

doi: 10.7690/bgzdh.2016.01.015

# 一种改进的 GPS 周跳探测与修复方法

孙海文, 欧阳中辉, 王彦  
(海军航空工程学院二系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对接收机持续性地测量载波相位值时会出现周跳现象从而降低数据处理精度的问题, 提出一种改进 GPS 的组合周跳探测与修复方法。通过分析周跳发生的原由, 对电离层残差法进行了分析, 指出了它的不足。采用载波观测值线性拟合的方法进行辅助探测的改进, 对周跳进行修复, 并通过实例分析进行验证。仿真结果表明: 该方法能较好地弥补电离层残差法的不足, 并能有效地探测与修复。

**关键词:** 载波相位; 周跳探测与修复; 电离层残差法; 线性拟合; 改进方法

**中图分类号:** TP206 **文献标志码:** A

## An Improved GPS Cycle Slip Detection and Repair Method

Sun Haiwen, Ouyang Zhonghui, Wang Yan  
(No. 2 Department, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In the problem of measuring cycle slip in receiver sustainable carrier phase, proposes an improved GPS cycle slip detection and repair method. Through analyzing reason of cycle slip, analyze the ionospheric residuals method, indicate its disadvantage, use carrier detection value linear fitting method for improvement of assistant detection, repair cycle slip, then use example for verification. The simulation results show that: the method can compensate the disadvantage of ionospheric residuals method, and it can effectively carry out detection and repair.

**Keywords:** carrier phase; cycle slips detection and repair; ionospheric residuals; linear fitting; improvement method

### 0 引言

接收机持续性地测量载波相位值时, 由于某些因素使得整周计数出现问题, 测得的相位观测值相比准确值出现几个整数周的跳跃, 称为周跳<sup>[1]</sup>。在持续性地测量载波相位值时, 若接收机对某卫星的载波相位观测值在某一历元发生周跳, 则将会从该历元的该卫星后续的载波相位观测值中加上一样的整周偏差。

如果相位值发生周跳, 受影响的不单单是一个历元, 而是后续大量的历元, 它将降低数据处理精度, 需要加以修正。

在实践中, 周跳的探测通常在数据预处理阶段进行。进行周跳探测的方法有多种, 具体有多项式拟合法<sup>[2]</sup>、高次差法<sup>[3]</sup>、伪距相位组合法<sup>[4]</sup>、卡尔曼滤波法<sup>[5]</sup>、电离层残差法<sup>[6]</sup>等。周跳的修复方法大致可概括为 2 种<sup>[7]</sup>: 一种是确定周跳的大小, 从发生周跳的历元开始, 后续所有相位观测值减去一个固定的数值; 另一种是在探测出周跳后并不直接对其进行修复, 而是在载波观测方程中, 从周跳发生历元处起引入一个新的模糊度参数, 随着其他参数一同进行参数估计。

### 1 周跳发生的原由

周跳发生的具体原由<sup>[8]</sup>如下:

1) 障碍物的遮挡。卫星信号被树木、建筑物、山地等障碍物遮挡, 无法到达接收机天线。

2) 接收机的运动。接收机在锁定信号时, 由于接收机与卫星间的相互运动将使得解算难度增加, 甚至导致信号缺失。

3) 到达接收机处卫星信号的信噪比低。当到达接收机的卫星信号的信噪比过低时, 将使接收机无法正常锁定信号, 发生周跳。

4) 接收机或卫星故障。由于接收机软件故障, 导致无法正常处理信号, 或由于卫星振荡器故障, 引起所产生的信号不正确。

### 2 电离层残差法

正常情况下, 当电离层相对稳定, 加上采样频率高, 并且不发生周跳时, 电离层残差改变会很小。如果电离层残差发生较大变化时, 说明在载波频率上产生了周跳, 这里采用双频组合观测值建立电离层残差模型, 再考虑电离层延迟误差时,  $L_1$ 、 $L_2$  的载波相位观测值可表示如下:

$$\phi_1(t) = \frac{\rho(t)}{\lambda_1} - N_1 - I_1(t); \quad (1)$$

$$\phi_2(t) = \frac{\rho(t)}{\lambda_2} - N_2 - I_2(t)。 \quad (2)$$

载波相位组合观测值:

