

# 单频 GPS 相位观测值周跳探测方法研究

孙 冲, 兰孝奇, 丁文圣

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 周跳探测是单频精密单点定位的主要技术难点之一, 为了寻找有效的探测周跳方法, 分析了三种单频周跳的探测方法, 利用 IGS 站提供的观测文件, 人为加入不同周数的周跳, 通过自编软件, 利用不同周跳探测方法对其进行周跳探测, 并对结果进行比较与分析, 实验结果表明, 多项式法与其他两种方法相比探测能力更强, 可以综合利用三种方法进行周跳探测。

**关键词:** GPS; 周跳; 多普勒; 多项式拟合

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)01—0155—03

## Research on Cycle Slip Detection and Correction of Single-frequency GPS

SUN Chong, LAN Xiao-qi, DING Wen-sheng

(College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** The cycle slip detection is one of the main technical difficulties of single-frequency precise point positioning. In order to find the effective detection method of the cycle slip, three single-frequency cycle slip detection methods are analyzed here. These three different methods are compared and analyzed by adding cycle slips into the data set from IGS tracking station without cycle slips and using the self-developed software. The results of the experiment computations indicate that the detectivity of polynomial fitting is stronger compared with the other two methods, and these three methods could be comprehensively used for cycle slip detection.

**Keywords:** GPS; cycle slip; Doppler integration; polynomial fitting

在接收机进行连续的载波相位测量过程中, 由于某种原因而导致整周计数发生错误, 就会使相位观测值出现一个整数周的跳跃, 但不足一周的部分仍然正常<sup>[1]</sup>。对原始的观测数据进行周跳探测与修复是精密单点定位数据处理的第一步。对于双频 GPS 观测值, 常用的周跳修复方法有: M-W 组合探测法, 电离层残差法, TurboEdit 周跳探测方法等<sup>[2]</sup>。对于单频 GPS 数据, 可以利用的观测数据只有单频相位、伪距以及多普勒观测值, 无法利用探测能力较好的双频周跳探测方法, 相对来说, 单频 GPS 数据周跳更难修复, 一般常用的周跳修复方法有: 伪距/载波组合法, 多项式拟合法, 多普勒法。

差、多路径误差、量测噪声之外, 其余误差对伪距和载波相位测量的影响是相同的, 所以可以用接收机接受到的这两种观测数据的组合来探测周跳。伪距和载波相位测量的观测方程可表示如下:

$$P = \rho + v_p^{ion} + v_p^m + \epsilon_p \quad (1)$$

$$\lambda\varphi = \rho + v_\varphi^{ion} + \lambda N + v_\varphi^m + \epsilon_\varphi \quad (2)$$

式中:  $P$  为伪距观测值;  $\varphi$  为载波相位观测值;  $\lambda$  为载波波长;  $N$  为模糊度;  $v_p^{ion}$ 、 $v_\varphi^{ion}$  分别为伪距与相位的电离层时延偏差;  $v_p^m$ 、 $v_\varphi^m$  分别为伪距与相位的多路径效应偏差。  $\epsilon_p$ 、 $\epsilon_\varphi$  分别为伪距与相位的量测噪声。将式(1)、式(2)相减得到:

$$N = [\lambda\varphi - P - (v_\varphi^{ion} - v_p^{ion}) - (v_\varphi^m - v_p^m) - (\epsilon_\varphi - \epsilon_p)]/\lambda \quad (3)$$

将上述表达式在历元之间相减, 当历元间电离层延迟和多路径效应等变化较小时, 可以得到周跳的估值:

## 1 单频周跳探测方法

### 1.1 伪距/载波组合法

在影响 GPS 定位的误差源中, 除电离层延迟误

$$\Delta N = N(t_2) - N(t_1) = \varphi(t_2) - \varphi(t_1) - \frac{P(t_2) - P(t_1)}{\lambda} \quad (4)$$

给定一固定的阈值,如果  $\Delta N$  大于这个阈值,则认为存在周跳,反之则认为无周跳发生。

### 1.2 多项式拟合法

多项式拟合法是根据  $m$  个相位测量观测值拟合一个  $n$  阶多项式,根据多项式来预估下一个观测值并与实测值比较,从而来发现周跳并修正整周计数<sup>[3]</sup>。

其数学模型为:

$$\varphi_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \dots + a_n(t_i - t_0)^n \quad (i = 1, 2, \dots, m, m > n + 1) \quad (5)$$

计算时将  $m$  个载波相位观测值代入式(5),进行多项式拟合。用最小二乘法求得式(5)中的多项式系数,并利用拟合后的残差  $v_i$  计算出中误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{[v_i v_i]}{m - (n + 1)}} \quad (6)$$

