

星载 GPS 载波相位测量的周跳探测方法研究

王甫红¹ 刘基余¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 提出了一种基于粗差探测理论的星载 GPS 载波相位数据周跳的探测方法, 并编制了相关软件对 CHAMP 星载 GPS 测量数据进行了验算。结果表明, 当跟踪的有效 GPS 卫星多于 5 颗时, 能够探测出所有的周跳。

关键词: 低轨卫星; 星载 GPS 载波相位测量; 整周跳变; 粗差探测理论
中图法分类号: P228.42

目前, 一些用于地球重力场和大气等科学研究的低轨卫星都采用星载 GPS 信号接收机进行精密定轨^[1,2]。当用星载 GPS 载波相位数据解算低轨卫星(LEO)的精密轨道时, 必须探测是否存在整周跳变。只有确保星载 GPS 载波相位数据的高质量, 方可实现 cm 级定轨。

LEO 以每秒数公里的速度在电离层中间绕地球运行, 和地面站 GPS 测量相比, LEO 主要有以下不同: ① GPS 卫星几何图形变化快, GPS 卫星一次通过仅需 30min; ② 电离层中电子含量的变化大, 但不受对流层折射的影响。这将导致一些传统的周跳探测法(TurboEdit 法^[3]、电离层残差法^[4,5]等)不能有效地应用于星载 GPS 数据编辑。Bae 等研究表明^[6], 传统方法的探测成功率低于 50%。

1 VAREC 的数学模型

采用星载 GPS 双频载波相位 L_1, L_2 的无电离层折射影响的组合 L_c 作为观测量, 对同一颗 GPS 卫星相邻时元 (t_1, t_2) 的 L_c 求差得:

$$L_c(t_2) - L_c(t_1) = \rho(t_2) - \rho(t_1) + C \delta T_{LEO}(t_1, t_2) - C \delta \hat{\alpha}(t_1, t_2) + \Delta N(t_1, t_2) + \epsilon \quad (1)$$

式中, $\rho(t_1)$ 和 $\rho(t_2)$ 分别是 t_1, t_2 时刻的站星几何距离; $\delta T_{LEO}(t_1, t_2)$ 是星载 GPS 接收机钟差变化量, 为待求量; $\delta \hat{\alpha}(t_1, t_2)$ 是 GPS 卫星钟差变化量, 由精密卫星钟差求出; C 为真空中的光速; $\Delta N(t_1, t_2)$ 是以 m 为单位的周跳值; ϵ 为观测噪声。

t_1 时刻的 LEO 位置 (X_1, Y_1, Z_1) 为已知, 或者

可以用伪距单点定位求解。假设时元间 LEO 位置变化量为 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$, 则 t_2 时刻的 LEO 位置为 $(X_1 + \Delta X, Y_1 + \Delta Y, Z_1 + \Delta Z)$ 。将式(1)线性化, 且不考虑周跳项得:

$$l = AX + \Delta \\ D(l) = \sigma_0^2 P^{-1} \quad (2)$$

式中, A 为设计矩阵; $X = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \delta T_{LEO}(t_1, t_2)]^T$; l 为观测向量减去其计算值; Δ 为真误差(含周跳值)。用最小二乘原理求解 X 和残差平方和 $V^T P V$ 。

Tibenius 等人用多种数学工具和方法分析 GPS 伪距和载波相位数据的概率分布, 结果表明, 正态概率密度函数是描述 GPS 测量数据分布的合理模型^[7]。根据该结论, 在不考虑周跳的情况下, 用 χ^2 分布检验上述模型的正确性, 即在 t_1, t_2 时元间的所有观测卫星均没有发生周跳, 则 $V^T P V$ 满足自由度为 $(n-4)$ 的中心化 χ^2 分布; 否则, 满足非中心化的 χ^2 分布, 其中, n 为该时元的 GPS 卫星数。以

$$\chi^2(n-4) = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \quad (3)$$

作为统计量, 用来检验原假设和备选假设:

$$H_0: \chi^2(n-4) \leq \chi_{\alpha}^2, H_1: \chi^2(n-4) > \chi_{\alpha}^2$$

若上述假设检验接受原假设, 说明该时元数据不含粗差; 否则, 该时元数据中存在粗差。

2 定位含粗差的卫星数据

根据 χ^2 分布假设检验结果, 若判定该时元的

数据中含有粗差, 必须确定哪颗卫星的数据中含有粗差。最小二乘平差中残差 V 和真误差 Δ 满足 $V = -(Q_{PP})^{-1} \Delta$, 矩阵 $(Q_{PP})^{-1}$ 常称为平差的几何条件^[8]。因为 Q_{PP} 是幂等矩阵, 不能根据残差来反算出真误差。如何从解算残差 V 中对粗差观测值进行定位, 巴尔达提出了数据探测法, 但其前提是只存在一个粗差。本文依据巴尔达的数据探测法进行搜索并定位粗差。具体计算步骤如下。