收稿日期: 2015-08-29; 修回日期: 2015-10-10

作者简介: 孙海文(1990—), 男, 山东人, 硕士研究生, 从事软件工程研究。

$$\Delta\phi_{12}(t) = \lambda_1\phi_1(t) - \lambda_2\phi_2(t) = \lambda_2N_2 - \lambda_1N_1 + \frac{A(t)}{f_2^2} - \frac{A(t)}{f_1^2}; \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\phi_{12}(t)}{\lambda_1} = \phi_1(t) - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\phi_2(t) = \frac{f_1}{f_2}N_2 - N_1 + \Delta_{\text{ION}}(t). \quad (4)$$

其中： $A(t)$  为该时刻电离层延迟系数； $\Delta_{\text{ION}}(t)$  为电离层残差； $N_1$ 、 $N_2$  为 L1、L2 载波信号的整周模糊度。将相邻 2 个历元的载波相位组合观测值求差得：

$$\Delta\phi_{12}(t) = \frac{\Delta\phi_{12}(t+1)}{\lambda_1} - \frac{\Delta\phi_{12}(t)}{\lambda_1} = \Delta_{\text{ION}}(t+1) - \Delta_{\text{ION}}(t) + \frac{f_1}{f_2}\Delta N_2 - \Delta N_1; \quad (5)$$

$$v(t) = \frac{f_1}{f_2}\Delta N_2 - \Delta N_1 = 1.283\Delta N_2 - \Delta N_1. \quad (6)$$

其中  $\Delta N_1$ 、 $\Delta N_2$  分别为 L1、L2 的周跳，当  $\Delta N_1 = \pm 4$ ， $\Delta N_2 = \pm 3$ ； $\Delta N_1 = \pm 5$ ， $\Delta N_2 = \pm 4$ ；... 时， $0.05 < |v(t)| < 0.15$  周，可以探测出绝大部分周跳。但是当  $\Delta N_1 = \pm 9$ ， $\Delta N_2 = \pm 7$  时， $|v(t)| = 0.0167$  周；当  $\Delta N_1 = \pm 77$ ， $\Delta N_2 = \pm 60$  时， $|v(t)|$  几乎为 0，难以探测出周跳。

由以上模型推导和分析可知：电离层残差法优点是受不受接收机与卫星之间几何空间位置的影响，该方法可以很好地适用于动态数据的周跳探测；缺点是该方法不能判断周跳发生在哪个频率的载波相位，同时当 2 个频率发生特别的周跳组合时，该方法不能探测出周跳。因此，笔者基于电离层残差法的特点，提出了利用载波相位线性拟合与电离层残差法组合探测的改进方法。

### 3 改进的周跳探测与修复方法

电离层残差法可以检测出动态数据中大部分的周跳，但存在无法判断周跳发生在哪个频率的载波相位和一些特别组合时难以进行周跳探测的问题；因此，笔者提出了利用载波相位观测值线性拟合的方法进行辅助探测。

在没有发生周跳的情况下，载波相位观测值可以看成在时间上是一条连续变化的曲线；当产生周跳时，载波相位观测值在时间上就不是连续的函数，在发生周跳的历元上产生了跳跃变化。根据这个特点，可以在发生周跳历元的附近，找一些未发生周跳的历元的相位观测值进行线性拟合，来预测后续历元的周跳是否发生。该拟合方法可以弥补电离层残差法存在的 2 个问题。具体实施如下：

先利用电离层残差法探测出发生周跳的历元，在发生周跳的历元附近，分别取 L1、L2 载波相位上该历元前 6 个载波相位实际观测值进行拟合。用拟合的曲线来估计周跳历元的 L1、L2 载波相位估计值。如果估计值与实际值的差值大于限定的差值，则没产生周跳；否则发生周跳。其差值为周跳大小。

