

# '92 中国 GPS 会战(A 级网)数据处理分析

刘经南 葛茂荣

(武汉测绘科技大学地球科学与测量工程学院,武汉市珞喻路 39 号,430070)

**摘要** 讨论了应用武汉测绘科技大学改进到微机上的 GAMIT 软件处理'92 中国 GPS 会战的国内数据以及用 GPSADJ 软件的多站网处理模块进行全网平差的技术方案,着重论述了数据处理所遇到的问题及解决方法,最后分析了成果精度。

**关键词** '92 中国 GPS 会战;单天网处理;多站网平差

**分类号** P228

'92 中国 GPS 会战是中国资源卫星应用中心、国家测绘局、国家地震局、中国石油天然气总公司、地矿部、煤炭部等部门,利用'92 国际 GPS 地球动力学服务(IGS)会战的机会,组织的一次全国性 GPS 精密定位会战。

观测工作从 1992 年 7 月 25 日开始到 8 月 5 日结束。武汉测绘科技大学与天津第一地壳形变监测中心分别用商用软件处理了会战数据。由于受广播星历和起算点地心坐标精度及商用软件数学模型误差的限制,基线重复性约为  $4 \times 10^{-7}$ ,网平差后基线相对精度约为  $10^{-7}$ 。这样的精度,不能满足科学的研究和国民经济建设的要求,因此重新进行了精密数据处理。

## 1 精密数据处理方案

### 1.1 软件

精密数据处理采用武汉测绘科技大学改进到微机上的、麻省理工学院研制的 GAMIT 软件进行多站基线向量解算。然后,用武汉测绘科技大学研制的 GPSADJ 软件进行整体平差。GAMIT 软件是目前国际上最理想的 GPS 精密定位和定轨软件之一,包括轨道积分 ARC、形成观测方程 MODEL、自动跳周修正 SINCLN 及 DBLCLN、交互式跳周修正 CVIEW 和用双差观测值按最小二乘法求解参数的 SOLVE 等 6 个主要程序及一系列辅助程序。有关数学模型可参考文献[1~4]。文献[8]详细介绍了 GPSADJ 软件。这里只使用其多测站解坐标整体平差程序。

### 1.2 分区

由于微机内存的限制并考虑到同类接收机联合处理效果会更好,首先考虑按仪器类型把整网分成 3 个区。实际处理时发现有 4 台 Trimble 仪器,由于机内软件版本较低,采样时刻与整秒数存在一变化着的差值,最大差值可达 0.3s。这 4 台接收机与其它接收机(包括其它 Trimble 接收机)联合处理结果很差,而它们之间却同步很好。因此,将这 4 台接收机单独处理,并选择一些相近的点把它们联到整个网中。

最后把整个网分成 4 个区。A 区 12 台 Ashtech 和 3 台 MINI-MAC 接收机。T 区包括 7 台 Trimble 和 1 台 MINI-MAC 接收机。M 区包括 3 台 Trimble 和 3 台 Ashtech 及 2 台 MINI-MAC 接收机,为混合区,以研究不同仪器的联合处理。另外,4 台非整秒采样的接收机加上一些联结边

作为F区。

### 1.3 起算点

上海天文台和国家测绘科学研究院利用4个跟踪站会战前后一段时间内的观测数据及'92IGS会战的部分数据,用GAMIT软件分别求出了跟踪站在ITRF91框架中的地心坐标。两个结果的最大差异小于0.1m。根据文献[5]的估计,坐标分量精度优于0.1m。在处理会战数据时,用国家测绘科学研究院提供的跟踪站坐标,每个分量以1cm精度加权,作为起算点。由于轨道作为已知值,因此,每个区只选择一个起算点。

### 1.4 卫星坐标

卫星坐标根据NGS精密星历计算,其精度优于10m,属ITRF91框架。卫星坐标作为已知值,即只作相对定位。

### 1.5 大气模型

鉴于对用实测气象数据代表传播路径上气象环境的误差研究并不深入,在处理中采用标准气象模型,即用标准气象参数计算对流层折射改正。

## 2 基线处理

### 2.1 模型及参数

GAMIT软件用双差观测值按多测段多测站模式求解基线。处理会战数据时,每区每天求一个解,称为单天解。主要考虑了如下因素:

