

多频数据组合在周跳探测和修复上的应用

熊伟¹ 伍岳¹ 孙振冰² 王泽民¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 广东省汕尾市红海湾经济开发区工委,汕尾市红海湾田乾人民中路,516622)

摘要:利用模拟的 L_5 观测数据,结合传统的伪距/载波组合法,对周跳的探测与修复进行了实例计算,并与双频组合观测值的周跳探测方法进行了比较。结果证明,不管对大周跳还是小周跳,该方法均能在单历元间准确地探测出各个频率上发生的周跳,较之双频组合观测值的探测方法具有更大的优越性。
关键词:组合观测值;数据模拟;周跳探测;伪距/载波组合法
中图法分类号:P228.41

随着 GPS 现代化和 Galileo 系统的逐步实施,将多频组合观测值的一些组合特性应用到周跳的探测和修复已成为可能。本文通过多频载波相位组合观测值的一些长波长特性,结合传统的伪距/载波组合法探测周跳原理,对周跳的探测与修复进行了研究。

1 L_5 载波相位观测值的模拟

设 $\varphi_1^{t_1}$ 、 $\varphi_2^{t_1}$ 、 $\varphi_3^{t_1}$ 为历元 t_1 时刻 L_1 、 L_2 、 L_5 载波的相位观测值, $\varphi_1^{t_2}$ 、 $\varphi_2^{t_2}$ 、 $\varphi_3^{t_2}$ 为历元 t_2 时刻 L_1 、 L_2 、 L_5 载波的相位观测值。在 GPS 观测中,对于 L_1 、 L_2 、 L_5 载波,可分别列出历元间单差的方程为:

$$\lambda_1(\varphi_1^{t_2} - \varphi_1^{t_1}) = (\rho^{t_2} - \rho^{t_1}) + c\Delta\delta^{t_2-t_1} + \Delta I_1^{t_2-t_1} + \Delta T_1^{t_2-t_1} + \Delta \epsilon_1^{t_2-t_1} \quad (1)$$

$$\lambda_2(\varphi_2^{t_2} - \varphi_2^{t_1}) = (\rho^{t_2} - \rho^{t_1}) + c\Delta\delta^{t_2-t_1} + \Delta I_2^{t_2-t_1} + \Delta T_2^{t_2-t_1} + \Delta \epsilon_2^{t_2-t_1} \quad (2)$$

$$\lambda_3(\varphi_3^{t_2} - \varphi_3^{t_1}) = (\rho^{t_2} - \rho^{t_1}) + c\Delta\delta^{t_2-t_1} + \Delta I_3^{t_2-t_1} + \Delta T_3^{t_2-t_1} + \Delta \epsilon_3^{t_2-t_1} \quad (3)$$

式中, $\Delta\delta^{t_2-t_1}$ 为接收机钟差与卫星钟差的单差; $\Delta I_i^{t_2-t_1}$ 、 $\Delta T_i^{t_2-t_1}$ 、 $\Delta \epsilon_i^{t_2-t_1}$ ($i=1,2,3$) 分别为电离层延迟的单差、对流层延迟的单差和随机噪声的单差。在同一历元 t 时刻,同一台 GPS 接收机 L_1 、

L_2 、 L_5 载波上对同一颗卫星观测时,接收机钟差与卫星钟差、对流层延迟、接收机与卫星距离是相等的,故将式(2)、式(3)分别减去式(1)得:

$$\lambda_i \Delta\varphi_i - \Delta I_i^{t_2-t_1} = \lambda_i \Delta\varphi_i - \Delta I_i^{t_2-t_1} \quad (i=2,3) \quad (4)$$

由 GPS 各频率间电离层的误差关系 $\Delta I_i^{t_2-t_1} = f_1^2 \Delta I_1^{t_2-t_1} - t_{11} / f_i^2$ ($i=2,3$),可得:

$$\Delta\varphi_i = [\lambda_i \Delta\varphi_1 - (1 - f_1^2 / f_i^2) \Delta I_1^{t_2-t_1}] / \lambda_i \quad (i=2,3) \quad (5)$$