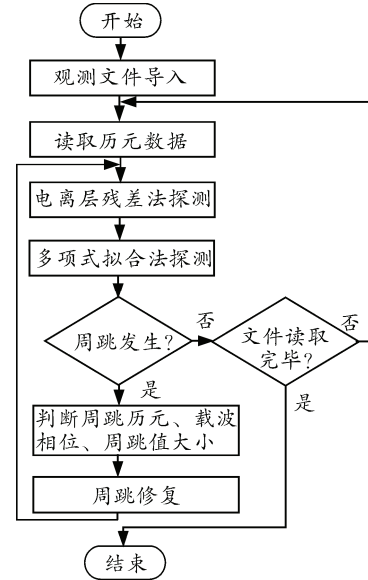


图 1 周跳探测与修复流程

一般接收机可以测量载波相位 0.02 周<sup>[9]</sup>，因此假设载波相位测量误差为：

$$m_\phi = \pm 0.02 \text{ 周}. \quad (7)$$

由此引起的电离层残差检测周跳的误差为

$$m_{\Delta N} = \sqrt{2(1 + \frac{f_1^2}{f_2^2})} \cdot m_\phi = \pm 0.046 \text{ 周}. \quad (8)$$

按 3 倍误差的标准，最大误差应为 0.14 周；因此，可以定义 0.14 周为判断限差值。当估计值与实际值之差大于 0.14 周时，认为该载波发生了周跳。

设  $\hat{\phi}_1(t)$ 、 $\hat{\phi}_2(t)$  为发生周跳时相应历元多项式拟合后 L1、L2 载波相位的估计值， $\phi_1(t)$ 、 $\phi_2(t)$  为发生周跳时 L1、L2 载波相位的实际观测值。

$$\hat{\phi}_1(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4; \quad (9)$$

$$\hat{\phi}_2(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4. \quad (10)$$

当  $|\hat{\phi}_1(t) - \phi_1(t)| \geq 0.14$  或  $|\hat{\phi}_2(t) - \phi_2(t)| \geq 0.14$  时，认为 L1 或 L2 载波相位观测值发生周跳。周跳大小为：

$$\Delta N_1 = [\hat{\phi}_1(t) - \phi_1(t)]; \quad (11)$$

$$\Delta N_2 = [\hat{\phi}_2(t) - \phi_2(t)]. \quad (12)$$

其中  $[\cdot]$  为取整。根据式 (11)、式 (12) 可以修复周跳，设修复后的 L1、L2 载波相位为：

$$\tilde{\varphi}_1(t) = \varphi_1(t) + \Delta N_1; \tag{13}$$

$$\tilde{\varphi}_2(t) = \varphi_2(t) + \Delta N_2. \tag{14}$$

修复之后，用修复后的值代替发生周跳的观测数据，再对修复后的数据进行检测。

具体探测与修复流程如图 1 所示。

### 4 仿真试验

实测获取一组载波相位观测值，人为地在第 7 个历元 L1 载波上加入 2 周周跳，第 267 个历元 L2 载波上加入 5 周周跳，第 756 个历元 L1 载波上加入 7 周周跳。利用电离层残差法进行周跳探测，如图 2、图 3 所示。

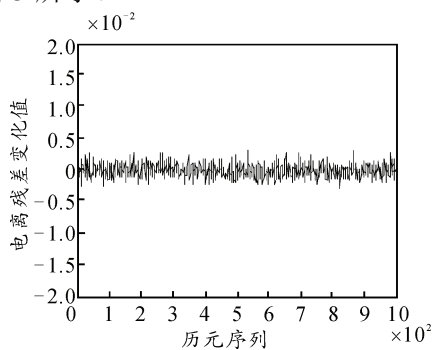


图 2 电离层残差法探测周跳(无周跳)

