm}$, 垂直方向精度优于 $\pm 10\text{mm}$), 视为坐标正值, 将自己研发的单频软件计算结果与两个实验观测点坐标真值进行比较, 得到 X 、 Y 、 Z 三个方向收敛后的坐标残差如图 2 以及精度统计如表 2。

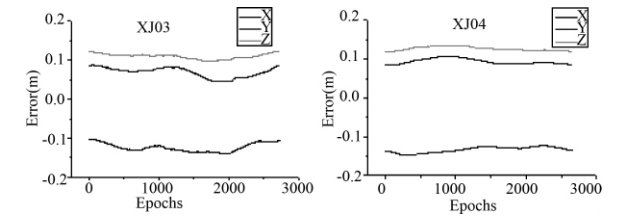


图 2 XJ03 站、XJ04 站 X 、 Y 、 Z 方向坐标残差 (单位: m)

表 2 XJ03 站、XJ04 站 X 、 Y 、 Z 方向与真值比较残差的均值和 RMS 值 (单位: m)

点名	Mean(X)	RMS(X)	Mean(Y)	RMS(Y)	Mean(Z)	RMS(Z)
XJ03	-0.1230	0.1239	0.0688	0.0701	0.1093	0.1099
XJ04	-0.1044	0.1043	0.0885	0.0884	0.1341	0.1336

从图 2 可以看出, 2 个站 3 个方向都较准确的逼近真值, 残差均不超过 0.15m; 从表 2 中还可以看出, XJ03 站与 XJ04 站 X 、 Y 、 Z 方向与坐标真值的最大偏差也都在 0.15m 之内。

4.2 动态实验

观测数据选用机载航空测量数据 (rover.0508o), 数据采样时间为 2005 年 5 月 12 日, 采用率为 1s, 时间长度为 4h17min, 并下载相应的精密星历和精密钟差文件 (Igs13224.sp3、Igs13224.clk), 飞机的飞行轨迹如图 4, 实验时只提取单频观测值。由于无法准确获取载体在其运动轨迹上每个历元的真实位置, 采用 GrafNav 软件对机载双频观测值进行差分解算, 得到载体在各历元的高精度事后双差动态解 (厘米级), 并视作真值。将自己开发的单频软件计算结果与双差结果进行比较, 得到 X 、 Y 、 Z 三个方向的收敛过程如图 5 以及精度统计如表 3。

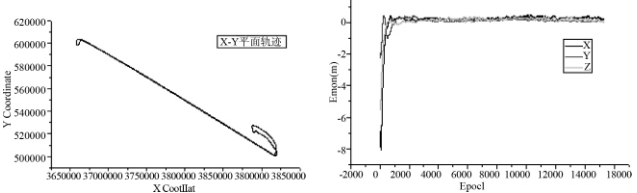


图 3 飞机运动平面轨迹图 图 4 X 、 Y 、 Z 方向坐标残差图

从图 3 飞机运动轨迹可以看出, 飞机刚开始处于盘绕滑行阶段, 后直线运动, 最后又盘绕停下。从坐标残差图 4 看出, 3 个方向都很快收敛于真值, 说明卡尔曼滤波对动态数据更有效。在表 3 中, X 、 Y 、 Z 方向的均值偏差和中误差均优于 0.3m 的精度。

表 3 X 、 Y 、 Z 方向与真值比较残差的均值和 RMS 值 (单位: m)			
类型	X	Y	Z
均值	0.273	0.147	0.182
RMS	0.281	0.168	0.204

5 结束语

本文采用电离层参数估计和误差模型改正方法, 采用卡尔曼滤波算法, 实现了单频精密单点定位程序开发。并结合实测数据进行实验分析, 结果表明: 事后静态单频精密单点定位在平面和高程方向均优于 0.15m, 动态优于 0.3m。文中周跳探测只能探测到 3 周以上周跳, 小周跳的处理仍需要进一步研究, 电离层参数估计选取什么样的映射函数最合理也是需要再作探讨的问题。

(下转第 72 页)

