

文章编号: 0494-0911(2011) 04-0001-03

中图分类号: P228 4

文献标识码: B

两种周跳探测方法在北斗三频中的应用比较研究

罗 腾,白征东,过静琚

(清华大学 土木工程系,北京 100084)

Comparative Study of Two Kinds of Cycle Slip Detection Methods in the Application of Beidou Tri-frequency

LUO Teng BA I Zhenglou GUO Jingjun

摘要: 以多频组合观测值理论为基础,利用北斗三频实测数据,对比分析多频伪距/载波相位组合法和 MW & Geometry-free组合法对北斗三频载波相位周跳的探测情况。结果表明,两种方法不但探测精度较高,而且对大小周跳都可以快速准确地探测出来,都可以应用于三频载波相位的周跳探测中。

关键词: 北斗; 伪距/载波相位组合法; MW 组合; Geometry-free组合; 周跳探测

一、引言

卫星信号接收机会由于自身的故障或信号的意外中断等原因使接收机的整周计数发生突变,即周跳。而周跳的存在又会引起模糊度参数求解错误、基线解算精度不高等一系列问题,在进行高精度基线解算前必须对周跳进行探测和修复。传统的周跳探测方法有高次差法、多项式拟合法、电离层残差法^[1]以及 Kalman 滤波方法^[1-2]等。而随着新一代卫星导航定位系统的推广应用,越来越多的学者开始研究利用多频观测数据进行周跳的探测与修复,并提出了一些有效的方法。本文对比分析了多频伪距/载波相位组合法^[3]和 MW & Geometry-free组合法^[4]对北斗三频实测载波数据周跳的探测情况,并总结了两种方法的特点。

二、多频伪距/载波相位组合法

多频伪距/载波相位组合法周跳探测公式为

$$\Delta N_c = N_c(t_2) - N_c(t_1) = \frac{\phi_c(t_2) - \phi_c(t_1) - \frac{R(t_2) - R(t_1)}{\lambda_c}}{\lambda_c} \quad (1)$$

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

根据组合观测值的选取标准^[5], 选取 (-1, -5, 6)、(1, 4, -5) 和 (-4, 1, 4) 3组系数组合对北斗三频原始载波数据进行周跳的探测研究, 组合观测值的属性如表 1 所示。

表 1 组合观测值属性

(i, j, k)	f/MHz	λ/m	a_{ion}	ϵ/m
(-4, 1, 4)	36 828	8 140	93 925	0 442
(-1, -5, 6)	14 322	20 932	-8 963	1 374
(1, 4, -5)	47 058	6 371	0 652	0 345

表中, f 为组合观测值频率; λ 为组合观测值波长; a_{ion} 为电离层系数因子, 是以 m 为单位的组合观测值电离层误差与 L1 载波电离层误差之比; ϵ 为假设各频率噪声误差为 0.002m 时组合观测值的噪声误差。(后面表 2 中各个参数的含义与表 1 相同)

通过式 (1) 计算探测出 3 种组合的组合周跳值 n_1 、 n_2 、 n_3 , 得到下列方程

$$\left. \begin{aligned} a_1 \Delta N_1 + b_1 \Delta N_2 + c_1 \Delta N_3 &= n_1 \\ a_2 \Delta N_1 + b_2 \Delta N_2 + c_2 \Delta N_3 &= n_2 \\ a_3 \Delta N_1 + b_3 \Delta N_2 + c_3 \Delta N_3 &= n_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, n_1 、 n_2 、 n_3 为探测出的各组合周跳值; ΔN_1 、 ΔN_2 、 ΔN_3 为 3 个载波上的周跳值; a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1, 2, 3$) 为 3 种组合观测值的组合系数。

求解该线性方程组即可得到每个载波相位上的周跳值。

三、MW & Geometry-free组合法

1 MW 组合^[6]

MW 组合又称为 wide phase minus narrow pseudo range, 是利用宽巷载波相位与窄巷伪距的差值组成的组合观测值。三频 MW 组合的表达式为

