

GPS/ GLONASS 组合定位中模糊度的处理

张永军¹ 徐绍铨² 王泽民² 张小红²

(1 武汉大学 GPS 研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学测绘科学与技术学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:在对 GPS/ GLONASS 组合定位的周跳探测和修复方法进行深入研究的基础上,论述了适合于两种数据联合解算的 GPS/ GLONASS 模糊度迭代处理方法及相应的基于 FARA 方法的整周模糊度固定方法。在现有 BERNESE Ver 4.0 GPS 数据处理软件的基础上,增加及改进了其中的若干模块,从而研制出组合定位系统高精度数据处理软件,并进行了试验计算。结果表明,所开发的组合定位系统数据处理软件内、外符合精度均达到 mm 级,证明了这种高精度相对定位理论、方法、软件的正确性和可行性。

关键词:GPS; GLONASS; GPS/ GLONASS; 周跳探测及修复; SEARCH 方法; 模糊度处理

中图分类号:P228.41

GLONASS 同 GPS 的设计原理及定位方式很相似,但由于 GLONASS 所采用的时间系统、坐标系统及广播星历的数据格式都不同于 GPS,而且 GLONASS 采用频分多址技术,即每颗卫星都使用不同的工作频率发射信号,这就使得现有的 GPS 数据处理软件无法对 GLONASS 观测数据进行处理。解决这一问题的常用方法是利用 GLONASS 广播星历进行轨道积分,计算出 GLONASS 卫星在 PZ-90 坐标系下的位置,并将 GLONASS 的时间系统和坐标系统转换到 GPS 中,这样 GLONASS 码观测数据就可以直接与 GPS 码观测数据进行联合处理^[1]。但是,对载波相位观测数据而言,由于 GLONASS 卫星工作频率各不相同,因而无法按照 GPS 的数据处理模型处理 GLONASS 观测数据。本文主要研究了适合于 GPS/ GLONASS 两种数据联合处理的周跳探测和修复方法、整周模糊度的迭代处理方法及相应的模糊度固定策略,最后给出了利用所研制的组合系统数据处理软件的计算结果。

1 周跳的探测和修复

常规的 GPS 周跳探测和修复方法有多项式拟合法、线性拟合法和双频 P 码伪距组合法等。对于 GPS/ GLONASS 的非差或单差定位,由于一

个观测方程只涉及一颗卫星,不受 GLONASS 频分多址的影响,因此与单独 GPS 定位相同。GPS/ GLONASS 的相对定位则一般使用双差模式,此时,GPS 只要求保证双差相位观测值中没有周跳影响,并不需要确定是哪颗卫星发生周跳; GLONASS 由于不同卫星信号的波长不同,在周跳探测之后,还必须确定是哪颗卫星发生周跳,才能从双差观测方程中消除其影响。

针对 GLONASS 卫星频率不一致的特性,可以采用三差解得出的三差观测值残差修正周跳。其基本思想是:对三差观测值进行迭代,每一次迭代都修复若干个周跳,直到周跳全部修复或无法确定周跳时引入一个新的模糊度。

三差残差可以表示为:

$$r_{kl}^i(t_2 - t_1) = b_i^i - b_j^j \quad (1)$$

式中, $b_i = N_{kl}^i(t_2) - N_{kl}^i(t_1)$; i (j) 为卫星 i (j) 的载波波长; $b_j = N_{kl}^j(t_2) - N_{kl}^j(t_1)$; k, l 为两测站; t_1, t_2 为两历元; N_{kl}^i, N_{kl}^j 为卫星 i, j 的整周模糊度。

从式(1)可以看出,如果没有周跳发生,则等式右边应该为零;由于 $i - j \neq 0$,导致 $b_i - b_j$ 的值无法确定;如果 b_i 或 b_j 的值是已知的(如为零),则可以确定另一颗卫星的周跳。

表 1 为三差法探测和修复周跳的一个示例。可以看出,当卫星 i (或卫星 j) 产生“1”周的周跳

时,可以被探测出来,但由于残差非常接近(i, j 相对 很小),无法确定是哪颗卫星发生了周跳,而示例 3 则根本无法探测周跳。因而,为了计算单差观测值的周跳,需将三差观测值残差转化为距离(以波长为单位),并寻求相应的解决方法。常用以下两种方法。

