doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.05.013

引用格式:蔡成林,王亮亮,王金辉,等. 电离层残差法对载波相位周跳探测的改进[J]. 电讯技术,2016,56(5):551-556. [CAI Chenglin, WANG Liangliang, WANG Jinhui, et al. Improvement of ionosphere residual method in carrier phase cycle-slip detection[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(5):551-556.]

电离层残差法对载波相位周跳探测的改进*

蔡成林,王亮亮**,王金辉,秦 懿,李 刚

(桂林电子科技大学 广西精密导航技术与应用重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:针对传统电离层残差法在实际数据处理中的缺陷,提出了一种电离层残差与高次差结合的 改进型周跳探测方法。该改进方法首先借鉴高次差的高通滤波特性,对电离层残差的组合观测值求 一次差,从而有效抑制低频信号并消除常数部分,使实际发生的周跳影响放大,再结合组合观测值的 方差进行周跳探测。算法验证表明该方法不论对"北斗"卫星不同星座的数据还是对全球定位系统 (GPS)卫星的数据均有良好的探测效果,弥补了原电离层残差法在电离层活跃期间以及数据质量不 佳时其不易有效探测出小周跳的缺陷,且避免了原算法经常出现误判断的情况,使其成为一种较优 的周跳探测方法。

关键词:卫星导航定位;载波相位;周跳探测;电离层残差;高次差 中图分类号:TN967.1 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2016)06-0551-06

Improvement of Ionosphere Residual Method in Carrier Phase Cycle-slip Detection

CAI Chenglin, WANG Liangliang, WANG Jinhui, QIN Yi, LI Gang

(Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Considering the shortcomings of the traditional ionosphere residual method in practical data processing, this paper proposes an improved cycle slip detection method for ionosphere residuals combined with higher difference. Firstly, according to the high pass filtering characteristics of high–order difference method, the new method calculates the 1st–order difference of the combined observation value of ionosphere residuals so as to effectively suppress the low–frequency signal and amplify the impact of cycle slips. Secondly, a new criteria of cycle–slip detection is established based on differential value from the first step. Algorithm validation shows that the improved algorithm has better detection effect regardless of the Beidou navigation satellite system(BDS) data or the GPS satellite data, and makes up the defect that the original algorithm can not detect small cycle–slip effectively when the ionosphere is active and the data quality is poor. It avoids misjudgment that original algorithm often makes and is a better algorithm in cycle–slip detection.

Key words: satellite navigation; carrier phase; cycle-slip detection; ionosphere residual; high-order difference

^{*} 收稿日期:2015-11-25;修回日期:2016-01-13 Received date:2015-11-25;Revised date:2016-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61263028);中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室重点基金项目(2014PNTT05); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(GDYCSZ201452)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61263028); The Key Fund of Key Laboratory of Precision Navigation Position and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences(2014PNTT05); The Innovation Project of Guilin University of Electronic Technology Graduate Education(GDYCSZ201452)

^{**} 通讯作者:liangliangwang_nx@163.com Corresponding author:liangliangwang_nx@163.com

1 引 言

在载波相位数据处理中,有效实用的周跳探测 方法^[1]一直以来都是周跳探测的难点问题。只有 有效地探测出周跳,才能保证载波相位周跳修复^[2] 以及整周模糊度固定^[3]的精确性。对于周跳的探 测虽然也有很多方法,如相位减伪距法^[4]、MW (Melbourne-Wubbena)组合方法^[5]、小波变换法^[6]、 多项式拟合法^[7]、电离层残差法^[8]、卡尔曼滤波^[9] 等,但是这些算法也存在各自的缺陷,相位减伪距法 和多项式拟合法方法一般只能探测出较大周跳:电 离层残差法在电离层活跃期间容易出现误判:卡尔 曼滤波方法容易造成模型误差目易发散等。本文通 过实际数据分析得出电离层残差法在数据历元时间 间隔较大、电离层比较活跃期间、数据弧段开始和末 尾时不易有效探测出周跳,而且很容易发生误判。 为了改善电离层残差法对周跳探测的缺陷,本文提 出了高次差与电离层残差法结合的方法。通过对 "北斗"卫星导航系统 (Beidou Navigation Satellite System, BDS)不同类型卫星的数据以及全球定位系 统(Global Positioning System, GPS)卫星数据的分析 看出改进方法有效弥补了原方法在周跳探测时的不 足。在实际的数据处理中,探测效果明显优于原算 法.且不易发生误判。