求得式(5)多项式系数后,就可以外推下一个历元的观测值,将其与实际观测值进行求差比较,当差值小于  $3\sigma$  时则认为该历元载波相位观测值没有发生周跳,用这个无周跳的观测值替换第一个观测值按上式依次向下拟合。当差值大于  $3\sigma$  时则认为该历元载波相位观测值发生了周跳,则应当用外推的整周计数去代替发生周跳的观测值中的整周计数,但小数部分保持不变。按照上述方法进行拟合直至最后一个观测值为止。

### 1.3 多普勒法

GPS 多普勒值表示载波相位的瞬时变化率,它是一种非常稳定的观测值,尽管它与载波相位观测值存在一定的关系,但它却是一个独立于载波相位的观测值,并不会因为载波相位发生周跳而发生变化<sup>[4-5]</sup>。因此,如果观测值中含有多普勒信息,那么就可以使用多普勒观测值来探测周跳。

$$\Delta N = \varphi_{k+1} - \varphi_k - (D_{k+1} + D_k)\Delta t/2 \quad (7)$$

式中: $\Delta N$  表示在时间间隔  $\Delta t$  内的周跳; $\varphi_{k+1}, \varphi_k$  分别表示第  $k$  与第  $k + 1$  个历元的载波相位观测值。 $D_{k+1}, D_k$  表示多普勒观测值。如果求得  $|\Delta N|$  大于阈值,认为当前历元观测值存在周跳,反之则认为无周跳发生。

## 2 实例分析

从 IGS 分析中心下载了 TWTF 地面跟踪站 2012

年 1 月 31 号的观测数据,采样率为 30 s,截取 25 号卫星 11 点开始之后的 300 个观测历元的数据进行分析。方案一:在第 50 个历元加上 2 周跳;方案二:在第 50 个历元加 5 周跳;方案三:在第 250 个历元加 7 周跳,第 275 个历元加 5 周跳;利用载波/伪距组合法进行探测,探测的结果见图 1、图 2、图 3 所示。

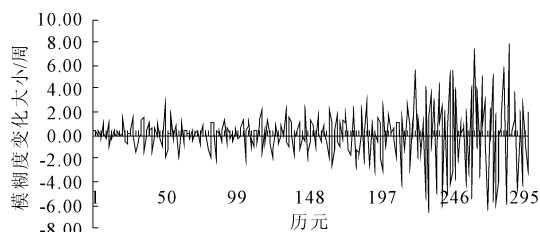


图 1 载波/伪距组合法方案一探测结果

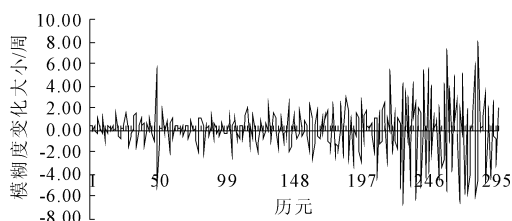


图 2 载波/伪距组合法方案二探测结果

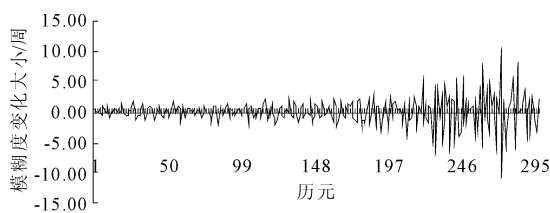


图 3 载波/伪距组合法方案三探测结果

由图 1~图 3 的探测结果可以看出,载波/伪距组合法在 50 历元处无法探测出 2 周的周跳,却能在 50 历元处探测出 5 周的周跳大小,原因在于该时段当时电离层延迟误差、多路径误差、量测噪声比较平稳,模糊度变化的大小比较平稳而且变化较小,在  $-2 \sim 2$  左右。所以 2 周跳的大小是无法探测出来的,但是可以探测出 5 周大小的周跳。在 275 历元处模糊度受电离层延迟误差、多路径误差、量测噪声的影响而变化比较剧烈,而且变化较大,所以此时探测 5 周左右的周跳是很困难的。由上面可知,载波/伪距组合法探测周跳的效果取决于历元间电离层延迟误差、多路径误差、量测噪声等的大小,当变化抖动越大时探测越困难。

利用多普勒法进行探测,探测的结果见图 4、图 5、图 6 所示。

从图 4~图 6 探测结果中可以看出,多普勒法对 50 历元处的 2 周跳 50 历元处的 5 周跳和 275 历元处的 5 周跳是可以探测出来的,而在 250 历元处