式中, f_i 为载波的频率。利用 GPS 双频载波求电离层误差,有:

$$\Delta I_1^{t_2-t_1} = \lambda_1 \cdot [\varphi_1^{t_2-t_1} - f_1 / f_2 \varphi_2^{t_2-t_1}] \left[\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right] = \lambda_1 \cdot \left[\Delta\varphi_1 - \frac{f_1}{f_2} \Delta\varphi_2 \right] \left[\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right] \quad (6)$$

将式(6)带入式(5),即可求得模拟的 L_2 、 L_5 在历元间的观测值:

$$\Delta\varphi_i = \frac{\lambda_1}{\lambda_i} \left[\Delta\varphi_1 - \left(1 - \frac{f_1^2}{f_i^2} \right) \left(\Delta\varphi_1 - \frac{f_1}{f_2} \Delta\varphi_2 \right) \cdot \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \right] \quad (i=2,3) \quad (7)$$

对于随机噪声,由于载波相位的噪声一般为波长的 1%,可以简单地利用程序来产生一组 $[-0.01, +0.01]$ 区间内的随机数来模拟观测噪声,然后分别加到每个历元的数据上。

2 多频伪距/载波组合数据对周跳探测的原理

通过载波与伪距观测值的组合可以组成周跳的检验量。载波相位和伪距码的观测方程可写为:

$$R = \rho + dI_R + dT_R + dm_R + \epsilon_R$$
$$\lambda_{\varphi} = \rho + \lambda N + dI_{\varphi} + dT_{\varphi} + dm_{\varphi} + \epsilon_{\varphi}$$

以上两式求差可得:

$$N = [\lambda_{\varphi} - R - (dI_{\varphi} - dI_R) - (dm_{\varphi} - dm_R) - (\epsilon_{\varphi} - \epsilon_R)]/\lambda$$

(8)

当历元间的电离层延迟和多路径效应变化较小时,将式(8)在历元间相减,可以得到周跳的估值:

$$\Delta N = N(t_2) - N(t_1) = \varphi(t_2) - \varphi(t_1) - \frac{R(t_2) - R(t_1)}{\lambda}$$

(9)

式(9)的估计精度取决于电离层延迟和多路径效应在历元间的变化,以及伪距和载波相位测量的量测噪声与载波波长 λ 的大小,因此,利用该方法探测周跳的好坏直接取决于采样率的大小和组合

波长的长度,由此可导出多频伪距/载波组合探测周跳的公式为:

$$\Delta N_c = N_c(t_2) - N_c(t_1) = \varphi_c(t_2) - \varphi_c(t_1) - [R(t_2) - R(t_1)]/\lambda_c$$

(10)

式中, ΔN_c 为载波相位组合观测值的周跳检验量; φ_c 和 λ_c 分别为载波相位组合观测值和组合观测值的波长。

利用组合观测值的选取标准^[1],选用了以下三个波长较长的组合。假设 L_1 双差观测值的电离层误差值为 0.3 m ^[2], I_c 为组合观测值的电离层误差, σ_c 是假设 $\sigma_L=0.002\text{ m}$ 时组合观测值在距离上的观测噪声。这三组组合值的特性如表1所示,其中, α_{λ} 为波长参数,即组合观测值波长与 L_5 载波波长之比; α_{ion} 为电离层系数因子,即在以 m 为单位的组合观测值的电离层折射误差与 L_1 载波观测值上的电离层折射误差之比。可以看到,(0,1,-1)是组合特性最好的一组组合;(3,1,-3)和(-1,8,-7)的电离层系数因子都比较大,但这两组组合的波长都比较长,而且在双差之后,电离层和对流层残差的影响会变得很小,所以也适合用来探测周跳。

表 1 GPS(0,1,-1)、(-3,1,3)、(-1,8,-7)组合观测值的属性

Tab.1 Attribution of GPS (0, 1, -1), (-3, 1, 3), (-1, 8, -7) Combination Observation