卫星钟差 用广播星历中的钟差参数改正

接收机钟差 用伪距计算出的钟差改正

电离层折射 用两个频率上的观测值消除

对流层折射 在Saastamaneu模型改正的基础上附加一未知数

卫星和接收机相位中心偏差改正

测站固体潮改正

截止高度角 选择20°

观测数据 从8:00~24:00UTC之间的数据

### 2.2 处理流程

会战几乎都是用无P码接收机观测的。由于 $L_2$ 上存在半跳周,求解整周模糊度很困难。同时,在出现数据间断处的跳周修正也有一定的困难,因而快速解(Quick Solution)与正规解(Regular Solution)没有显著差异<sup>[4]</sup>。另外,由于观测数据很长,快速解有足够的强度。因此,选择了快速解作为最终结果。

实际数据中,卫星上升和落下时(即数据的头尾部分),非差相位观测值的随机抖动很大,跳周也较多,由此



图1 单天解处理流程

求出的快速解不利于正确修正跳周。因此,在作第一次快速解时头尾部分的数据应作适当的删除。实际处理时,按图 1 的流程进行。快速解的质量根据解的 rms 判断。一般要求  $\text{rms} < 0.7$ 。最后,还可进一步用基线重复性检验。

## 2.3 有关问题及解决方法

### 2.3.1 时标的重复修正

有些商用软件在将原始观测数据转换成 RINEX 文件时,将接收机钟差中的整 ms 部分改正到时标上,而伪距并不加相应的改正。GAMIT 软件根据伪距计算出钟差并改正到时标上,这样时标作了重复改正。对于 16h 的观测数据,这个改正错误可能会达到 100ms,是不容忽略的。

### 2.3.2 接收机钟差拟合

GAMIT 软件根据伪距计算出一定历元间隔上的接收机钟差,然后拟合出钟差多项式。伪距的粗差将导致拟合失败,或者拟合结果有系统误差。因此,拟合钟差多项式时必须附加粗差剔除功能。

### 2.3.3 接收机同步误差影响

理论分析表明,接收机时钟同步误差导致的 SA 影响在双差方法中不能很好地消除<sup>[5,6]</sup>。同时,还会引入一定的轨道误差和钟差。就 A 级网而言,MINI-MAC 的接收时刻是严格与 GPS 时间同步的,而 Ashtech 和 Trimble 接收机的真正接收时刻与 GPS 时间相差小于 1ms。若以相同的历元间隔采样,则同步误差对结果没有影响。会战结果的基线重复性也证明了这一点。

由于 F 区的 4 台非整秒采样的接收机与其它接收机的同步误差可能达到 0.3s,仅 SA 对双差的影响就可能达到 0.6 周,对跳周的修正有直接的影响。因此,必须将 F 区单独处理。另外,F 区与其它区的联结基线的处理是很困难的。在精细的交互修正跳周工作后,基线的重复性略优于  $1 \times 10^{-7}$ ,比其它区要差得多。

## 3 全网整体平差

为了得到全网统一的平差结果,对各区单天解结果用 GPSADJ 软件进行了整体平差。

以各区单天解得到的地心坐标分量作为观测值,坐标分量的方差协方差阵作为全网平差时的定权依据。单天解输出的协方差矩阵为:

$$\Sigma_s = \sigma_s^2 Q_s = \sigma_s^2 (A^T P A + P_0)^{-1} \quad (1)$$

其中, $\sigma_s$  反映了单天解双差相位观测值的噪声水平, $Q_s$  反映了卫星和起算点位置间的几何因子影响。由 GPS 双差观测方程及起算点加权约束( $P_0$ )方法可以看出,它只反映了与站间基线相对位置成比例的几何传播因素,不能反映 GPS 定位中模型误差的影响。由  $\Sigma_s$  计算出的基线精度比基线重复性要好得多。因此,直接用  $\Sigma_s^{-1}$  作为网平差的权矩阵是不适当的,且会导致平差改正数的畸变。为此,对单天解的协方差矩阵作如下修正:

$$\Sigma'_s = \Sigma_{s0} + k \Sigma_s \quad (2)$$

经反复比较试算,网平差时取(单位 cm<sup>2</sup>):

$$\Sigma'_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \Sigma_s \quad (3)$$