发生 2 周跳时则探测比较困难。原因在于此时接收机不稳定,残差值增大且发生波动,周跳探测能力也随之降低。

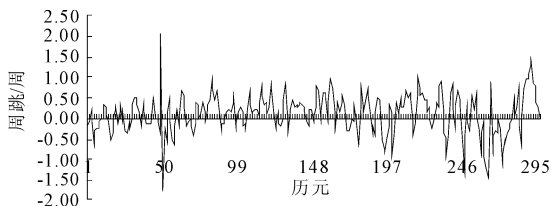


图 4 多普勒法方案一探测结果

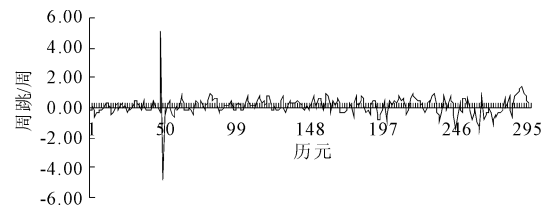


图 5 多普勒法方案二探测结果

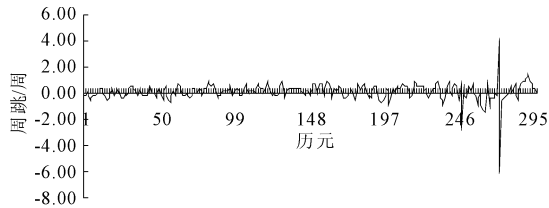


图 6 多普勒法方案三探测结果

在利用多项式法对三个方案进行探测时,采用星间观测值之间进行作差,再利用多项式进行探测。取 25 号卫星和 31 号卫星对应历元上的载波观测值作差,利用多项式探测的结果见图 7、图 8、图 9 所示。

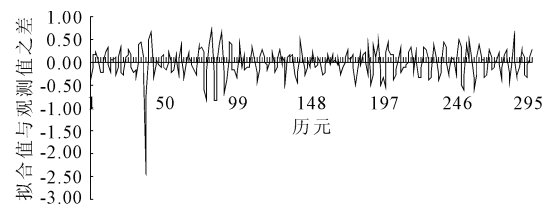


图 7 星间作差多项式法方案一探测结果

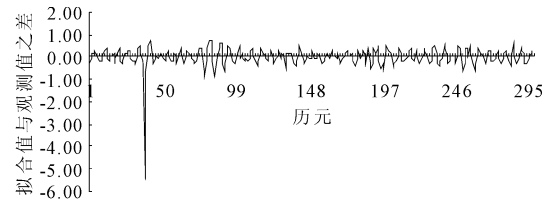


图 8 星间作差多项式法方案二探测结果

从图 7~图 9 可以看出利用多项式法对四个历元处的周跳都能探测出来,原因在于星间单差观测值不仅可以消除接收机钟差,还可减缓卫星钟差、电离层、对流层和多路径等误差的变化趋势,从而使多项式拟合法能探测出单差观测值 2 周以上的周跳,

所以此方法具有较强的周跳探测的能力。当然,这种星间作差多项式法的缺陷就是当两颗卫星在同一历元发生同样的周跳或者同一历元发生的周跳之差小于一定值是无法探测出来的,而且有时候随着历元的增加多项式误差积累越来越大使得多项式拟合探测发生错误。

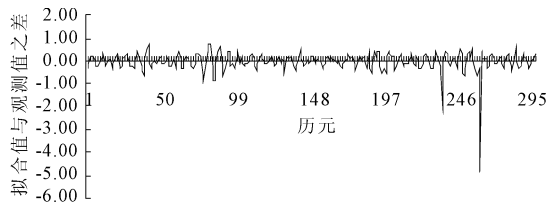


图 9 星间作差多项式法方案三探测结果

由上述可知载波/伪距组合法计算简单能够探测出 5 周大小的周跳,但受电离层延迟误差、多路径误差等影响较大。多普勒法可以探测出 5 周大小的周跳,当接收机不稳定时周跳探测能力随之下降。而星间作差多项式法能够探测出 2 周以上的周跳,探测能力最强。

### 3 结 论

星间作差多项式法比伪距/载波组合法和多普勒法具有更强的探测能力<sup>[6-7]</sup>。因此可以综合利用以上三种方法进行周跳探测,首先用星间作差多项式法,在探测出周跳之后再利用伪距/载波组合法和多普勒法辅助判断,当这两种方法也无法判断是哪一颗卫星发生周跳时,在该历元处做标记,在数据解算的时候在该历元处把两个作差卫星的整周模糊度重新初始化,以防止周跳探测的错误。

### 参考文献:

- [1] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005:46-50.
- [2] 方荣新,施 闯,魏 娜,等. GPS 数据质量控制中实时周跳探测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(9):1094-1095.
- [3] 罗 峰,姚宜斌,宋伟伟. 综合利用多项式拟合和载波相位变化率探测单频 GPS 周跳[J]. 全球定位系统,2007,32(5):9-13.
- [4] 雷 雨,高玉平. 多普勒探测周跳精度分析[J]. 全球定位系统,2011,(1):23-27.
- [5] Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data[J]. Geophysical Research Letters,1990,17(3):199-202.
- [6] 韦 克. 单频 GPS 精密单点定位研究[D]. 西安:长安大学,2010:40-42.
- [7] 赵 亮,兰孝奇,盛建岳. ARIMA 模型在卫星钟差预报中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(1):135-137.