2 电离层残差法原理

电离层残差法就是根据相邻历元间电离层残差 的变化量来确定是否发生周跳^[9]。载波相位观测 方程的数学模型如下:

$$\lambda_1 \phi_1(t) = R(t) + c\Delta\delta(t) + \lambda_1 N_1(t) - ion_1(t) + trop(t) ,$$
(1)

$$\lambda_2 \phi_2(t) = R(t) + c\Delta\delta(t) + \lambda_2 N_2(t) - ion_2(t) + trop(t) .$$
(2)

式中: ϕ_1 , ϕ_2 为载波相位观测值; N_1 , N_2 分别为两个 频点的整周模糊度;c 为光速; $c\Delta\delta$ 为卫星和接收机 的钟差。由式(1)和式(2)可以看出等式右边除整 周模糊度和电离层项外,其他都为公共项,因此对式 (1)和式(2)求差可得

$$\lambda_1 \phi_1(t) - \lambda_2 \phi_2(t) = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t) - ion_1(t) + ion_2(t) \circ$$
(3)

利用式(3)构造电离层残差探测模型:

$$\phi_{ion}(t) = \phi_1(t) - \frac{f_1}{f_2} \phi_2(t) =$$

• 552 •

$$N_1(t) - \frac{f_1}{f_2} N_2(t) + \Delta_{\text{ion}} + \xi_{\text{ion}} \circ$$

$$\tag{4}$$

式中: $f_1 f_2$ 分别为"北斗"卫星 B1、B2 频点的频率; ξ_{ion} 为电离层残差组合的误差。实际上,式(4)已经 消除了站星几何距离以及卫星和接收机的钟差,只 剩下频间电离层误差项。由文献[9]可知式(4)中 $\Delta_{ion} = -\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2} \cdot \frac{I}{g_1}$ 。对于式(4)如果历元之间没有发 生周跳,其前后历元的 N_1 和 N_2 都是保持不变的,那 么对式(4)在历元间求差便可得到

$$D_{\rm ion} = \Delta N_1 - \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2 + \nabla \Delta_{\rm ion} + \Delta \xi_{\rm ion} \circ$$
 (6)

式中: ΔN_1 、 ΔN_2 为两个频点的周跳大小; $\nabla \Delta_{ion}$ 为微 小的电离层残差量。由式(6)可知,如果电离层比 较稳定,数据采样率较高,没有周跳的话, D_{ion} 会在零 附近波动,但当发生周跳时, D_{ion} 就会出现比较大的 跳变。

对于 D_{im}的推导过程,根据误差定律可得

$$m_{\rm D} = \sqrt{m_{\phi}^2 + \frac{f_1^2}{f_2^2}m_{\phi}^2 + m_{\phi}^2 + \frac{f_1^2}{f_2^2}m_{\phi}^2} = 2.3m_{\phi\,\circ} \qquad (7)$$

取 L1、L2 上的观测误差均为 $m_{\phi} = \pm 0.01$ 周,则取 $m_{\rm D} = 0.023$,在利用 $D_{\rm ion}$ 探测周跳时,以3 倍的中误 差为检测门限,如果 $D_{\rm ion}$ 的值大于 $3m_{\rm D}$ 即约为 0.07 时,则该历元发生周跳。