为了保证全网平差结果的可靠性,根据基线向量的重复性,对单天解进行粗差检验,剔除了 214 这一天的单天解。

最后按全松弛基准进行整体平差, 即平差时除单天解提供的加权基准外, 没有引入新的外部位置基准。

## 4 结果分析

### 4.1 基线处理结果

根据以上讨论的处理方案, 对 M、T、A、F 区 10 天的观测数据进行了处理, 一共有 196 条基线。除个别基线外, 每条基线都有 7 天以上的单天解。由于各区 214 这一天的单天解与其它单天解有明显的差异, 将其全部剔除。

基线向量的重复性定义为<sup>[7]</sup>:

$$R = \left[ \frac{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - \bar{C})^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中,  $n$  为单天解个数,  $C_i$ 、 $\sigma_i$  分别为单天解的基线分量(或边长)及相应的方差,  $\bar{C}$  为单天解基线分量(或边长)的加权均值。图 2 给出了基线分量重复性与边长的关系。

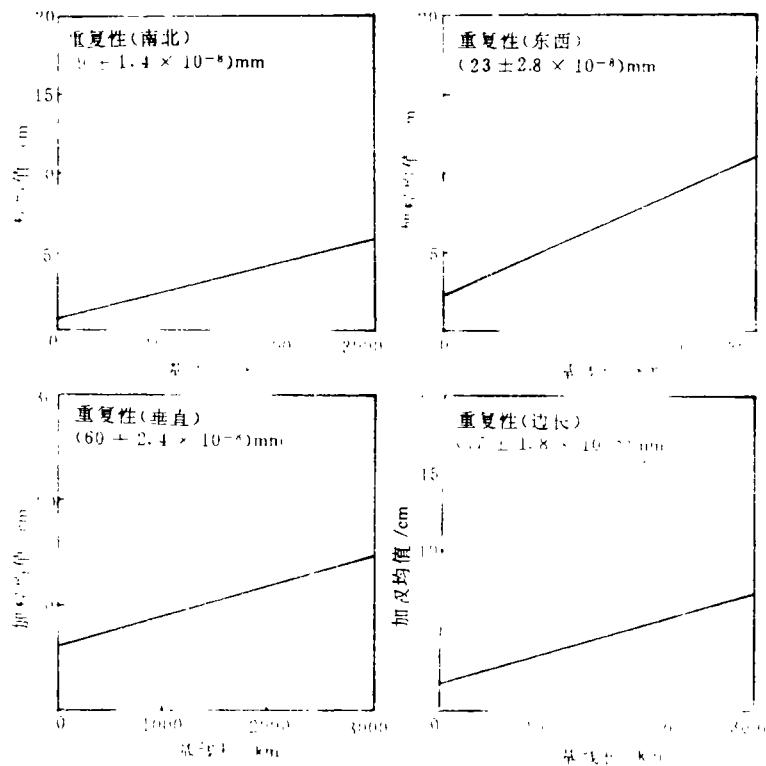


图 2 基线分量重复性

进一步以各基线重复性为观测值, 用线性拟合求出重复性的常数部分和与边长成比例的部分:

$$R_s = a + bL_s \quad (5)$$

各区及全网相应的拟合结果列于表 1。

表 1 基线分量及边长重复性 (/m)

	南北	东西	垂直	边长
A 区	$14+1.1 \times 10^{-8}$	$15+3.8 \times 10^{-8}$	$72+1.7 \times 10^{-8}$	$13+2.3 \times 10^{-8}$
T 区	$02+2.0 \times 10^{-8}$	$16+2.2 \times 10^{-8}$	$16+4.6 \times 10^{-8}$	$03+2.4 \times 10^{-8}$
M 区	$10+1.1 \times 10^{-8}$	$29+1.9 \times 10^{-8}$	$65+2.2 \times 10^{-8}$	$28+1.0 \times 10^{-8}$
F 区	$03+2.1 \times 10^{-8}$	$50+1.6 \times 10^{-8}$	$28+4.7 \times 10^{-8}$	$34+0.6 \times 10^{-8}$
全网	$09+1.4 \times 10^{-8}$	$23+2.8 \times 10^{-8}$	$60+2.4 \times 10^{-8}$	$17+1.8 \times 10^{-8}$