收稿日期: 2010-05-17

作者简介: 罗 腾(1986—),男,陕西延安人,硕士,主要从事卫星数据处理的研究。

$$N_{ij} = \frac{f_i - f_j}{f_i + f_j} \left(\frac{P_i}{\lambda_i} + \frac{P_j}{\lambda_j} \right) - (\phi_i - \phi_j) \quad (3)$$

式中, $N_{ij} = N_i - N_j$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; i \neq j$)。

组合后的波长 $\lambda_{ij} = 1/\lambda_i - 1/\lambda_j$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; i \neq j$), 3个频率可以构成3个组合, 其中任意两个线性无关。MW组合的属性如表2所示。

表2 MW组合的属性

MW组合	f/MHz	λ/m	a_{ion}	ε/m
N_{w12}	353.958	0.847	1.293	0.011
N_{w13}	292.578	1.025	1.231	0.014
N_{w32}	61.380	4.884	1.591	0.057

2 Geometry-free组合^[6]

三频载波相位组成的 Geometry-free组合为

$$L_{abc} = aL_1 + bL_2 + cL_3 =$$

$$a\lambda_1 N_1 + b\lambda_2 N_2 + c\lambda_3 N_3 - \left(a + b\frac{f_1^2}{f_2^2} + c\frac{f_1^2}{f_3^2} \right) I + a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2 + c\varepsilon_3 \quad (4)$$

式中, $a + b + c = 0$ 以消除站星距离, 且 a, b, c 不全为零; ε_i 为观测噪声, 单位为 m 。

将上式在历元间求差, 同时消除电离层和噪声, 得到 Geometry-free组合的周跳为

$$\Delta N_{abc}(t) = \begin{cases} \frac{[L_{abc}(t) - L_{abc}(t-1)]}{a\lambda_1} = \Delta N_1(t) + \left(\frac{b\lambda_2}{a\lambda_1}\right)\Delta N_2(t) + \left(\frac{c\lambda_3}{a\lambda_1}\right)\Delta N_3(t) \quad (a \neq 0) \\ \frac{[L_{abc}(t) - L_{abc}(t-1)]}{b\lambda_2} = \Delta N_2(t) + \left(\frac{c\lambda_3}{b\lambda_2}\right)\Delta N_3(t) \quad (a = 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\Delta N_i(t) = N_i(t) - N_i(t-1)$ ($i = 1, 2, 3$)。

3 两种方法组合

根据三频周跳探测检验量的选取原则^[5], 最终选取 $N_{-1.10}, N_{-1.01}$ 和 N_{w32} 组成组合观测值, 组合周跳探测方程为

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \Delta N_2 &= n_1 \\ \Delta N_1 - \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \Delta N_3 &= n_2 \\ -\Delta N_2 + \Delta N_3 &= n_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, n_1, n_2, n_3 为探测出的各组合周跳值; $\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_3$ 为3个载波上的周跳值。

四、周跳探测应用实例对比

将多频伪距/载波相位组合法记作方法1; MW & Geometry-free组合法记作方法2并取采样率为1的北斗三频数据进行周跳探测对比分析。

1 无周跳时探测情况对比

当各频率载波相位数据都无周跳时, 方法1的周跳检测量波动范围约为 $[-0.08, 0.08]$ 周, 如图1(a)所示; 方法2的周跳检测量波动范围约为 $[-0.04, 0.04]$ 周, 如图1(b)所示, 其中 Geometry-free组合的波动范围更是小到约为 $[-0.02, 0.02]$ 周。这主要是因为方法2是一组几何无关的线性组合, 它不但消除了星地距离, 还可以消除与频率无关的误差项, 同时在历元间求差之后, 各种与频率有关的误差也能够大大削弱。