对于式(6),如果不考虑电离层残差和随机噪 声的影响影响,那么可写为式(8):

$$D_{\rm ion} = \Delta N_1 - \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2 \, o \tag{8}$$

对于式(8)代入"北斗"卫星 L1 和 L2 的频率可 得当 $\Delta N_1 = \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2 = \frac{763}{590} \Delta N_2$,即当 $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{763k}{590k}$ 时(k 为 整数)或者接近该比值时是检测不出周跳的,例如 周跳对为(763,590)、(9,7)、(5,4)等。同样,对于 式(8)代入 GPS 卫星 L1 和 L2 的频率可得当 $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{763k}{590k}$ 时(k 为整数),该方法也是检测不出周跳的,这 也是该方法本身的缺陷,因此使用电离层残差探测 周跳时一般需要和其他方法联合探测。

3 算法改进与分析

除了电离层残差法本身对特殊周跳不敏感外, 由于其已经消除了接收机和卫星钟差以及几何距离 的影响,因而该方法适用于动态、非差数据的周跳探 测,并且其组合观测值仅由载波生成,理论上具有较 高的探测精度。但是,在实际的数据处理中由于以 下原因并不能达到理想的探测效果:原电离层残差 方法在历元间电离层折射差异较大时很难探测出周 跳,例如电离层较活跃的中午时间(地方时);如果 卫星运动速度较快(如 MEO 卫星^[10]),即使在电离 层平静时期,两个相邻历元的电离层折射延迟差异 仍然很大,容易发生误判,不宜探测出周跳;在卫星 高度角比较低的时候,载波相位数据观测噪声较大, 容易发生误判,不宜探测出周跳。

下面针对电离层残差法在实际数据处理中的缺陷做具体实例分析,分别选择一颗GEO、IGSO、MEO 卫星以及GPS卫星的数据进行处理。数据来源于 2014年11月29日桂林站观测站。图1所示为"北 斗"GEO卫星(5号星)的探测结果,历元间隔30s。



图 1 "北斗"GEO 卫星(5 号星)电离层残差探测结果 Fig. 1 The ionosphere residuals detection results of Beidou GEO satellite (No. 5)

由图 1 可以看出 D_{ion}在许多历元的绝对值都大 于 0.07,例如在第 1 600~1 800 个历元之间其值全 部大于 0.07 甚至接近 0.3,但实际上这一段数据并 未发生周跳。如果按照原方法探测,这段数据全部 会被误判断为周跳,同时如果在这段数据中发生小 周跳,原方法也不能区分出实际发生周跳的历元位 置。同样,图 2 所示为同一天"北斗"IGSO 卫星(7 号星)的探测结果,图 3 为在"北斗"MEO 卫星(11 号星)第 580 个历元的 B1 频点加入 1 周小周跳时 的探测结果,图4 为该天 GPS 5 号星的探测结果。对 "北斗"MEO 卫星(11 号星)加入的周跳表示从第 580 个历元时刻开始后续的所有历元都加上该周跳值。



图 2 "北斗"IGSO 卫星(7 号星)电离层残差探测结果 Fig. 2 The ionosphere residuals detection results of Beidou IGSO satellite(No.7)



图 3 "北斗" MEO 卫星(11 号星) 电离层残差探测结果 Fig. 3 The ionosphere residuals detection results of Beidou MEO satellite(No. 11)



由图 2 可以看出 D_{ion}的绝对值在一些数据段中 甚至接近 0.4,在图 3 和图 4 的一些数据段中分别 接近 1.5 和 2.0,远大于 0.07,但很明显,除了笔者 加入的周跳外这些数据段并未发生周跳。因此,利 用原方法对"北斗" IGSO 卫星、MEO 卫星以及 GPS 卫星数据进行检测时会出现更为严重的误判断情 况,且不易区分出真正的周跳点。根据笔者对数据 长期处理的经验,对于 GEO 卫星而言,这种情况主

