文章编号:1671-8860(2005)11-0995-04 **文献标志码**:A

无模糊度和整周跳变问题的短基线解算方法研究

楼益栋[1] 李征航[1] 张小红[1]

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129,430079)

摘 要:提出了一种不涉及模糊度和整周跳变问题的短基线解算方法。用自编软件对实际观测资料进行了处理。计算结果表明,本方法的原理和数学模型是正确的,对于一般静态短基线解算,平面精度达到 2 mm 左右,高程精度达到 5 mm 左右。

关键词:载波相位组合;整周模糊度的确定;周跳的探测及修复;短基线解算方法

中图法分类号:P228.4

在 GPS 测量中,静态相对定位是当前 GPS 定位中精度最高的一种方法,广泛应用于工程测量、大地测量和地球动力学研究,因此,静态基线解算研究是 GPS 数据处理的重要内容之一。迄今为止,国内外 GPS 基线解算的基本方法都要进行周跳的探测及修复和整周模糊度的确定。在数据处理过程中,周跳的探测及修复和整周模糊度的确定都会涉及复杂的数学运算,影响解算效率,特别是在观测条件差、周跳频繁发生时,数据处理会更加复杂,甚至可能导致基线无法正确解算。本文在文献[1,2]提出的直接提取形变量新方法的基础上,对绕开周跳探测及修复和整周模糊度确定的短基线解算方法的实现进行了研究。

1 基本思路

GPS 观测值包括伪距观测值和载波相位观测值,伪距观测值包括精码 P 码和粗码 CA 码;载波相位观测值目前包括 L_1 载波、L_2 载波。不同的载波相位组合观测值,也可以从广义上认为是不同波长和精度的载波相位观测值。这些观测值的精度各不相同,因而在利用这些观测值估计参数时,得到的参数估值精度也不相同。在进行基线解算时,利用伪距观测值解算的优点是数学模型中不存在整周模糊度参数,计算快速、简便;缺点是精度低,难以满足一般用户的需求。而利用载波相位观测值解算必须先进行模糊度参数的求解,计算过程复杂,但可以达到很好的解算精度。无模糊度和整周跳变的短基线解算方法综合利用两者的优点,在基线解算时,不需要进行复杂的整周模糊度确定和周跳探测及修复等处理过程,便能达到很好的解算精度。其基本思路如下。

1) 利用伪距双差解算基线的初始解。虽然伪距双差解算基线可以绕开模糊度的确定和周跳探测及修复问题,但对于一般的静态基线测量,其解算精度只能达到几个 dm[3],达不到一般用户的精度要求。要得到高精度的基线解算结果,必须对此初始解进行精化。

假设伪距双差解算的流动站坐标为(X_0,Y_0,Z_0),而流动站的真实坐标为(X,Y,Z),则伪距双差解算的基线初始解的改正量 $\Delta\mu$ 为:

$$\Delta\mu = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \tag{1}$$

从式(1)可以看出,对初始解的精化处理过程也就是求初始解的改正量 $\Delta\mu$;而改正量 $\Delta\mu$ 的求解方法与形变监测中的变形量求解方法类似。因此,在无模糊度和整周跳变问题的基线解算过程中,对初始解改正量 $\Delta\mu$ 的求解问题就等价于形变监测中的大形变量提取的问题。

2) 无模糊度和整周跳变问题的大形变量提取。文献[1]提出的变形监测新模型解决了利用 L_1 载波相位观测值不涉及整周模糊度的确定和周跳探测及修复,而直接提取小形变量的问题,误差

收稿日期:2005-09-28。

项目来源:中欧合作基金资助项目(2003CB716705)。

方程如下：

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{Bx}+\boldsymbol{l} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{x}=[\delta_x,\delta_y,\delta_z]^{\mathrm{T}}$ 为形变矢量；$\boldsymbol{B}=-\frac{1}{\lambda}[l_q-l_p,m_q-m_p,n_q-n_p]$，其中，$\lambda$ 为载波波长，l_p、m_p、n_p 为参考星 p 的3个方向余弦，l_q、m_q、n_q 为卫星 q 的3个方向余弦；$\boldsymbol{l}=[\Delta\nabla\varphi_c-\Delta\nabla\varphi_0']-\mathrm{int}[\Delta\nabla\varphi_c-\Delta\nabla\varphi_0']$，其中，$\Delta\nabla\varphi_0'$（以周为单位）为变形后的监测点上进行观测并组成的双差观测值，$\Delta\nabla\varphi_c$（以周为单位）为变形前的监测点坐标计算得到的双差观测值。现对文献[1]的数学模型进行进一步分析。