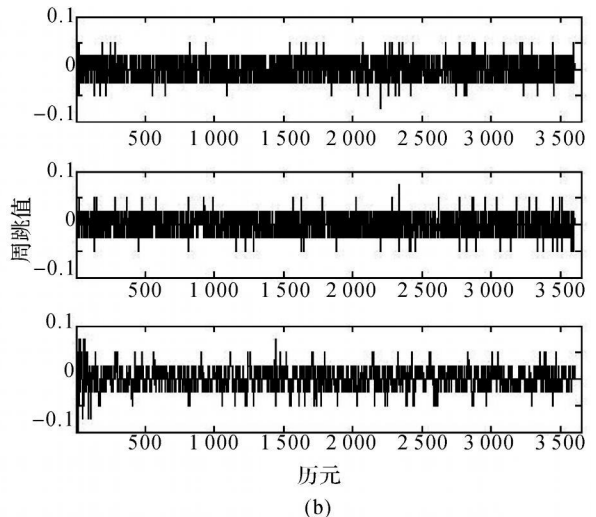
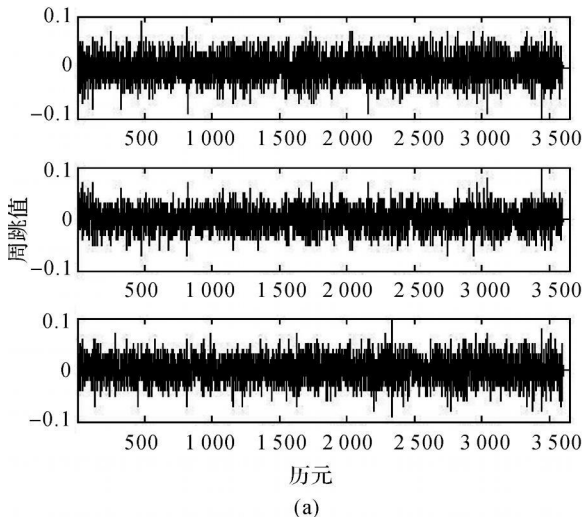


图1 无周跳时两种方法的周跳探测情况对比

2 小周跳时探测情况对比

若在 L1 载波第 20~29 个历元上加 -1 周的小周跳 (模拟周跳), 则理论上方法 1 三种组合相应历元上的周跳值应分别为 1 周、-1 周和 4 周, 方法 2 三种组合相应历元上的周跳值应分别为 -1 周、-1 周和 0 周。最终的探测结果见图 2 其中 (a) 为方法 1 探测结果, (b) 为方法 2 探测结果, 两种方法都可以快速准确地确定出周跳的大小和位置。

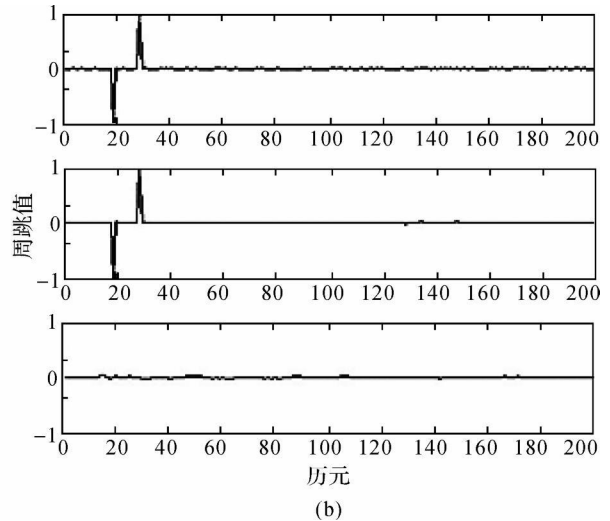
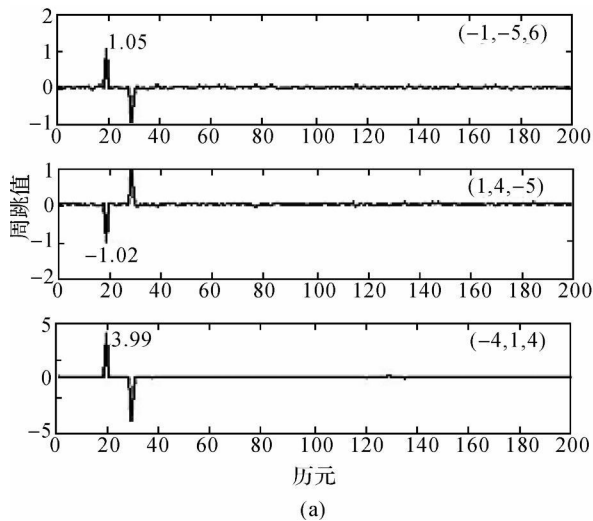