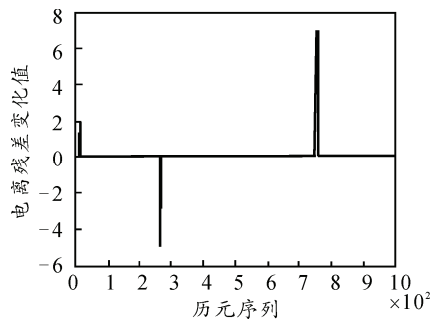


图 3 电离层残差法探测周跳(有周跳)

从图 3 可知，电离层残差法能准确地找到发生周跳的历元。

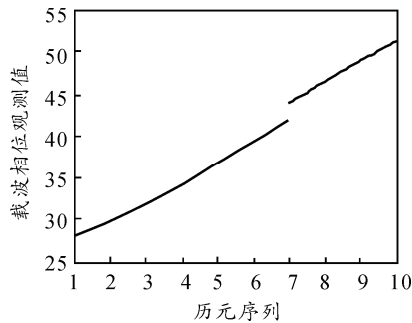


图 4 样本观测值曲线(有周跳)

取出 L1 载波观测值第 1~10 个历元  $y=[27.924, 29.713, 31.806, 34.128, 36.611, 39.187, 43.799, 46.388, 48.905, 51.304]$ 。绘出历元与载波相位观测

值之间的关系曲线图，如图 4 所示。

取周跳历元前 6 个历元进行线性拟合曲线为：

$$\hat{\varphi}_1(t) = 26.515 + 1.192t + 0.230t^2 - 0.014t^3 + 0t^4. \tag{15}$$

由式 (15) 拟合曲线可以计算出：

$$\hat{\varphi}_1(7) = 41.794. \tag{16}$$

将式 (16) 代入下式得：

$$\Delta N_1 = [\hat{\varphi}_1(7) - \varphi_1(7)] = 2 > 0.14, \tag{17}$$

因此可以判断 L1 载波在第 7 历元发生了周跳。对其进行修复模型为

$$\tilde{\varphi}_1(7) = \varphi_1(7) - \Delta N_1 = 41.799. \tag{18}$$

修复后的观测值如图 5 所示。从图中可知，拟合方法可很好地找出周跳位置，并进行有效的修复。

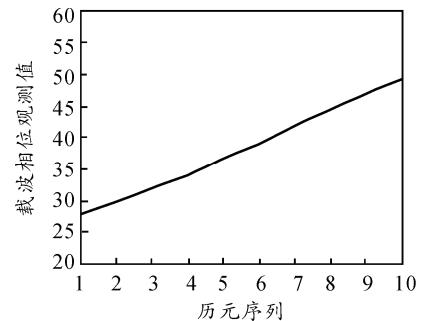


图 5 修复后的观测值曲线(无周跳)

### 5 总结

实例分析结果证明，该改进方法能很好地弥补电离层残差法的不足，并进行有效的探测与修复。

### 参考文献：

- [1] 王仁谦, 朱建军. 利用双频载波相位观测值求差的方法探测与修复周跳[J]. 测绘通报, 2004(6): 9-11.
- [2] 李江卫. GPS 相位观测值中周跳的探测与修复算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 31-34.
- [3] 严新生, 王一强, 白征东, 等. 联合使用高次差法和 TurboEdit 法自动探测修复周跳[J]. 测绘通报, 2007(9): 5-9.
- [4] 李为乔, 程鹏飞, 蔡艳辉, 等. GPS 载波相位观测值中周跳探测与修复研究[J]. 测绘工程, 2010, 19(6): 31-34.
- [5] 白伟华, 孙越强, 朱光武, 等. 星载双频 GPS 载波相位周跳的实时探测与修复[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(5): 593-599.
- [6] 王维, 王解先, 高俊强. GPS 周跳探测的方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(6): 687-290.
- [7] 李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 173-209.
- [8] Hofmann Wellen, Lichtenegger Hof B H, Collins J. GPS history and practice 4<sup>th</sup>[M]. Edition pringer-Verlag Wien. 2007: 65-70.
- [9] 李跃, 邱致和. 导航与定位[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 21-37.