将误差方程(2)用矢量形式表达为：

$$\boldsymbol{v}=-\frac{1}{\lambda}\delta\vec{\mu}\cdot(\vec{B}_q-\vec{B}_p)+l \tag{3}$$

式中，$\delta\vec{\mu}=(\delta x,\delta y,\delta z)$，$\vec{B}_p=(l_p,m_p,n_p)$，$\vec{B}_q=(l_q,m_q,n_q)$。在短基线观测中，由于双差后的观测噪声很小，$\boldsymbol{v}$ 的绝对值一般仅为百分之几周[1]，因此，可以认为改正量将反映在 l 上。若要避开整周模糊度的确定和周跳探测及修复，需要满足条件：变形量只反映在 l 的小数上，而不涉及整数部分，即 $-1<l<1$，从而可以获得：

$$\left\|\frac{1}{\lambda}\delta\vec{\mu}\cdot(\vec{B}_q-\vec{B}_p)\right\|<1 \tag{4}$$

式(4)等价于：

$$\|\delta\vec{\mu}\|\cdot(\delta\vec{\mu}_0\cdot\vec{B}_q-\delta\vec{\mu}_0\cdot\vec{B}_q)<\lambda \tag{5}$$

式中，$\delta\vec{\mu}_0$ 为 $\delta\vec{\mu}$ 方向的单位矢量。由于 $-1\leqslant\delta\vec{\mu}_0\cdot\vec{B}_q\leqslant1$，$-1\leqslant\delta\vec{\mu}_0\cdot\vec{B}_p\leqslant1$，所以，

$$\|\delta\vec{\mu}\|\cdot(\delta\vec{\mu}_0\cdot\vec{B}_{q_0}-\delta\vec{\mu}_0\cdot\vec{B}_{p_0})\leqslant2\|\delta\vec{\mu}\|$$

则当满足条件 $\lambda>2\|\delta\vec{\mu}\|$ 时，在提取形变量时，就可以不考虑整周部分，只涉及小数部分，即

$$\|\delta\vec{\mu}\|<\lambda/2 \tag{6}$$

式(6)是针对短基线测量、载波观测值在双差后剩余的误差很小、可以忽略的条件下推导出来的，当顾及双差剩余误差时，不等式(6)左边应加上双差剩余误差项。

从上述对变形监测新模型的进一步分析可以看出，当满足条件监测点位移小于1/2载波波长时，可以利用新模型绕开整周模糊度的确定和周跳探测及修复而直接提取变形量。因此可以认为，不等式(6)是此方法的适应性条件，载波波长 λ 越大，所能提取变形量 $\delta\vec{\mu}$ 的范围就越大。

在GPS双频观测中，利用不同的双频载波线性组合可以得到长波长的载波观测值。这样，上述新模型可以用长波长的载波相位组合观测值直接提取大形变量，但是长波长的载波相位组合观测值的精度一般较差，得到的形变量的精度不高。为了得到高精度的大形变量，需要采用精度更高的载波相位观测值对提取的大形变量进行进一步精化处理。

综上所述，无模糊度和整周跳变问题的短基线解算的基本思路为：先用伪距双差解算基线初始解，然后利用合适的载波相位组合观测值和载波相位观测值对基线初始解逐步精化，得到最终的基线结果。在数据处理过程中，此方法可以绕开整周模糊度的确定和周跳探测修复问题，但需要考虑基线精化过程中的各步衔接问题。在衔接良好的前提下，其精度应与直接利用 L_1 载波相位观测值进行周跳探测、修复与正确确定整周模糊度后所能达到的基线解算精度等同。

2 关键问题

无模糊度和整周跳变问题的短基线解算方法虽然可以避开整周模糊度的确定和周跳探测及修复，但此方法也引入了一个新的问题：在基线初始解分步精化过程中，要考虑到每一步提取改正量时，是否满足新方法的适应性条件，即是否满足不等式(6)。在计算过程中，只要其中有一步不能满足此条件，方法就会失效。对此问题的分析主要在于根据估计的初始解改正量(形变量)的大小来选择基线精化过程中合适的载波相位组合观测值。

根据载波相位线性组合理论，若不加限制，线性组合有无穷多种。针对无模糊度和整周跳变问题的短基线解算的实际情况，选择组合的方式有以下标准：① 载波组合观测值的模糊度应具有整周性；② 载波组合观测值应具有较小的电离层影响和量测噪声；③ 载波组合观测值应具有适当波长，满足适应性条件(6)；④ 在基线分步精化过程中，在满足适应性条件的情况下，分步选择的载波组合观测值的精度必须逐步提高，这样才能达到基线精化的效果。同样，对于第一步伪距双差基线解精化时，载波组合观测值的选择必须满足其测量精度高于伪距的测量精度。