(i, j, k)	f/MHz	λ/m	α_{λ}	I_c/m	α_{ion}	σ_c/m
(0,1,-1)	51.15	5.86	23.00	-0.515 7	-1.719	0.066
(-3,1,3)	30.69	9.77	38.33	35.431 2	118.104	0.393
(-1,8,-7)	10.23	29.31	115.00	-4.954 8	-16.516	2.525

在实际探测和修复过程中,通过式(10)计算出三种组合探测出来的周跳值后,将其代入下式:

$$\begin{cases} a_1 N_1 + b_1 N_2 + c_1 N_3 = n_1 \\ a_2 N_1 + b_2 N_2 + c_2 N_3 = n_2 \\ a_3 N_1 + b_3 N_2 + c_3 N_3 = n_3 \end{cases}$$

(11)

式中, n_1 、 n_2 、 n_3 为探测出的周跳值; N_1 、 N_2 、 N_3 为三个载波上分别发生的周跳值; a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1,2,3$)为三种组合观测值的系数。求解该方程组,即可求得每个载波上分别出现的周跳值。

3 周跳探测的算例验证

本文选取了一段 15 s 采样率的GPS双频载波观测数据进行周跳的探测,原始观测数据是没有周跳的,通过模拟 L_5 观测值,并在各个频率上加入不同大小的周跳来检验探测的结果。在使用组合观测值的情况下,当原始载波观测值存在周跳时,将在组合观测值中被放大。同时将探测结果与现有的周跳探测方法进行比较,由于目前所

有的周跳探测方法中双频组合值^[1]的探测效果是最好的,故选用该方法进行比较。

3.1 小周跳的探测

3.1.1 单个频率上有小周跳的情况

若在 L_1 载波相位值第49个历元发生-1周的周跳,则理论上(0,1,-1)、(-3,1,3)、(-1,8,-7)组合观测值上的周跳值分别为0周、3周和1周。由图1(a)可以看出,实际探测出来的周跳值取整后与理论值是相同的。

3.1.2 两个频率上有小周跳的情况

若在 L_1 和 L_2 载波相位值第49个历元都发生-1周的周跳,则理论上组合(0,1,-1)有-1周的周跳,组合(-3,1,3)有2周的周跳,组合(-1,8,-7)有-7周的周跳,如图1(b)所示。

3.2 大周跳的探测

3.2.1 L_1 上-1周、 L_2 上-100周的情况

若 L_1 载波在第49个历元有-1周的周跳, L_2 载波有-100周的周跳,则理论上组合(0,1,-1)有-100周的周跳,组合(-3,1,3)有-97周

的周跳,组合 $(-1,8,-7)$ 有一799周的周跳,如图2(a)所示。

3.2.2 L_1 上-63周、 L_2 上-105周的情况

若 L_1 载波在第49个历元有-63周的周跳, L_2 载波有-105周的周跳,则理论上组合 $(0,1,-1)$ 有-105周的周跳,组合 $(-3,1,3)$ 有84周的周跳,组合 $(-1,8,-7)$ 有-777周的周跳,如图2(b)所示。

从图1和图2中的数据可以看出,在没有周跳发生的情况下,由多频伪距/载波法形成的周跳检验量的波动在 $[-0.2,0.2]$ 周以内,这主要是因为所选用的几组多频组合观测值的波长都很长,而且在求差之后,电离层延迟、对流层延迟等各种误差的影响都被极大地削弱了,此时在没有周跳时受随机误差的影响就更小,这对提高周跳探测