方法 1:测站间求差 卫星间求差 历元间求差 [距离(波长为单位)]

$$\frac{r_{ki}^{ij}(t_2 - t_1)}{i} = b_i - b_j + b_j - i \quad (2)$$

方法 2:测站间求差 历元间求差 [距离(波长为单位)] 卫星间求差

$$\frac{r_{ki}^i(t_2 - t_1)}{i} - \frac{r_{kj}^j(t_2 - t_1)}{j} = b_i - b_j - \frac{c \cdot t_{ki}(t_2 - t_1) \cdot}{i \cdot j} \quad (3)$$

两种方法都由于一个偏差项的存在而破坏了其整数特性,除波长差以外,偏差项还取决于周跳的大小(方法 1)和接收机钟差的变化(方法 2),其中方法 2 可以通过计算接收机钟差来削弱偏差项的影响。

表 1 三差法探测和修复周跳示例表

Tab. 1 Cycle Slips in Triple-difference Residues

示例	b_i	b_j	$r_{ki}^{ij}(t_2 - t_1)$
1	1	0	i
2	0	-1	$i - ij$
3	1	1	ij

显然,当两颗卫星波长之差最小时,偏差项也最小。利用这一特性,就可以采用重复迭代的方法进行周跳改正,其步骤如下:

- 1) 计算所有卫星组三差残差,并选出“无周跳”的组,即三差残差小于某一限值的卫星组合;
- 2) 在所选出的“无周跳”组中找出残差最小的卫星组合,并令 $b_i = b_j = 0$;
- 3) 找出包含一颗“干净”卫星的“有周跳”卫星组合,并将周跳改正到另一颗卫星;
- 4) 改正单差观测值的周跳并进行下一次迭代计算;
- 5) 对于无法确定周跳的卫星组合,引入一个模糊度参数,将该周跳当作未知参数处理。

2 整周模糊度的解算

在浮点双差观测方程的求解中,已经得到了整周模糊度的近似值(实数),将此实数模糊度按一定的策略固定为整数后,回代到法方程中进行

平差计算,即可获得基线向量的解。常用的模糊度处理方法有区间判定法、模糊度函数法及 LAMBDA 法等。本文主要论述基于 FARA (fast ambiguity resolution algorithm) 方法的 SEARCH 方法及 GPS/GLONASS 模糊度的迭代处理方法。

2.1 基于 FARA 方法的 SEARCH 方法

经过初始平差后,可以得到整周模糊度的实数解向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_u)^T$ (u 为整周模糊度个数)及其协因数矩阵 Q 和验后方差因子 σ_0^2 。整周模糊度 x_i 的标准差 m_i 和两个模糊度 x_i, x_j 之差 x_{ij} 的标准差 m_{ij} 可通过验后方差因子和相应的协因数矩阵计算,即

$$m_i = \sigma_0 \sqrt{Q_{ii}}$$

$$m_{ij} = \sigma_0 \sqrt{Q_{ii} - 2Q_{ij} + Q_{jj}} \quad (4)$$

其相应的模糊度搜索空间为:

$$x_i - m_i \leq x_{Ai} \leq x_i + m_i, \quad i = 1, 2, \dots, u \quad (5)$$

$$x_{ij} - m_{ij} \leq x_{Aij} \leq x_{ij} + m_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \dots, u, \text{ 且 } i \neq j \quad (6)$$

然后将模糊度的所有可能取值依次作为固定值,进行二次平差计算,验后标准差最小的一组模糊度向量即为最终结果。对于双频接收机,可以组成无几何路径影响的线性组合 L_4 (即 $L_1 - L_2$) 来确定整周模糊度。

模糊度的搜索是将模糊度的所有可能取值依次作为固定值,代入法方程进行平差计算,取与最小验后标准差 σ_0 相应的一组模糊度向量作为最终结果。在基线长度或观测时间过长等情况下,可能引起 σ_0 过大,即验后标准差 σ_h 与未固定整周模糊度时的标准差 σ_0 不相容;或者最小验后标准差 σ_h 和次小验后标准差 σ_k 几乎相等($\sigma_h / \sigma_k \approx 1$),即二者的差异不显著,此时可采用实数模糊度作为最终解或采用其他模糊度固定策略。

2.2 GPS/GLONASS 模糊度的迭代处理方法

GLONASS 的原始观测方程与单差观测方程不涉及卫星频率的变化问题,所以与 GPS 完全相同。但在不同的卫星间求差时,由于 GLONASS 卫星采用的是频分多址(FDMA),致使 GPS/GLONASS 双差观测方程的模糊度不再具有整周特性,因而能否寻求固定模糊度的合适方法将成为影响组合系统定位精度的关键。下面从观测方程入手,推导有效的模糊度处理方法。