本文提出的无模糊度和整周跳变问题的短基线解算方法主要针对静态短基线的高精度解算。由于一般静态短基线的伪距双差解算的精度在0.5 m左右[3]，由适应性条件可以推导出 $\lambda>2\|\delta\vec{\mu}\|>1$ m。结合上述载波组合观测值的选择标准，可以选择 $n_1=-3$、$n_2=4$ 的载波观测值组合(波长 $\lambda=1.628$ m)作为提取基线初始值改正量的理想组合。同样根据文献[3]的分析可知，$n_1=-3$、$n_2=4$ 的载波组合观测值的定位精度在0.3 m

左右。可以选择 $n_1=1$、$n_2=-1$ 的宽巷组合观测值对改正量进行进一步提取，其改正后的基线解算精度可以达到 0.01 ～0.1 m，可使用 L_1 载波对基线进行精化处理，得到基线的最终解。

3　试验结果分析

为检验无模糊度和整周跳变问题短基线解算方法原理和数学模型的正确性，笔者编制了一个计算软件，并采用实际观测数据对自编软件解算结果的精度进行了分析。

本文对某一实际观测的控制网中的 15 条短基线（基线长 1～5 km），分别利用国际公认的高精度 GPS 数据处理软件 Bernese、常用随机解算软件 TGO 和自编软件进行了解算。实测数据使用 Trimble 5700 接收机采集，采样间隔为15 s，截止高度角为 20°。同步观测时间大部分基线约为 90 min，解算时都采用广播星历。由于 Bernese 数据处理软件是国际公认的高精度解算软件，具有很高的基线解算精度，因此，本文将 Bernese 软件解算结果作为参考值，分别比较 TGO 解算结果与 Bernese 解算结果之差、自编软件解算结果与 Bernese 解算结果之差（如表 1 所示），来分析自编软件的解算精度。

表 1　TGO、自编软件与 Bernese 解算软件结果比较

Tab.1　Comparison Between the Solution of TGO, the Test Program and Bernese Software

ID	距离/m	历元数	TGO 与 Bernese 结果比较						自编软件与 Bernese 结果比较					
			ΔX/mm	ΔY/mm	ΔZ/mm	ΔN/mm	ΔE/mm	ΔU/mm	ΔX/mm	ΔY/mm	ΔZ/mm	ΔN/mm	ΔE/mm	ΔU/mm
1	3 523.07	369	−1.7	4.5	9.8	4.9	−0.4	9.9	1.3	1.5	2.8	1.9	−2.4	1.9
2	5 391.04	368	−6.1	9.9	7.3	−1	0	13.7	0.9	−0.1	0.3	0	−1	−1.3
3	4 805.08	250	−8.5	14.1	10.1	−1	0.6	18.2	1.5	0.1	1.1	1	−1.4	−0.8
4	3 787.58	371	0.5	−2.6	−2.8	−0.8	0.8	−4	1.5	−1.6	−0.8	1.2	−0.2	−2
5	2 994.60	365	−3.4	5.4	−3.5	−6.4	0.8	3	−0.4	−1.6	−2.5	−1.4	0.8	−2
6	2 798.06	275	−5.8	8.6	−0.7	−6.2	0.4	8.1	1.2	−3.4	−2.7	−0.2	1.4	−4.9
7	3 132.00	371	3.2	−7.1	−12.6	−5.4	1.2	−13.9	0.2	−2.1	−2.6	−1.4	1.2	−2.9
8	2 212.69	368	9	−15.7	−12.9	0.5	−0.1	−22.4	1	−2.7	−0.9	0.5	0.9	−2.4
9	1 821.05	300	−0.9	4	10	5.8	−0.5	8.8	−0.9	0	4	2.8	0.5	6.8
10	2 582.87	292	−4.7	0.3	−0.8	−1.5	4.2	1.4	2.3	−5.7	−1.8	1.5	0.2	−8.6
11	4 809.53	324	−11.7	0.6	−0.8	−4.2	8.9	5.3	−1.7	−3.4	2.2	2.8	2.9	−3.7
12	3 067.14	248	−5.8	−2.3	−0.3	−0.8	6.1	0.5	3.2	−2.3	0.7	3.2	−0.9	−2.5
13	2 261.43	377	−7	1.3	0	−2	5.5	3.1	−2	0.3	2	0	1.5	2.1
14	1 360.19	387	−1.1	−2.6	0.5	1.8	1.7	−1.5	−1.1	1.4	1.5	−0.2	−0.3	4.5
15	2 182.05	378	4.9	−2.9	0.5	3.2	−2.7	−3.8	0.9	1.1	−0.5	−0.8	−1.7	3.2
中误差			5.87	7.13	6.83	3.72	3.45	10.12	1.53	2.36	2.03	1.61	1.37	3.89

