

一种基于多普勒改进的BDS单频观测值周跳探测与修复法*

张 炘[†] 蔡成林 唐振辉 于洪刚

(桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004)

摘要 针对多普勒探测法对小周跳探测精度不足的缺点, 提出一种改进的北斗系统(BDS)单频观测值周跳探测法. 首先, 利用多普勒观测值检测时, 使用固定窗口滑动的方式对初始数个历元的多普勒值进行拟合得到拟合曲线, 接着对拟合曲线进行积分得到多普勒变化量, 然后用多普勒变化量与载波相位进行周跳探测, 最后以高次差的方式将前后历元探测出的值进行历元求差, 差值为最后探测出的周跳值. 对实测BDS数据进行周跳探测, 试验证明: 改进的多普勒周跳探测法探测小周跳的能力明显增强, 具有方法简单、可靠等优点, 探测精度可达0.1周且修复效果较优.

关键词 天体测量学; 人造卫星运动; 多普勒; 周跳; 方法: 数据分析

中图分类号: P128; **文献标识码:** A

1 引言

当接收机载波跟踪环发生失锁时就会产生周跳, 周跳发生时整周计数会发生跳变. 在高精度定位中, 周跳会带来较大的定位误差. 所以正确探测周跳和粗差是非常重要的环节. 目前周跳探测的方法主要有: 伪距相位组合探测法^[1]、电离层残差法^[2-3]、多项式拟合法^[4]、多频信号周跳探测法^[5-7]、多普勒周跳探测法^[8-9]、Blewitt周跳探测法^[10-12].

Cannon等人提出利用多普勒观测值探测周跳, 徐国昌博士提出利用多普勒积分探测周跳, 陈小明博士提出对离散的多普勒值进行处理后再进行周跳探测^[13-15]. 由于多普勒观测值的独立性, 多普勒积分与载波相位变化量存在一定对应关系, 使用多普勒观测值探测周跳可以较好地探测出周跳值. 多普勒周跳探测只需单频数据, 所以使硬件成本降低. 使用多普勒周跳探测法可以避免多频数据组合方法探测周跳出现特殊组合致使无法探测出周跳的情况. 现在关于多普勒探测周跳的方法主要有: 传统多普勒周跳探测法、基于星历计算的多普勒积分的周跳探测方法、电离层残差与多普勒值相结合的周跳探测法等. 传统的多普勒周跳探测法对较小周跳的探测效果并不好, 在实际周跳探测中由于噪声、粗差等原因会出现对周跳的误判或探测不出的情况.

2016-07-27收到原稿, 2016-10-08收到修改稿

*国家自然科学基金项目(61263028)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2016YJCX14)资助

[†]zxxinzhang@163.com

改进型多普勒周跳探测法很好地改善了传统方法的不足. 第2节简要叙述了传统方法与改进方法的不同以及改进方法探测周跳的具体步骤. 第3节通过比较两方法探测周跳的差异, 直观体现了改进方法的周跳探测与粗差判别的优越性.

2 多普勒周跳探测

多普勒频移是一个独立的观测量, 表示瞬时距离变化率的测量值, 接收机对多普勒频移进行积分相当于对多普勒频移引起的载波相位变化进行以周为单位的计数. 在一段时间内的多普勒积分相当于这段时间内载波相位观测值的变化量, 所以多普勒积分可以反映载波相位的变化率^[16].

2.1 传统多普勒周跳探测法

多普勒积分计算:

$$d\varphi(t_k) = - \int_{t_0}^{t_k} f_d(t) dt, \quad (1)$$

式中 $d\varphi(t_k)$ 表示 $[t_0, t_k]$ 之间的多普勒积分值, 也表示历元 t_0 至 t_k 时刻载波相位变化量. $f_d(t)$ 表示 t 时刻多普勒变化量. 将载波相位变化量减去多普勒积分值得到的便是周跳值, 一般采用梯形积分的方法计算多普勒频移值的积分. 如(2)式所示, $f_d(t_0)$ 和 $f_d(t_k)$ 分别表示 t_0 和 t_k 时刻的多普勒观测量, Δt 表示时间间隔.

$$\int_{t_0}^{t_k} f_d(t) dt = [f_d(t_0) + f_d(t_k)] \Delta t / 2. \quad (2)$$

$$\Delta N = \Delta\phi(t_k) - d\varphi(t_k), \quad (3)$$

(3)式表示 t_k 时刻的周跳值, $\Delta\phi(t_k)$ 表示前后历元载波相位的差值. (3)式计算得到的周跳值其门限设置为 δ . 当 $\Delta N > \delta$ 时, 可认为发生了周跳; 反之, $\Delta N < \delta$ 时, 则认为未发生周跳. 传统的多普勒周跳探测法对小周跳的探测并不精准.