图 2 小周跳时两种方法的周跳探测情况对比

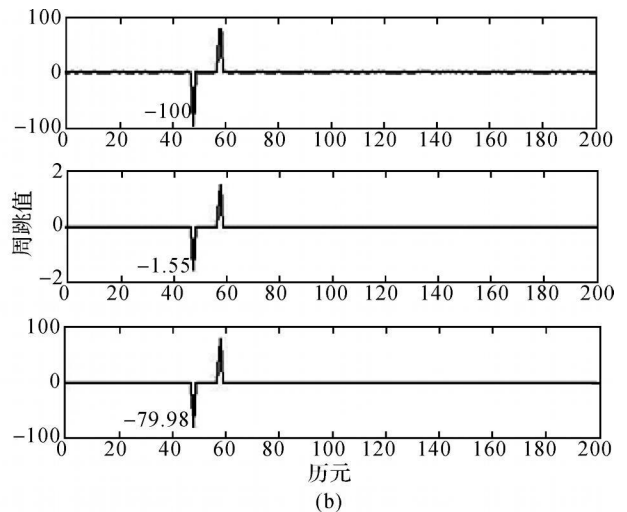
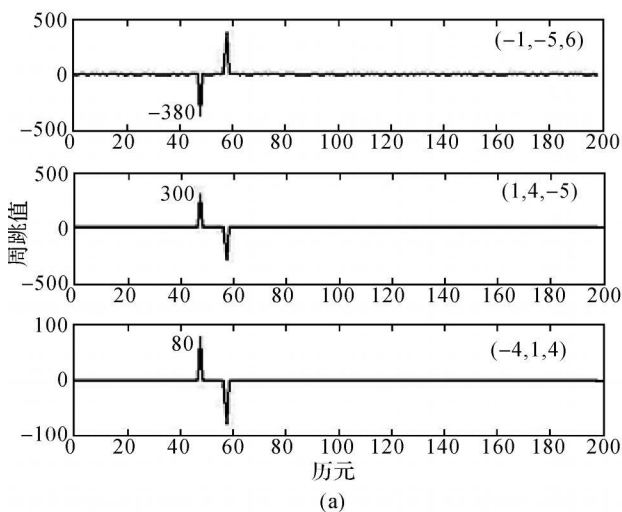


图 3 大周跳时两种方法的周跳探测情况对比

3 大周跳时探测情况对比

另外, 若在 L1 载波第 50~59 个历元上加 -100 周的大周跳, 在 L3 载波第 50~59 个历元上加 -80 周的大周跳, 则理论上方法 1 三种组合的相应历元上周跳值应分别为 -380 周、300 周和 80 周, 方法 2 三种组合相应历元上周跳值应分别为 -100 周、-1.5 周和 -80 周。最终的探测结果如图 3 所示, 其中 (a) 为方法 1 探测结果, (b) 为方法 2 探测结果, 与小周跳情况相似, 两种方法也都可以快速准确地确定出周跳的大小和位置。

五、结束语

本文利用北斗三频数据, 对比分析了多频伪距/载波相位组合法和 MW & Geometry-free 组合法在北斗三频原始载波相位周跳的探测情况。从算例的对比分析中可知, 相对于传统的双频组合法,