零差(原始)观测方程可以表示为:

$$i_k = c \cdot i_k + N_k^i \cdot i + c \cdot t_k - c \cdot t^i \quad (7)$$

式中, c 为光速; t_{kl}^i 为卫星 i 与接收机 k 间的信号传播时间(包括对流层和电离层影响); N_{kl}^i 为整周模糊度; λ^i 为卫星 i 的波长; t_k^i 和 t_l^i 分别为信号发送(接收)时刻的卫星钟差和接收机钟差。

单差观测方程为:

$$t_{kl}^i = c \cdot \frac{t_k^i - t_l^i}{\lambda^i} + N_{kl}^i \cdot \lambda^i + c \cdot (t_k^i - t_l^i) \quad (8)$$

式中, $\frac{t_k^i - t_l^i}{\lambda^i} = \frac{t_k^i}{\lambda^i} - \frac{t_l^i}{\lambda^i}$; $N_{kl}^i = N_k^i - N_l^i$; $t_{kl}^i = t_k^i - t_l^i$ 。

双差观测方程为:

$$\frac{t_{kl}^i - t_{kl}^j}{\lambda^i - \lambda^j} = c \cdot \frac{t_k^i - t_k^j - t_l^i + t_l^j}{\lambda^i - \lambda^j} + N_{kl}^{ij} \cdot \lambda^i + N_{kl}^j \cdot \lambda^j \quad (9)$$

式中, $\frac{t_{kl}^i - t_{kl}^j}{\lambda^i - \lambda^j} = \frac{t_k^i - t_k^j}{\lambda^i - \lambda^j} - \frac{t_l^i - t_l^j}{\lambda^i - \lambda^j}$; $N_{kl}^{ij} = N_{kl}^i - N_{kl}^j$ 。

事实上,式(9)的原始形式并非如此,而是对模糊度项做了如下的变换:

$$\begin{aligned} & N_{kl}^i \cdot \lambda^i - N_{kl}^j \cdot \lambda^j = \\ & (N_{kl}^i - N_{kl}^j) \cdot \lambda^i + N_{kl}^j (\lambda^i - \lambda^j) = \\ & N_{kl}^{ij} \cdot \lambda^i + N_{kl}^j \cdot \lambda^j \end{aligned} \quad (10)$$

这样,将原来的由两个单差模糊度项组成的不具有整周特性的双差模糊度,变成一个具有整周特性的双差模糊度和一个与参考卫星的单差模糊度有关的两部分。这样的变换使双差模糊度具有整数特性,有利于进一步固定双差模糊度,得到固定解。

由双差方程(9)可见,不同卫星间求双差后,产生了一个新的偏差项 $b^{ij} = N_{kl}^j \cdot \lambda^j$,它与单差模糊度的大小及两颗卫星的波长之差有关。此时,要想固定双差模糊度,则需要知道单差模糊度 N_{kl}^i 。当两颗卫星的波长之差很小或单差模糊度的精度达到几周时,则偏差项 b^{ij} 小于 0.1 周(即小于 2cm),此时可以顺利确定整周模糊度。表 2 为不同卫星组合所允许的单差模糊度精度水平。

表 2 不同卫星组合所允许的单差模糊度精度/周

Tab. 2 Numerical Values for Single Difference Bias Term of Combinations/cycle

卫星组合	相对于参考卫星的波长差	单差模糊度最大允许误差
GLONASS - GLONASS(min)	0.000 35	285
GLONASS - GLONASS(max)	0.008 10	12
GPS - GLONASS(max)	0.025 30	4

由表 2 可见,当对波长之差最小的两颗 GLONASS 卫星求双差时,单差模糊度的最大允许误差为 285 周,可以通过进行伪距单点定位所求定的卫星位置计算;而当 GPS 卫星与 GLONASS 卫星求双差时,最大允许误差为 4 周,其精度水平需要采取一定的措施才能达到。一般情况下,参考卫星