2.2 改进多普勒周跳探测法

改进方法建立在对初始的数个历元多普勒观测值进行拟合上, 获得初始值的拟合曲线. 观测初始历元 t , 多普勒观测值分别为doppler 1、doppler 2 $\cdots$ doppler t . 从 t 历元开始, 对 t 历元之前的 m 个多普勒观测值进行拟合, 获得拟合后的曲线. 通过拟合得到 $m+1$ 个拟合系数 $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_m$, 然后将拟合系数组成函数式, 如(4)式所示:

$$f_d(t) = a_0 + a_1(t_i - t_0) + \cdots + a_m(t_i - t_0)^m, \quad i = 1, 2, \cdots, k. \quad (4)$$

首先利用最小二乘法解算并拟合^[17]出对应 t 到 $t+1$ 历元段的拟合曲线, 接着对函数进行曲线积分, 进行多普勒积分时取积分上下限分别为 t 和 $t+1$, 使用拟合后的函数式进行多普勒曲线积分得到多普勒变化量. 以此类推, 为了能实时地进行数据拟合, 每次进行拟合时都将 $t+1$ 历元的数据传递给 t 历元的数据. 拟合的滑动窗大小为 m , 并且保持每个历元都有 m 组多普勒观测值进行处理获得变化曲线. 每个历元通过上述方法都可以得到对应

历元的曲线函数, 不使用梯形积分而是采用牛顿-柯特斯(Newton-Cotes)法的曲线积分, 通过对曲线函数积分获得多普勒变化量, 如(5)式所示:

$$d\varphi(t_n) = - \int_t^{t+1} a_0 + a_1(t_i - t_0) + \cdots + a_n(t_i - t_0)^n dt, \quad i = 1, 2, \cdots, k. \quad (5)$$

然后如(3)式所示, 将载波相位变化量与多普勒积分相减得到历元 t_n 的周跳值 ΔN_n . 通过对多普勒值进行拟合, 再次进行多普勒周跳探测时对1周的小周跳敏感度并不强, 同时对于粗差的判断并不明显, 于是在下个历元 t_{n+1} 采用相同方法得到周跳值 ΔN_{n+1} . 计算得到 ΔN_{n+1} 与 ΔN_n 后, 将两值相减得到最终 t_{n+1} 时刻周跳值 $\Delta N'_{n+1}$. 多普勒探测周跳在采样率不是很低的情况下, 初次周跳探测值前后历元作差可以将观测数值中的部分误差减小, 通过将探测值进行历元间相减的方法, 可以有效减缓周跳值的变化, 将出现周跳的历元的探测值算出. 当计算出 $\Delta N'_{n+1}$ 后, 设置门限值 δ_x ; 当 $\Delta N'_{n+1} > \delta_x$ 时, 发生周跳, 当 $\Delta N'_{n+1} < \delta_x$ 时, 则代表未发生周跳. 当发生周跳与出现野值时, 判定条件如下: 对 t_n 历元进行周跳探测, 利用改进多普勒周跳探测法探测出此历元的周跳 N_{t_n} , 而下个历元 t_{n+1} 时, 探测出的周跳为 $N_{t_{n+1}}$. 若 $|N_{t_n}| > \delta_x$ 与 $|N_{t_{n+1}}| > \delta_x$ 时, 表示发生了周跳或粗差; 当 $|N_{t_n}| = |N_{t_{n+1}}|$ 时, 则表示发生了周跳; 当 $|N_{t_n}| \neq |N_{t_{n+1}}|$ 时, 则表示出现了粗差. 改进后的周跳探测方法对周跳变化较为敏感, 可以准确探测出周跳值, 上文中改进方法的门限值等于改进方法探测出的周跳值取整. 在第3节试验中明显体现出这一特点.