两种方法的探测精度都比较高, 多频伪距/载波相位组合法的周跳检测波动量约为 $[-0.08, 0.08]$ 周, MW & Geometry-free 组合法的周跳检测波动量约为 $[-0.04, 0.04]$ 周。由于 3 种组合的探测精度都很高, 不存在组合周跳同时为零的情况, 所以两

(下转第 13 页)

根据点位中误差公式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}} \\ \sigma_y &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{n}} \\ \sigma_z &= \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i^2}{n}} \\ \sigma_p^2 &= \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

可得到在距离为 40 m 和 80 m 时扫描仪的点位精度(如表 3 所示)。

表 3 点位精度 mm

距离 /m	σ_x	σ_y	σ_z	σ_p
40	±3.1	±2.2	±2.8	±4.7
80	±3.9	±3.4	±3.6	±6.3

由以上分析可知,在实际测量环境下 ScanStation2 型扫描仪的点位精度,在距离为 40 m 时为 ±4.7 mm,符合厂家给出的 ±6 mm/50 m 的精度指标;在距离为 80 m 时为 ±6.3 mm,这也符合大部分建筑物建模的精度要求。

五、结束语

通过对 ScanStation2 地面三维激光扫描仪进行

的实地测试和精度评定,表明在实际工作环境中该仪器达到了厂家所提供的精度指标。同时,研究结论可为诸如矿区下沉、盆地监测、公路与桥梁测量、土石方工程等特殊测绘工作提供一定的经验和借鉴。

参考文献:

- [1] 丁延辉. 地面三维激光数据配准研究 [J]. 测绘通报, 2009(2): 57-59
- [2] 朱凌. 地面三维激光扫描标靶研究 [J]. 激光杂志, 2008 29(1): 33-35
- [3] 官兰云. 地面三维激光扫描数据处理中的若干问题研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008
- [4] 冯文灏. 非地形摄影测量 [M]. 北京: 测绘出版社, 1985
- [5] 鲁铁定, 周世健, 张立亭, 等. 基于整体最小二乘的地面激光扫描标靶球定位方法 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(4): 102-105
- [6] 施贵刚, 程效军, 官云兰, 等. 地面三维激光扫描点云配准的最佳距离 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009 30(2): 197-200
- [7] 韩光瞬, 冯仲科, 刘永霞, 等. 三维激光扫描系统测树原理及精度分析 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(12): 187-190
- [8] 何文峰. 大型场景三维重建中的深度图像配准 [D]. 北京: 北京大学, 2004
- [9] 郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析 [J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 32-34

(上接第 3 页)

种方法对任何情况下的周跳都可以快速准确地探测出来。

另外,多频伪距载波相位组合法的探测精度主要取决于采样率大小、载波相位波长大小以及噪声误差大小;而 MW & Geometry-free 组合法在消除了星地距离的同时,也消除了与频率无关的误差项,它是几何无关组合,可以应用于静态和动态的数据处理中,但由于其组合系数为小数,在求解周跳值进行精度取舍时可能会有一定的影响。

参考文献:

- [1] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2003

- [2] 王国富, 朱建军. 具有随机观测矩阵的线性系统的 Kalman 滤波 [J]. 测绘通报, 2004(3): 18-20
- [3] 刘旭春, 伍岳, 黄学斌, 等. 多频组合数据在原始载波观测值预处理中的应用 [J]. 测绘通报, 2007(2): 14-17
- [4] 范建军, 王飞雪, 郭桂蓉. GPS 三频非差观测数据周跳的自动探测与改正研究 [J]. 测绘科学, 2006 31(5): 24-26
- [5] 韩绍伟. GPS 组合观测值理论及应用 [J]. 测绘学报, 1995 24(2): 8-13
- [6] BISNATH B. Efficient Automated Cycle-slip Correction of Dual frequency Kinematics GPS Data [C] // Proceeding of the 4th Annual Conference of the Canadian Aeronautics and Space Institute [S. l.]: The Canadian Aeronautics and Space Institute, 2000