 \cdot 553 \cdot

要出现在电离层比较活跃的中午时间(地方时)。 对于 IGSO、MEO 以及 GPS 卫星,还出现在卫星进入 和离开观测视野的时候,即一段完整数据弧段的两 头数据,这主要是由于卫星在进入和离开观测视野 时,其高度角较低,观测噪声较大等原因。实际上 GPS 卫星也属于 MEO 卫星,其观测数据特点和"北 斗" MEO 卫星观测数据类似。

再由图 3 可以看出当在第 580 个历元处发生周 跳时 *D*_{ion}的值反而变小了,再怎么调整判断阈值,原 方法也是不易区分出该周跳发生的实际历元位置。 但是由图 1~4 可以看出,虽然在某段数据中电离层 残差 *D*_{ion}远大于原方法判断阈值,但是其变化趋势 是比较平滑的。因此,我们可以借鉴高次差的高通 滤波原理对式(4)求一次差,就可有效抑制低频信 号并消除常数部分,使周跳的影响放大,如式(9) 所示:

$$\Delta D_{\rm ion}(t) = D_{\rm ion}(t) - D_{\rm ion}(t-1)_{\circ}$$
(9)

限于篇幅,笔者这里只给出了图 1(GEO)、图 2 (IGSO)和图 3(MEO)求差后 ΔD_{ion}的变化趋势,如 图 5~7 所示。



图 5 "北斗"5 号星(GEO) ΔD_{ion} Fig. 5 The improved ionosphere residuals detection results of Beidou satellite 5(GEO)



图 6 "北斗"7 号星(IGSO) ΔD_{ion}

Fig. 6 The improved ionosphere residual detection results of Beidou satellite 7(IGSO)



Fig. 7 The improved ionosphere residual detection results of Beidou satellite 11(MEO)

由图 5 和图 6 可以看出,对于 GEO 卫星和 IG-SO 卫星, ΔD_{ion} 都在很小的一个范围内波动,几乎都 在 0.08 以内。由图 7 可以看出,对于 MEO 卫星, ΔD_{ion} 只有在实际发生周跳的前后来两个历元点跳 变比较大,在没有发生周跳的数据段中也在一个很 小的范围内波动。因此,如果利用 ΔD_{ion} 的值进行判 断,就可以有效探测出实际发生周跳的历元点,且可 以避免原方法的误探测情况。

根据式(6)、式(7)和式(9),笔者将改进后的探测方法设计如下:

$$\left| D_{\rm ion}(t) \right| \ge \mu \delta, \tag{10}$$

$$\left|\Delta D_{\rm ion}(t)\right| \ge k\delta,\tag{11}$$

$$\left|\Delta D_{\rm ion}(t+1)\right| \ge k\delta_{\circ} \tag{12}$$

先判断式(11)和式(12)是否同时成立,如成立 且两式中的 ΔD_{ion} 接近[1:(-1)]的比例时,则该历 元发生周跳,否则该历元没有发生周跳。如果出现 连续的若干历元数据使得式(10)~(12)同时成立, 那么说明该段数据的电离层跳变过于严重或者观测 数据质量过于粗糙,可直接予以剔除,然后重新建立 数据弧段。式中的 $\delta \to D_{ion}$ 的中误差,和式(7)中的 m_{D} 相等。

GEO 和 IGSO 卫星运行速度较慢,其前后历元 电离层折射差异较小,在实际的数据处理中将 μ 和 k均取4即可。由于 MEO 卫星和 GPS 卫星的运动 速度较快,其前后电离层折射差异相对较大,因此在 数据处理中可将 μ 取5或者更大,k取5即可。当 然,如果数据采样间隔较大的话, μ 和k的取值也可 以适当地调大。