改进型多普勒周跳探测法步骤如下: (1)对一组多普勒值进行拟合得到拟合曲线; (2)对拟合曲线进行积分得到多普勒变化量; (3)利用多普勒变化量与载波相位变化量进行常规多普勒周跳探测; (4)经历两个历元的周跳探测, 利用前后历元探测周跳做差, 此差值为最终的周跳值; (5)通过判断准则判定是否发生了周跳或是出现了粗差.

为了防止前几个历元发生周跳而使高次差计算错误的情况出现, 可以在使用改进型多普勒周跳探测法之前用传统的多普勒周跳探测法进行探测, 不过探测的门限值相对正常的门限值要小, 以此来严格保证前几个历元未发生周跳. 当确定前几个历元无周跳时, 后续便可以采用改进型方法进行探测.

2.3 改进方法周跳修复

当检测到的残差值大于门限值时, 判断周跳还是粗差需2个历元(t_1 和 t_2). 按照改进型多普勒周跳探测法的步骤进行分析判断, 由于探测的精度可以达到0.1周, 所以当判断是周跳且周跳值为 N_t 时, 直接对前一个历元 t_1 的探测值 N_t 取整, 便可以解算出周跳的整数解 N , 然后从当前历元 t_2 开始, 后面的每个历元减去周跳值就可以实现对周跳的修复.

3 周跳探测试验与结果分析

下文试验数据选取桂林某地采样率为1 Hz的BDS实测数据, 在原始观测数据中模拟添加周跳与野值, 然后再进行探测与修复. 最后对两种方法的探测能力与周跳修复能力进行比较, 验证改进算法相较于传统算法的优越性.

3.1 无周跳数据探测比较

首先对一组无周跳数据分别使用传统多普勒周跳探测法与改进型多普勒周跳探测

法进行周跳探测,如图1-2所示.从图1-2可以明显比较出对于无周跳的一组数据的周跳探测.改进型多普勒周跳探测法最高峰值在0.1周以下,而传统多普勒周跳探测法最高峰值可以达到0.96周.对于最高峰处无法判别是否发生了1周或1周以上的周跳,而且容易发生误判.

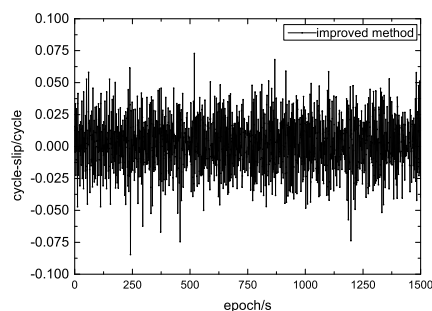


图 1 改进型多普勒周跳探测图

Fig.1 Diagram of the improved Doppler cycle-slip detection method

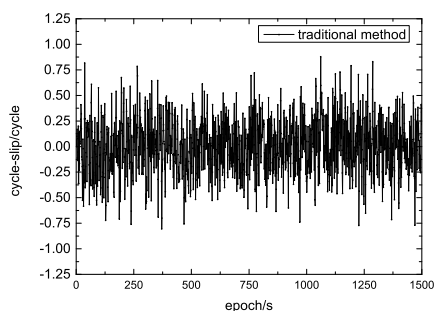


图 2 传统多普勒周跳探测图

Fig.2 Diagram of the traditional Doppler cycle-slip detection method

3.2 两种方法对周跳与粗差的探测比较

现在 $t = 1286$ s处添加 $N = 1$ 的周跳值,分别应用传统多普勒周跳探测法与改进型周跳探测法进行周跳探测,如图3-4所示.对比图3与图4,可以明显发现:传统多普勒周跳探测法探测出的周跳值为 $N'_{1286} = 1.83$ 周, $N'_{1286} > 1.5$ 周,通过门限判定可以确定,此时周跳值为2周,无法较好地确定发生周跳的周数,不利于之后的周跳修复.改进型多普勒周跳探测法探测出的周跳为 $N_{1286} = 0.97$ 周, $N_{1287} = -0.99$ 周,对 N_{1286} 、 N_{1287} 取整数并求绝对值得: $|N_{1286}| = |N_{1287}|$,所以可得 $t = 1286$ s处发生了周跳,且周跳等于1周.