的单差模糊度近似值可由伪距求得,用 C/A 码伪距所求出的 N_{kl}^i 的最大值与最小值之差小于 10 周;用 P 码伪距所求出的 N_{kl}^i 的最大值与最小值之差小于 5 周。通常可以计算若干历元,然后取其平均值作为 N_{kl}^i 的值,其误差一般小于 3 周。精度要求不是很高时,可以用伪距法先求出参考卫星的单差模糊度 N_{kl}^i 的近似值,然后就可以按 GPS 常规方法求解。当精度要求较高时,可以用上述方法求出参考卫星的单差模糊度的近似值,代入法方程,求出卫星的双差模糊度的整数及单差模糊度的值,然后再求解固定解。

具体的模糊度处理方法仍采用迭代法进行。考虑到单差模糊度项的影响,可以首先固定波长差较小的卫星组合,然后进行迭代,逐步固定波长差较大的卫星组合。

综上所述, GPS/GLONASS 模糊度的具体处理步骤如下:

- 1) 引入 n 颗参考卫星的 n 个单差模糊度参数 $N_{kl}^j (j=1, 2, \dots, n)$;
- 2) 对单差模糊度参数 N_{kl}^j 引入一个先验约束(如 300 周)并计算解向量;
- 3) 计算所有可能的双差模糊度 N_{kl}^{ij} 及其相应的误差;
- 4) 将双差模糊度通过一定的策略(如 SEARCH 方法)固定为整数,并进行下一次迭代计算;
- 5) 将固定后的双差模糊度作为已知值,代入法方程求解单差模糊度 N_{kl}^i 。

3 数据处理及结果分析

根据上述数学模型,笔者在现有 BERNESE Ver 4.0 GPS 数据处理软件的基础上,增加及改进了其中的若干模块,主要包括 GLONASS 广播星历轨道积分及与 GPS 时间系统和坐标系统的统一;GLONASS 星历文件与 GPS 星历文件的合并;GPS/GLONASS 周跳的探测和修复以及卫星模糊度的处理等,从而开发出 GPS/GLONASS 相对定位数据处理软件。

为了验证所提出的周跳探测和修复及模糊度处理方法的可行性、正确性以及该软件的精度,首先对 30h 的连续观测资料进行了处理。数据采集利用 ASHTECH 公司生产的 GG24 型单频双系统接收机进行,该接收机有 24 个通道,其中 12 个通道接收 GPS 卫星信号,另外 12 个通道接收 GLONASS 卫星信号。数据处理时,首先将原始

的连续观测数据截取为若干段,每段长分别为 2h、6h,并将数据分流为 GPS 数据和 GPS/GLONASS 组合数据,然后采用 IGEX (international GLONASS experiment) 的事后 GPS/GLONASS 精密星历(时间系统和坐标系统已统一到 GPS 系统中)、15s 的采样率、15° 的截止高度角及 Saastamoinen 对流层模型和标准气象参数分别进行处理。

对 GPS 数据利用原 BERNESE Ver 4.0 GPS 数据处理软件进行处理,GPS/GLONASS 数据则利用改进后的 BERNESE 软件进行处理,各时段

相应的解算值之间求差的结果统计见图 1 和表 3。可以看出,两种数据 2h 数据处理结果的最大差值为 1.6cm 左右,所有分量中误差均小于 8mm;6h 解算值的精度水平有明显提高,分量中误差均优于 3mm。可见,即使将 GPS 数据解算结果视为真值,数据处理结果仍具有较高的精度水平,表明改进后的 BERNESE 软件与原软件之间不存在明显的系统性偏差,也证明了本文的定位理论、方法和软件的正确性。

为了全面检验该数据处理软件的外符合精

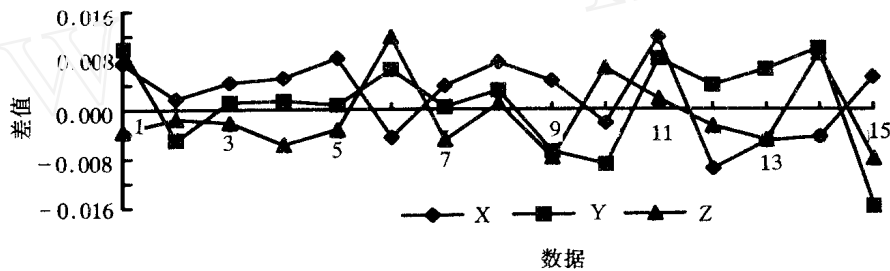


图 1 2h GPS 与 GPS/GLONASS 数据结果比较

Fig. 1 Results Comparison of GPS and GPS/GLONASS Data of 2h

表 3 GPS、GPS/GLONASS 数据相应时段解算值求差结果统计表/m

Tab. 3 Difference Statistics of GPS and GPS/GLONASS Corresponding Results/m

精度	2h			6h		
	X	Y	Z	X	Y	Z
中误差	0.005 8	0.007 4	0.006 0	0.002 9	0.001 6	0.002 4
平均值	0.002 2	0.001 0	-0.001 0	0.002 2	0.001 0	-0.001 0
最大值	0.011 7	0.009 9	0.011 8	0.005 3	0.002 9	0.001 9
最小值	-0.009 7	-0.015 7	-0.008 0	-0.001 5	-0.001 2	-0.004 0