4 改进方法的有效性验证

为了证明改进方法的有效性和实用性,笔者对运动速度较快的"北斗"11 号 MEO 卫星模拟加入周

跳。同时由图 3 所示,在这段数据第 600 个历元左 右换算成地方时恰好是中午 13 时左右,电离层开始 变得比较活跃,而且该卫星的观测数据即将结束即 该星将要离开观测视野,其高度角较低,观测数据质 量较为粗糙。因此,为检验改进方法的优势,笔者选 择在这段粗糙的数据中加入周跳,同时也选择加入 不宜探测的小周跳,加入的周跳对和探测结果如表 1 所示,探测效果如图 8 和图 9 所示。

表1 周跳探测结果

Tab. 1 The cycle slip detection results				
历元	加入的 周跳对	改进方法 (µ=6,k=5)	原方法	
			阈值为0.07	阈值为 0.2
420	(0,-1)	成功探测出 实际周跳	190 ~ 628 历元全部 为周跳点, 未成功探 測出具体 周跳	只探420 历元 約周 439 ~ 599、603 ~ 628 全部未成 功探周跳 部周跳
500	(1,1)	成功探测出 实际周跳		
560	(0,1)	成功探测出 实际周跳		
580	(-1,0)	成功探测出 实际周跳		
610	(1,0)	成功探测出 实际周跳		







results after the cycle slip added

为了说明原方法采用简单阈值法的缺陷,笔者 在表1也试探性地将阈值设置为0.2并统计其探测 结果。

由图 8 可以看出在实际发生周跳时的 *D*_{ion}并未 明显大于未发生周跳时的 *D*_{ion},反而在某些周跳点 变得更小了。但是由图 9 可以看出 Δ*D*_{ion}只在实际 发生周跳的前后两个历元发生了比较大的跳变,在 未发生周跳时其值只在 0 附近波动。再由表 1 可以 看出改进后的方法非常有效地探测出了实际发生周 跳的历元点,并且没有出现误判的情况,而原方法在 笔者试探性的调整阈值后仍不能完全有效探测出实 际周跳,且在很多历元都发生了误判情况,区分不出 周跳发生的实际历元位置。

通过以上分析可以看出:原方法在利用简单的 阈值进行周跳探测时并不能准确有效地探测出实际 周跳,而且会经常出现误探测或漏探测情况;但是改 进后的方法除了本身对特殊比例的周跳不敏感外, 可以有效并稳定地探测出大小周跳,并且在观测数 据质量不佳时依然可以非常有效地探测出1周的小 周跳,是一种比较实用的周跳探测方法。

5 结束语

本文分析了传统电离层残差方法在实际周跳探 测时的缺陷,并根据电离层变化特点以及在观测数 据质量比较粗糙时其检测量的变化特点,对原方法 进行了改进,并验证了改进后方法优于传统方法的 探测效果。改进方法不论对"北斗"卫星数据还是 对 GPS 卫星数据均有良好的探测效果,并且改进后 的方法可根据"北斗"卫星不同星座数据的特点选 择不同的参数,以达到较优的探测效果。改进后的 方法不仅在数据比较平稳时可以有效探测出大小周 跳,而且能在电离层比较活跃以及观测数据质量不 佳时准确探测出小周跳,且避免了原方法经常出现 误判断的情况。

本文主要是针对电离层残差法在实际数据处理 中对小周跳不敏感、易出现误探测和漏探测等缺陷 进行改进,但是其本身对特殊比例的周跳不敏感,需 要和其他方法联合使用才能弥补此缺陷,如 MW 方 法、相位减伪距法等。

参考文献:

[1] WELLENHOF H, LICHTENEGGER, WASLE. 全球卫星

导航系统 GPS、GLONASS、Galileo 及其他系统[M]. 程鹏飞,蔡艳辉,文汉江,等,译.北京:测绘出版社, 2009:146-162.