1) 根据式 (1) 列出观测方程, 并进行线性化和迭代计算。

2) 对计算结果进行 χ^2 分布检验, 若检验接受原假设, 表明不含粗差, 计算结束。

3) 若接受备选假设, 表明有观测数据存在粗差, 计算每颗卫星的 $w_i = \frac{|V_i|}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{VV_{ii}}}}$, 并按大小排序得 w_1, w_2, \dots, w_n 。

4) 把 w_1 的卫星标记为剔除, 返回到步骤 1) 和步骤 2) 重新计算。若仍不接受原假设, 表明该卫星数据不含粗差或者多于 1 颗卫星数据含粗差。取消 w_1 的卫星剔除标记, 对 w_2 的卫星作剔除标记, 重新计算, 直至找出含粗差的卫星。以上为只含一个粗差的定位。

5) 如果在一个时元有多个卫星含有粗差, 必须一次将两颗或多颗卫星标记为剔除, 重新计算直至 χ^2 分布检验接受原假设。

如果在计算中, 首先用 TurboEdit 方法剔除含大周跳的卫星数据, 然后再使用本文的搜索方法,

计算效率会大幅度提高。

3 星载 GPS 数据处理结果及分析

本文对 2002 年 3 月 20 日的 CHAMP 星载 GPS 数据进行了处理。先用 TurboEdit 方法剔除出现大周跳的卫星, 再用 VAREC 法进行探测, 结果见表 1。可以看出, 星载 GPS 数据出现周跳的时元约为 23%。经 TurboEdit 方法探测以后, 同一时元有多颗卫星发生周跳的比例很小, 只出现 12 例, 说明用本文的搜索方法较易进行粗差定位, 且计算量不会有较大增加。

表 1 周跳探测结果

Tab. 1 Results of Cycle Slip Detection

探测方法	TurboEdit	TurboEdit+VAREC
周跳的时元总数	1 193	1 915
周跳总数	1 279	2 013
有效的时元总数	8 277	8 277

经粗差探测和剔除之后, 计算 CHAMP 卫星在时元间的轨道变化量, 并与 GFZ 的 ISO 轨道的时元间变化量进行比较。仅用 TurboEdit 方法计算得到的轨道变化量差值大多在 $\pm 1\text{m}$ 以内, 而用 TurboEdit+VAREC 法, 差值大多在 $\pm 0.2\text{m}$ 以内(图 1), 其中部分时元大于 0.2m , 大多集中在 Z 方向, 主要是由 GPS 卫星数少或 GDOP 值较大(图 2)引起的。图 1(b)中, X、Y 和 Z 方向的 1d RMS 分别为 4.06cm、3.84cm 和 7.41cm。

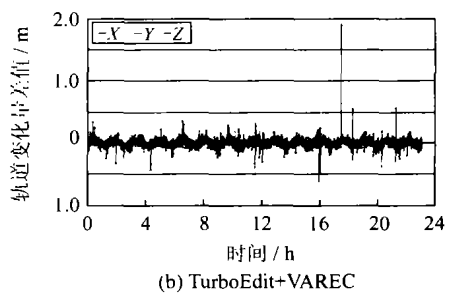
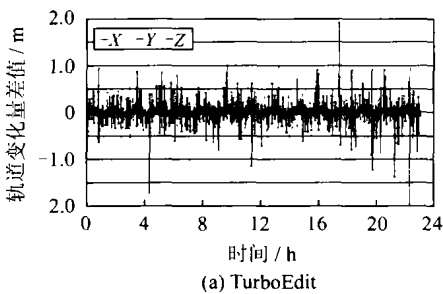


图 1 轨道变化量比较

Fig. 1 Comparison Between Orbit Differences

由粗差探测的可靠性可知, 若仅观测到 4 颗 GPS 卫星, 其可靠性为 0, 无法进行粗差探测。对于 5 颗卫星, 可以探测到粗差, 但无法进行粗差定位。文中所用数据经 TurboEdit 方法探测后, 仅有 306 个时元少于 6 颗卫星, 约占时元总数的 3.7%。