从表 1 可以看出，自编软件解算的基线在各方向的中误差，在平面上两者的差异为 2 mm 左右，在高程上为 5 mm 左右，自编软件计算结果与 Bernese 软件计算结果符合程度很好。由此说明，利用本文提出的方法计算基线向量是可行的，推导的数学模型是正确的，并且具有较高的解算精度。

从表 1 还可以得出，在各方向分量上，自编软件的精度要优于 TGO 解算软件，特别是在高程方向。因此，可以认为自编软件的解算精度与随机软件的解算精度相当，甚至好于随机软件。

4　结　语

对于一般的静态短基线测量，先用伪距双差解算基线初始值，然后利用特宽巷载波相位组合观测值、宽巷载波相位组合观测值、载波相位观测值分步对基线初始解进行精化，得到高精度的基线解算结果的方法是可行的、有效的。此方法在计算过程中可以绕开整周模糊度的确定和周跳探测及修复，数学模型简单。以下问题有待进一步研究。

1）引入在长基线中必须顾及的误差改正项，探讨此方法用于静态长基线解算的可能性。

2）在 GPS 第三波段观测值增加后，此方法在选择载波相位组合观测值时，可以增加许多种不同的载波相位组合。

参　考　文　献

1　李征航，张小红，朱智勤. 利用 GPS 进行高精度变形监测的新模型. 测绘学报，2002，31(3)：206～210

2　张小红，李征航，徐绍铨. 高精度 GPS 形变监测的新方法及模型研究. 武汉大学学报·信息科学版，2001，26(5)：451～454

3　楼益栋. 无模糊度和整周跳变问题的短基线解算方法

研究与实践:[学位论文]. 武汉:武汉大学,2004
4 何海波,杨元喜. GPS观测量先验方差-协方差矩阵实时估计. 测绘学报,2001,30(1):42~47
5 魏子卿,葛茂荣. GPS相对定位的数学模型. 北京:测绘出版社,1998
6 韩绍伟. GPS组合观测值理论及应用. 测绘学报,1995,24(2):8~13
7 Zhang X H, Liu J N, Li Z L. An Ambiguity Free Model for Deformation Detection with GPS. ION GPS/GNSS 2003, Portland, USA, 2003

第一作者简介:楼益栋,博士生。现从事卫星定位技术理论与应用研究。
E-mail:ydlou@sohu.com

A Method of Short Baseline Solution without Cycle Slip Detection and Ambiguity Resolution

LOU Yidong [1] *LI Zhenghang* [1] *ZHANG Xiaohong* [1]
(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: A new model of short baseline solution without cycle slip detection and ambiguity resolution is. This method can avoid the problems of detection and repair of cycle slips and determination of ambiguity. The actual observation data are processed by our test program, and the results show that the principle and the mathematic models of this paper are correct. For the short distance baseline, the accuracy in horizontal is about 2 mm, the accuracy in height is about 5 mm.

Key words: combination carrier phase observation; ambiguity resolution; cycle slip detection and repair; method of short baseline solution

About the first author: LOU Yidong, Ph.D candidate, majors in the theory and application of satellite positioning technology.
E-mail: ydlou@sohu.com

下期主要内容预告

- 一种适合于地图出版符号的反走样算法的研究 邓术军,等
- 一种基于InSAR相干系数的SAR阴影提取方法 王 健,等
- 一种基于内容检索的大尺寸遥感图像纹理特征提取算法 曾志明,等
- p范分布密度函数的形式差异辨析与统一 刘正才,等
- Web GIS空间数据分布式缓存技术研究 李浩松,等
- GPS/DR组合导航中一种新的数据融合算法 柴艳菊,等
- 几何特性与流线追踪相结合的地形结构线提取法 吴艳兰,等
- 基于空间网格和Hilbert R-tree的二级R-tree空间索引 郭 晶,等
- 高程误差对双星定位系统定位精度的影响研究 林雪原,等
- 关系数据库管理空间数据方式下数据查询方法的研究 黎展荣,等
- 陆面日蒸发散量计算的两层阻抗遥感模型 陈云浩,等