度,笔者利用上述观测资料中 2h(15 段)观测数据的解算结果与 JAVAD 公司的 GPS/GLONASS 随机数据处理软件(Pinnacle)的解算结果进行了比较,然后利用 JAVAD 公司的 Legacy GPS/GLONASS 双频双系统接收机于 1999 年 11 月采集了 40h 的连续观测资料并进行了解算。该接收机具有 40 通道,可接收 20 颗 GPS + GLONASS

卫星的 L_1 和 L_2 信号。接收天线采用具有零相位中心和双频单深度扼流圈的 RegAnt-1 天线。数据处理时将原始数据截取为 20 段,每段 2h,参数与上述单频数据解算参数相同,并将利用改进后的 BERNESE 数据处理软件和随机软件(Pinnacle)的解算结果进行了比较,其统计结果分别见图 2、表 4 和表 5。

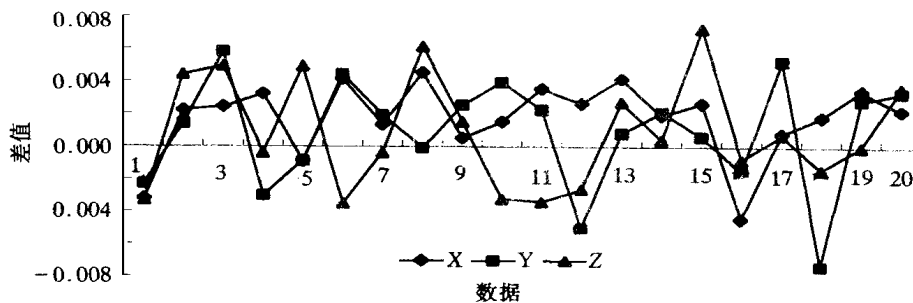


图 2 2h GPS/GLONASS 双频数据解算结果与 Pinnacle 软件比较

Fig. 2 Results Comparison of 2h GPS/GLONASS Dual-frequency Data and Pinnacle Software

表4 GPS/GLONASS单频数据结果与Pinnacle比较/m
Tab.4 Results Comparison of GPS/GLONASS
Single-frequency Data and Pinnacle Software/m

统计项目	X	Y	Z
中误差	0.006 6	0.006 3	0.006 3
最大值	-0.000 2	0.006 1	0.011 7
最小值	-0.018 2	-0.014 2	-0.005 0
平均值	-0.004 4	-0.002 6	0.003 4

表5 GPS/GLONASS双频数据结果与Pinnacle比较/m
Tab.5 Results Comparison of GPS/GLONASS
Dual-frequency Data and Pinnacle Software/m

统计项目	X	Y	Z
中误差	0.002 3	0.003 4	0.003 4
最大值	0.004 5	0.005 8	0.007 2
最小值	-0.004 4	-0.007 3	-0.003 5
平均值	0.001 7	0.000 8	0.000 9

从表4和表5可以看出,无论是单频双系统数据还是双频双系统数据,其解算结果的外符合精度都在mm级,且双频双系统观测数据的解算精度明显高于单频数据的解算精度。

4 结 语

对实测数据进行处理与分析的结果表明,利用三差解残差进行迭代的周跳探测和修复方法及针对GPS/GLONASS卫星组合的模糊度处理方

法是行之有效的。当基线长度较短时,单、双频双系统的定位精度均可达到mm级,且双频数据的解算精度明显高于单频数据。证明了这种高精度相对定位理论、方法、软件的正确性和可行性。

由于整个观测期间GLONASS卫星至多只有5颗且时间很短,通常只有2~3颗,故未对单独的GLONASS数据进行处理。需要对不同环境、不同基线长度的单、双频组合系统观测数据进行大量定位试验,以全面检验数学模型的正确性及软件所能达到的精度。