VAREC 法仅使用载波相位观测值, 避免伪距测量噪声和多路径效应的干扰, 从而提高了周

跳探测的有效性。IGS 发布的精密星历(精度优于 5cm)和精密卫星钟差(优于 0.1ns , 约 3cm)的精度^[9]远低于周跳引起的粗差值。假如 L_1 载波相位周跳为 1 周, 相应的 L_C 产生 0.484m 的粗差; 对于 L_2 来说, 则有 0.377m 的粗差存在; 对于一些双频周跳满足 $77\Delta N_{L_1} - 60\Delta N_{L_2} \rightarrow 0$, VAREC 法将会失败, 但 TurboEdit 法能够正常工作。因此, 两者结合使用, 探测的成功率将显著提高。

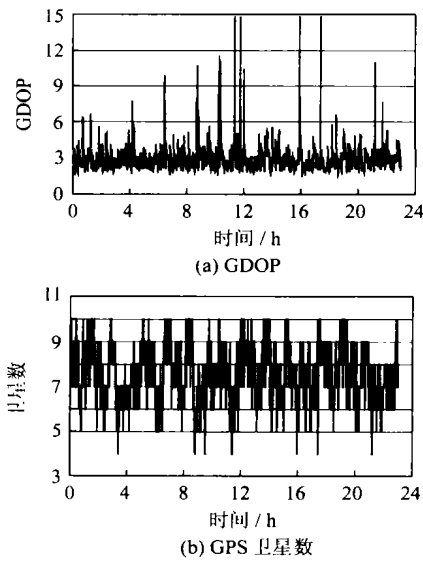


图2 GDOP和GPS卫星数

Fig. 2 GDOP and Number of GPS Satellites

4 结语

用星载GPS测量数据实施cm级精度的定轨,载波相位数据的质量是关键问题之一。使用时元间载波相位变化残差法,并结合传统探测方法,若同时观测到的GPS卫星数超过5颗,可以探测出所有粗差,并可解算出高精度的时元间LEO的位置变化量,用于后续的轨道确定中。

从CHAMP数据处理结果可知,用星载GPS载波相位数据进行几何法定轨,只要消除含粗差

A New Algorithm Detecting Cycle Slips in Satellite-Borne GPS Carrier Phase Measurements for Precise Orbit Determination

WANG Fuhong¹ LIU Jiyu¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: According to outlier detection theory this, paper proposes a new algorithm using the positioning domain to detect the cycle slip in satellite-borne GPS carrier phase measurements, which is defined as varying residual in epoch-by-epoch carrier phase measurements (VA REC). The results indicate that the algorithm can detect all outliers provided by more than 5 GPS satellites tracked by the satellite-borne receiver simultaneously.

Key word: low earth orbiter; satellite-borne GPS carrier phase measurement; cycle slip; outlier detection theory

数据的影响,准确估计整周模糊度,可以实现cm级的定轨精度。

参 考 文 献

- 1 GFZ Potsdam, Department 1. The CHAMP Mission. <http://op.gfz-potsdam.de/champ/index-CHAMP.html>, 2003
- 2 ESA. IGS LEO Homepage. <http://nng.esoc.esa.de/gps/igsleo.html>, 2003
- 3 Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199~202
- 4 陈小明. 高精度GPS动态定位的理论与实践:[博士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1997
- 5 刘基余. GPS卫星导航定位原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003. 296~306
- 6 Bae T S, Kwon J H, Grejner B, Bzezinska D A. Data Screening and Quality Analysis for Kinematic Orbit Determination of CHAMP Satellite. ION Technical Meeting, San Diego, 2002
- 7 Tiberius C, Boire K. Are GPS Data Normally Distributed? I-UGG Congress, Birmingham UK, 1999
- 8 李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论. 武汉: 武汉大学出版社, 2002
- 9 IGS Central Bureau. IGS Products. <http://igsch.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, 2003

第一作者简介: 王甫红, 博士生。现主要从事GPS卫星导航和卫星应用的研究和教学工作。

E-mail: fhwang@sgg.wtusm.edu.cn

About the first author: WANG Fuhong, Ph. D candidate, majors in GPS navigation and satellite application.

E-mail: fhwang@sgg.wtusm.edu.cn

(责任编辑: 涓涓)