WELLENHOF H, LICHTENEGGER, WASLE. GNSS global navigation satellite systems, GPS, GLONASS, Galileo & more [M]. Translated by CHENG Pengfei, CAI Yanhui, WEN Hanjiang, et al. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009:146-162. (in Chinese)

- [2] CAI C S, LIU Z Z, XIA P F, et al. Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity[J]. GPS Soluts, 2013, 17(2):247–260.
- [3] LI J L, YANG Y X, XU J Y, et al. GNSS multi-carrier fast partial ambiguity resolution strategy tested with real BDS/ GPS dual- and triple-frequency observations [J]. GPS Soluts, 2015, 19(1):5-13.
- [4] 张成军,许其凤,李作虎.对伪距/相位组合量探测与修复 周跳算法的改进[J].测绘学报,2009,38(5):402-407.
 ZHANG Chenjun, XU Qifeng, LI Zuohu. Improving method of cycle slip detection and correction based on combination of GPS pseudo range and carrier phase observations
 [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38 (5):402-407. (in Chinese)
- [5] BLEWITT G. An automatic editing algorithm for GPS data
 [J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17 (3) :199–202.
- [6] 蔡昌盛,高井祥.GPS 周跳探测及修复的小波变换法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007,32(1):39-42.
 CAI Changsheng, GAO Jingxiang. Cycle slip detection and correction of GPS data by wavelet transform [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,32(1):39-42. (in Chinese)
- [7] 刘宁,熊永良,徐韶光.利用改进的TurboEdit 算法与 Chebyshev 多项式探测与修复周跳[J].武汉大学学报 (信息科学版),2011,36(12):1500-1503.

LIU Ning, XIONG Yongliang, XU Shaoguang. Detection and repair of cycle slips using improved TurboEdit algorithm and Chebyshev polynomial methed[J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36 (12):1500-1503. (in Chinese)

[8] 马煦,常青,侯俊.综合利用电离层残差法和载波相位 变化率法探测并修复周跳[J].电讯技术,2005,45 (1):115-119. MA Xu, CHANG Qing, HOU Jun. Detection and reparation for cycle slips using Ionosphere residual error method and carrier phase rate method [J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(1):115-119. (in Chinese)

 [9] 戴连君,唐涛,蔡伯根.基于自适应粒子滤波的北斗卫 星信号周跳探测[J].吉林大学学报(工学版),2013, 43(4):1146-1152.

DAI Lianjun, TANG Tao, CAI Baigen. Cycle slip detection for BeiDou satellite based on adaptive particle filtering [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4):1146-1152. (in Chinese)

[10] ZHOU S S,CAO Y L,ZHOU J H. Positioning accuracy assessment for the 4GEO/5IGSO/2MEO constellation of COMPASS[J]. Science China,2012,55(12):2290–2299.

作者简介:



蔡成林(1969—),男,湖南娄底人,博 士,教授、硕士生导师,主要研究方向为卫星 导航与无线通信;

CAI Chenglin was born in Loudi, Hunan Province, in 1969. He is now a professor with the Ph. D. degree and also the instructor of graduate students. His research concerns satel-

lite navigation and wireless communication.

Email: chengcailin@126.com

王亮亮(1991一),男,宁夏固原人,硕士研究生,主要研 究方向为卫星导航与数据处理;

WANG Liangliang was born in Guyuan, Ningxia Huizu Autonomous Region, in 1991. He is now a graduate student. His research concerns satellite navigation and data processing.

Email: liangliangwang_nx@ 163. com

王金辉(1979—),男,广西南宁人,讲师,主要从事组合 导航与数据处理研究;

WANG Jinhui was born in Nanning, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region, in 1979. He is now a lecturer. His research concerns integrated navigation and data processing.

秦 懿(1989—),男,四川广安人,硕士研究生,主要从 事电离层以及卫星 DCB 解算研究。

QIN Yi was born in Guang'an, Sichuan Province, in 1989. He is now a graduate student. His research concerns ionosphere and satellite DCB solution.