的准确度是非常有利的。从以上算例中也可以看出,不管对小周跳还是大周跳,实际探测出的值与理论值相差都在0.1周以内。

3.3 分别选取一种小周跳和大周跳的情况

用 $(1,-1)$ 和 $(-7,9)$ 的双频组合值进行探测,所得图形如图3所示。

由于 $(1,-1)$ 组合的波长较短,只有0.58 m,它受各种误差的影响比较大,由它组成的周跳检验量的精度会比较低。从图3可以看出,在没有周跳的情况下,它的波动最大已达到了0.7周,因此难以完全探测出一些小周跳,完全修复则更不可能。在一般的测量中, $\Delta N_{1,-1}$ 的估计精度都比较低,当 ΔN_1 和 ΔN_2 分别为9和7的倍数,且 $\Delta N_{1,-1}$ 的估计精度为2周时,还会出现多值性问题^[3],这对周跳的探测和修复是非常不利的。

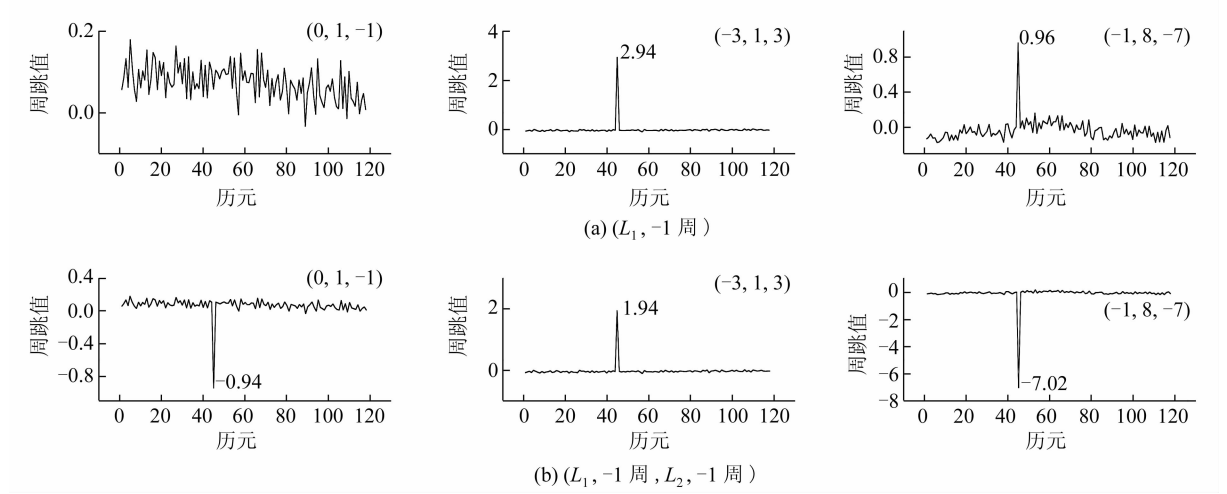


图1 多频组合值对小周跳的探测

Fig. 1 Detection of Small Cycle Slips in Use of Multi-frequency Combination Observation