- 2010, 1(3): 257-270.
- [6] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [G] //IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1980, 2(2): 165-168.
- [7] Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity [G] //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1990, 28(6): 992-1000.
- [8] Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity [C] //IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1990, 28(6): 992-1000.
- [9] Kuan D T, Sawchu K A A, Strand T C, et al. Adaptive Restoration of Images with Speckle [G] //IEEE Trans. Assp, 1987, 35(3): 373-383.
- [10] 曹云刚, 严丽娟, 郑泽忠. 一种基于图像边缘特征的 SAR 斑点滤波算法. 测绘科学, 2010, 35(3).
- [11] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [G] //IEEE Trans Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [12] Cunha A L, Zhou J, and Do M N. The nonsubsampling contourlet transform: Theory, design, and applications [G] //IEEE Trans. Img. Proc. submitted. 2005.
- [13] Da Cunha A L, Zhou J, and DO M N. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications [G] //IEEE Transactions on Image Processing. 2006, 15(10): 3089-3101.
- [14] Li S, Li Z, and Gong J. Multivariate statistical analysis of measures for assessing the quality of image fusion [J]. International Journal of Image and Data Fusion, 2010, 1(1): 47-66.
- [15] 宋建社, 郑永安, 袁礼海. 合成孔径雷达图像理解与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008, 53-57.

Fusion and speckle reduction of multi-polarization SAR images based on nonsubsampling Contourlet transform

Abstract: Nonsubsampling Contourlet Transform (NSCT) is a newly improved multiresolution geometry analysis technique based on Contourlet Transform. NSCT can represent images more effectively because of its flexible multi-resolution, multi-direction and shift invariance, and has been approved to be very suitable for noisy images, such as SAR images. A method of fusing and reducing the speckles of multi-polarization SAR images based on NSCT was proposed in the paper. The images were firstly decomposed by NSCT, and then different fusion rules of decomposed coefficients were chosen with the consideration of denoising and information enhancing. Finally, the fused NSCT coefficients were reconstructed to obtain fusion result. In this paper, HH and VV co-polarization images were fused using the proposed method, and the entropy, correlation coefficient and Equivalent Number of Looks (ENL) were calculated to evaluate the results. Experiments showed that the proposed algorithm could obtain a good fused image with the improved spatial information, at the same time the speckle noises could be reduced to some extent.

Key words: Multi-polarization SAR image; fusion; NSCT; speckle reduction

SUN Xiao-xia^①, ZHANG Ji-xian^②, YAN Qin^② (① China University of Mining and Technology, Jiangsu 221116, China; ② Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China)

(上接第 69 页)

参考文献

- [1] 黄观文. GPS 精密单点定位和高精度 GPS 基线网平差研究及软件实现 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [2] 张小红, 李星星, 郭斐, 等. GPS 单频精密单点定位软件实现与精度分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, (8): 783-787.
- [3] 邵贺. 单频 GPS 精密单点定位方法与实践 [D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [4] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型 [M]. 北京: 测绘出版社, 1998.
- [5] 许承权. 单频 GPS 精密单点定位算法研究与程序实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2008.
- [6] 张勤, 李家权. GPS 测量原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 王双喜. 基于非线性滤波的单频 GPS 精密单点动态定位 [J]. 测绘通报, 2006, (3): 4-7.
- [8] 祁芳. 卡尔曼滤波算法在 GPS 非差相位精密单点定位中的应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2003.
- [9] 黄观文. GPS 精密单点定位和高精度 GPS 基线网平差研究及软件实现 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [10] 韩保民. 基于 GPS 非差观测值进行精密单点定位研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, (8).
- [11] 邵贺, 张小红, 等. GPS 单频精密单点定位方法与实践 [J]. 测绘信息与工程, 2008, (3): 1-3.
- [12] 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.
- [13] 郝明. 加速 GPS 精密单点定位收敛的方法研究 [D]. 武汉: 中科院测量与地球物理研究所, 2007.
- [14] Kouba J, Heroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products [J]. GPS Solutions, 2001, 5(2).
- [15] Gao Y, Shen X. Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning [C] // ION GPS 2001, Salt Lake City, USA, 2001.
- [16] Le A Q, Tiberius C. Single-frequency Precise Point Positioning with Optimal Filtering [J]. GPS Solutions, 2007, 11(11): 61-69.

Precise point positioning of GPS single frequency

Abstract: An optimal mathematic model of single-frequency precise point positioning was built based on the estimation of ionosphere parameter in the paper. Then after considering all the observation error corrections, the author developed a calculating procedures of single-frequency precise point positioning via Kalman Filtering method. And experiments were done by the real data at last. The results showed that the accuracies about horizontal position and vertical position were both superior to 0.15m, and the dynamic accuracy was superior to 0.3m.

Key words: precise point positioning; single frequency; ionospheric delay; parameter estimation

TU Rui, HUANG Guan-wen, LING Qing (College of Geology Engineering and Geomatics Chang'an University, Xi'an 710054, China)