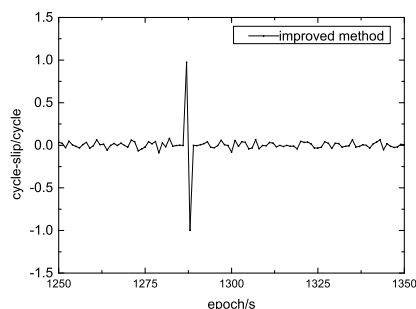


图 3 改进方法探测周跳图

Fig.3 Diagram of detecting cycle-slip with the improved method

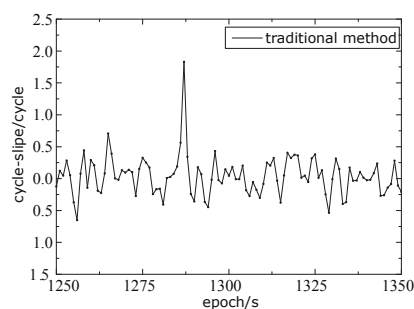


图 4 传统方法探测周跳图

Fig.4 Diagram of detecting cycle-slip with the traditional method

为了判定改进方法对粗差的探测效果, 在 $t = 1699$ s处加入1周的粗差, 再次利用两种方法进行探测. 改进方法与传统方法的探测效果如图5和图6所示. 根据2.2节改进方法中粗差的判定准则, $t = 1729$ s时, 探测到的数据为1周; 而 $t = 1730$ s时, 探测值为-2周. 两者的绝对值并不相等, 所以探测出的是粗差. 在图6中传统方法探测出的粗差为2周, 探测粗差出错. 所以对比图5和图6, 改进方法相对于传统方法探测精度很高, 未发生周跳与粗差的历元探测数值波动在 -0.08 s至 $+0.08$ s之间, 而传统方法效果就相对较差, 并且还可能出现误判情况.

利用改进型多普勒周跳探测判定周跳和粗差的准则可以直接判定出粗差, 而传统多普勒周跳探测法无法直接做到, 且探测出的值不等于添加的粗差值.

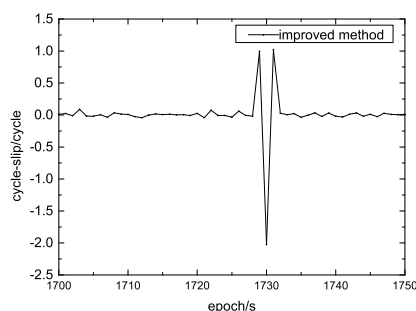


图 5 改进方法判定粗差图

Fig. 5 Diagram of detecting gross-error with the improved method

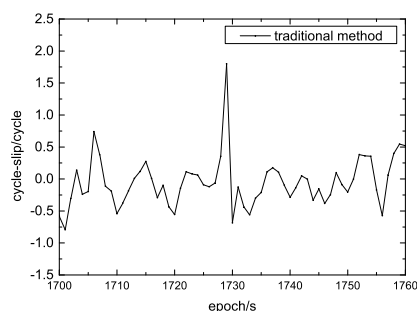


图 6 传统方法判定粗差图

Fig. 6 Diagram of detecting gross-error with the traditional method

为了更直观地看出改进后算法的优势, 将改进算法的探测效果与原始算法的探测效果进行了对比. 结果如表1所示, 将改进的方法称为A方法, 原始方法称为B方法. 在观测的1500个历元人为添加14组周跳, 包括较小的1周周跳和达到上百甚至上千的较大周跳, 其中周跳修复的浮点解与固定解通过改进方法算得. 表1中B方法只探测出了第43、466、472、638、810、900、979、1100、1302历元的周跳, 大部分可探测出的周跳都为较大的周跳值, 对于1周的小周跳探测情况欠佳. A方法则可以较好地探测出全部的周跳值, 成功率明显高于常规的多普勒周跳探测方法.

表1中的修复情况是基于改进方法探测出周跳后修复的情况, 分别给出了修复周跳的浮点解与固定解. 从浮点解可以看出, 对于小周跳的浮点解精度较高, 观测噪声对周跳探测的影响大大降低. 固定解与添加的周跳值相等, 所以相应的修复效果较好.