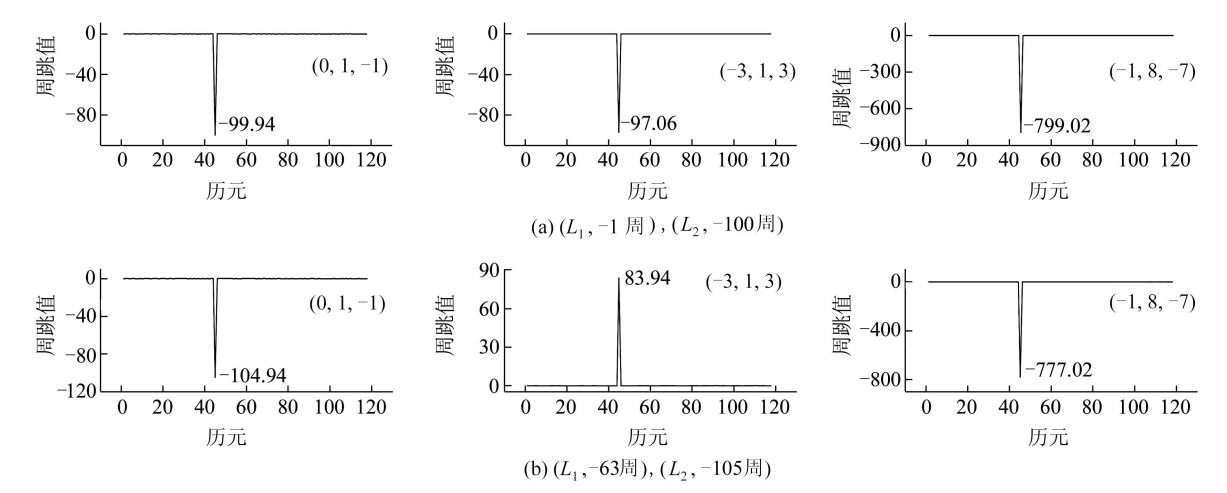


图2 多频组合值对大周跳的探测

Fig. 2 Detection of Large Cycle Slips in Use of Multi-frequency Combination Observation

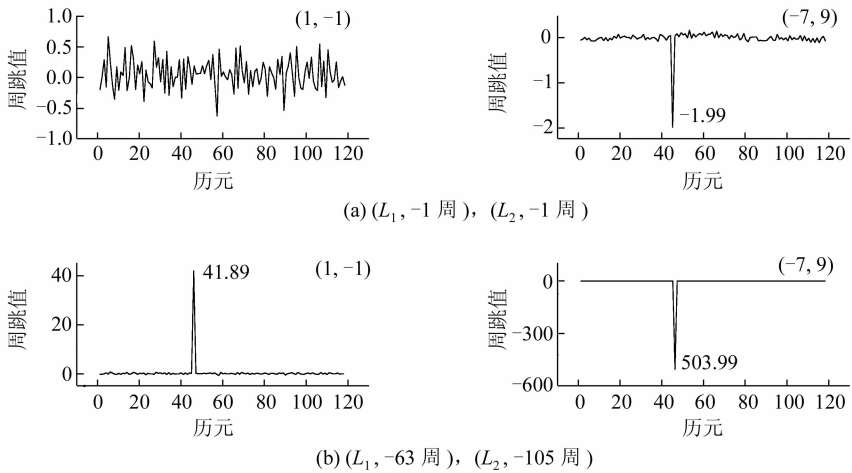


图 3 双频组合值对小周跳的探测
Fig. 3 Detection of Small Cycle Slips in Use of Double-Frequency Combination Observation

参 考 文 献

[1] 韩绍伟. GPS 组合观测值理论及应用[J]. 测绘学报, 1995, 24(2): 8-13
[2] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1997
[3] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003
[4] 杨剑. 利用 GPS 三频组合观测值求解模糊度理论及算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004
[5] 梁开龙, 张玉册. 现代化 GPS 信号的宽巷组合及其

求解模糊度研究[J]. 测绘通报, 2002(4): 1-3
[6] 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2004
[7] Han Shaowei, Chris R. The Impact of Two Additional Civilian GPS Frequencies on Ambiguity Resolution Strategies[OL]. <http://www.gmat.unsw.edu.au>, 1999

第一作者简介: 熊伟, 硕士。现主要从事现代卫星导航及其应用研究。
E-mail: wxiong19820201@yahoo.com.cn

Application of Multi-frequency Combination Observation
in Cycle Slip Detection and Restoration

XIONG Wei¹ WU Yue¹ SUN Zhenbing² WANG Zemin¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Committee of Red Gulf Economic Development Area, Shanwei, Guangdong, Middle Renmin Road, Tianqian, Red Gulf, Shanwei 516622, China)

Abstract: The simulate L_5 observation is used, combined with the traditional pseudorange/carrier phase combination method, to compute example of cycle slip detection and restoration, and is compared with the cycle clip detection method of the double frequency combination observation. The result shows that not only to large cycle slip but also to small cycle slip, can be precisely detected in each frequency at single epoch.
Key words: observation combination; data simulation; cycle slip detection; pseudorange/carrier phase combination method

About the first author: XIONG Wei, master. He is engaged in modern satellite navigation and its application.
E-mail: wxiong19820201@yahoo.com.cn