参 考 文 献

- 1 张永军. GPS/GLONASS高精度相对定位数据处理软件研究:[学位论文]. 武汉:武汉测绘科技大学,2000
- 2 张永军,徐绍铨,张小红,等. GLONASS广播星历轨道计算方法研究. 中国测绘学会第4届年会,宁波,1999
- 3 沈晓兵. GPS+GLONASS组合系统测时方案的研究:[学位论文]. 武汉:武汉测绘科技大学,1998
- 4 Habrich H. Experiences of the BKG in Processing GLONASS and Combined GLONASS/GPS Observations. D-60598 Frankfurt Main, Germany, 1998
- 5 Leick A. Aspects of GLONASS Carrier-phase Differencing. GPS Solutions, 1998

作者简介:张永军,博士生,现主要从事GPS/GLONASS组合定位技术研究。

E-mail: yjzhang@wtusm.edu.cn

Ambiguity Processing Approach in Combined GPS/GLONASS Positioning

ZHANG Yongjun¹ XU Shaoquan² WANG Zemin² ZHANG Xiaohong²

(1 Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: The construction and status of GPS and GLONASS are introduced precisely, then the iterative detecting and repairing method of cycle slips based on triple-difference residue on combined GPS/GLONASS positioning are discussed systematically. The basic principle is taking iterations of triple-difference observations, and repairing some cycle slips in every iteration until all cycle slips are repaired or introducing new ambiguities while the cycle slips can not be repaired. Then an iterative ambiguity resolution approach suitable for combined data processing of GPS/GLONASS observations and the corresponding ambiguity fixing strategy based on FARA (fast ambiguity resolution algorithm) method are discussed. Because of the FDMA (frequency difference multiple address) technology used by GLONASS, the frequency and corresponding wavelength are not equal among different GLONASS satellites, and when making double-difference between GLONASS or GPS/GLONASS satellite pairs, the ambiguities will not maintain integrity-character as GPS satellite pairs. So the ambiguity can not be fixed to integer as common GPS only

positioning. A transformation of the double-difference observation is taken, then every double-difference equation contains an integrity-characterized double-difference ambiguity and a single-difference ambiguity related part of the reference satellite. Then the double-difference and single-difference ambiguities can be fixed using the SEARCH strategy based on statistics. For dual-frequency data, geometry-free L_4 observations can be made to fix ambiguities.

Based on the forenamed theory and BERNESE Ver 4.0 GPS only processing software, several modules are added and improved. Thus, high precision data processing software on combined GPS/ GLONASS relative positioning (we call it improved BERNESE) is accomplished, then some experiments are taken and the observations are processed to verify the precision of the data processing software. Precise GPS/ GLONASS ephemeris of International GLONASS experiment, sampling rate of 15 seconds, cutting off angle of 15 degree, troposphere model of Saastamoinen and standard meteorological parameters are adopted. The single-frequency GPS/ GLONASS data collected by GG24 receivers are divided into GPS only and GPS/ GLONASS combined. The GPS only data are processed using BERNESE Ver 4.0 GPS only processing software, and the improved BERNESE software processes GPS/ GLONASS observations. The data processing results indicate that the result precision of several hours' single-frequency data is below several millimeters. In order to check the exterior precision of the enhanced BERNESE software thoroughly, another experiment is taken in November 1999 with JAVAD GPS/ GLONASS dual-frequency receivers. 40 hours' data are cut into 20 segments of 2 hours' data, then the same processing strategy is used, and the results of improved BERNESE software are compared with the results of Pinnacle software developed by JAVAD company. The comparison shows that the result precision of 2 hours' dual-frequency observations is only a few millimeters. It is obvious that the result precision of dual-frequency observations is higher than that of single-frequency observations.

The results of these experiments prove the correctness of the iterative detecting and repairing method of cycle slips based on triple-difference residues and the iterative ambiguity processing approach suitable for combined positioning. The precision of the software is at the order of millimeter on short baselines, which prove the correctness and feasibility of the high precision relative positioning theory, method and the data processing software itself, and open a new approach of broad application in the future.

Key words: GPS; GLONASS; GPS/ GLONASS; detecting and repairing of cycle slips; SEARCH strategy; ambiguity resolution

About the author: ZHANG Yongjun, Ph. D candidate. He is mainly engaged in GPS/ CLONSSS combined positioning.
E-mail: yjzhang@wtusm.edu.cn