表 1 两种方法探测效率
Table 1 The detective efficiencies of two methods

Epoch	Add cycle-slip /cycle	Detectability (Y is yes, N is no)		Method A (float solution)	Method A (fix solution)	Method B (float solution)
		Method A	Method B	/cycle	/cycle	/cycle
27	1	Y	N	1.01	1	1.54
33	1	Y	N	0.98	1	0.43
43	-1	Y	Y	-0.97	-1	-1.34
466	1	Y	Y	1.02	1	0.65
472	-2	Y	Y	-1.99	-2	-1.76
526	1	Y	N	1.02	1	1.66
554	1	Y	N	0.93	1	0.31
638	18	Y	Y	18.08	18	17.81
700	-54	Y	N	-54.08	-54	-53.13
810	131	Y	Y	130.95	131	130.61
900	600	Y	Y	599.99	600	600.45
979	1240	Y	Y	1239.96	1240	1240.35
1100	900	Y	Y	900.06	900	900.47
1302	1890	Y	Y	1889.99	1890	1889.65

Method A is the improved Doppler detection method, and Method B is the traditional Doppler detection method.

4 结论

本文基于传统多普勒周跳探测法进行改进, 对多普勒频移拟合之后再进行高次差探测周跳. 无周跳的情况下, 通过传统多普勒周跳探测法与改进多普勒周跳探测法的周跳检验对比, 验证了改进方法可探测出不同周跳并且对于粗差判定的效果较好. 对数据处理分析后得出如下结论:

(1)改进多普勒周跳探测法可以很好地探测出小周跳值, 精度达到0.1周, 弥补了传统多普勒周跳探测法探测小周跳的不足.

(2)传统方法与改进方法都可以探测出较大周跳值, 但在探测精度上传统方法不如改进方法.

(3)改进方法可以简单、可靠地区分粗差与周跳.

(4)改进方法探测周跳的精度高于传统方法, 且对周跳修复的能力优于传统方法.

(5)本方法适用于对GPS/BDS数据进行周跳探测.

参 考 文 献

- [1] 陈品馨, 章传银, 黄昆学. 大地测量与地球动力学, 2010, 30: 120
- [2] 马煦, 常青, 侯俊. 电讯技术, 2005, 45: 115
- [3] 陶庭叶, 何伟, 高飞, 等. 中国惯性技术学报, 2015, 23: 54
- [4] 李明, 高星伟, 徐爱功. 测绘科学, 2008, 33: 83
- [5] Lacy M C D, Reguzzoni M, Sanso F. GPSS, 2012, 16: 353
- [6] 孙保琪, 欧吉坤, 盛传贞, 等. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35: 1157
- [7] Zhao Q L, Sun B Z, Dai Z Q, et al. GPSS, 2015, 19: 381
- [8] 马驰, 李柏渝, 刘文祥, 等. 全球定位系统, 2014, 39: 9
- [9] 董明, 张成军, 吕静, 等. 大地测量与地球动力学, 2012, 32: 12
- [10] 贾沛璋, 吴连大. 天文学报, 2001, 42: 192
- [11] Jia P Z, Wu L D. ChA&A, 2001, 25: 515
- [12] 郑作亚, 程宗颐, 黄斌, 等. 天文学报, 2005, 46: 216
- [13] Cannon M E, Schwarz K P, Wei M, et al. BGeod, 1992, 66: 2
- [14] Xu G C. GPS: Theory, Algorithms and Applications. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2003
- [15] 陈小明. 高精度GPS动态定位的理论与实践. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1997
- [16] 李征航, 张小红, 徐绍铨. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 27-40
- [17] 丁克良, 欧吉坤, 赵春梅. 测绘科学, 2007, 32: 18

A Method of Detecting and Repairing Cycle-slip Based on Doppler Improved BDS Single-frequency Observations

ZHANG Xin CAI Cheng-lin TANG Zhen-hui YU Hong-gang

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin
541004)

ABSTRACT Considering the limitation of Doppler detection method, an improved cycle-slip detection and repairation method is proposed for single-frequency BDS (Bei-Dou System) receivers. Firstly, a sliding way of fix windows is used for polynomial fitting of the initial Doppler value. Then, the Doppler shift is obtained by integrating the fitting curve. The values are used to detect the cycle-slip with carrier phase. Finally, the detection value of current epoch minus the detection value of the previous epoch is the cycle-slip. The measured data of BDS are used to perform the cycle-slip detection. Experiments show that the detective capability of tiny cycle-slip of the improved method is better than the traditional Doppler detection method. The improved Doppler detection method has overriding advantages in simplicity and reliability, etc. Measured accuracy can reach 0.1 cycle.

Key words astrometry: artificial satellite motion, Doppler, cycle-slip, methods: data analysis