根据基线分量的重复性,经分析比较可知:

(1)尽管拟合参数的常数项部分较大,由于平均边长大于 1 000km,把两个部分合并在一起,南北方向重复性约为  $3 \times 10^{-8}$ ,东西方向重复性约为  $5 \times 10^{-8}$ ,垂直方向重复性约为  $9 \times 10^{-8}$ ,边长重复性约为  $5 \times 10^{-8}$ 。因此,'92 中国 GPS 会战精密处理结果的重复性在水平方向达到  $5 \times 10^{-8}$ ,垂直方向达到  $9 \times 10^{-8}$ 。

(2)不同类型接收机时标同步较好时,基线分量的重复性与同类接收机时标同步时形成的基线的重复性基本一致。

(3)当接收机同步误差较大时,基线分量的重复性较差,精细处理后可达  $10^{-7}$ 。

(4)所有与三亚点有关的基线其重复性均较差,大约在  $10^{-7}$ 。考虑到全网的完整性没有删除该点。另外,基线解中相应的方差也较大,因而整体平差时,不致影响其它点的精度。

#### 4.2 整体平差结果

整体平差后平面点位精度优于 5cm,垂直方向精度优于 8cm。最弱点点位精度接近 10cm。

无论直接基线还是区与区之间的间接基线(没有基线解),边长相对精度都优于  $2 \times 10^{-8}$ 。最弱边边长只有 228km,相对精度为  $6.7 \times 10^{-8}$ 。

表 2 列出了坐标改正数的分布。由表 2 可以看出,改正数基本符合正态分布规律。最大改正数为 0.426m。由于较大改正数对应的观测值方差亦较大,故仍不属于粗差。

表 2 坐标改正数区间分布表

	0~0.05m		0.05~0.10m		0.10~0.15m		0.15~0.20m		>0.20m		最大/m (绝对值)/m	平均 (绝对值)/m
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-		
$V_x$	121	114	48	49	9	6	7	4	0	0	0.185	0.043
$V_y$	125	73	58	41	21	19	6	10	2	2	0.426	0.057
$V_z$	146	129	36	35	4	4	0	4	0	0	0.174	0.033

#### 4.3 外部检核

由于目前长距离高精度定位结果很少,外部检核比较困难,这里只有由上海天文台提供的上海到武汉的激光测卫结果,其精度估计为  $6 \times 10^{-8}$ 。将激光测卫结果归算到'92 GPS 会战点上,与会战平差后结果进行比较,结果列于表 3。

表 3 说明, GPS 结果与 SLR 结果在坐标系统上存在一系统差值。边长差值约为  $1 \times 10^{-7}$ 。顾及 SLR 的误差,可以认为这条边的 GPS 结果亦达到  $10^{-8}$  量级。

表 3 GPS 与 SLR 比较表

		SLR	GPS	差 值
上 海	X	-6.474	-6.525	0.051
	Y	5.934	6.156	-0.222
	Z	6.781	6.718	0.063
武 汉	X	-8.795	-8.966	0.171
	Y	4.057	4.675	-0.618
	Z	0.624	0.862	-0.238
边 长		0.983	0.056	0.073

## 参 考 文 献

- 1 Bock Y. Interferometric Analysis of GPS Phase Observations. *Manuscripta Geodaetica*, 1986(11), 282~288
- 2 Schaffrin B. A Unified Scheme for Processing GPS Dual-band Phase Observations. *Bulletin Géodésique*, 1988(62), 142~160
- 3 Dong D. Global Positioning System Network Analysis with Phase Ambiguity Resolution Applied to Crustal Deformation Studies in California. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(13), 3941~3966
- 4 King R W. Documentation of GAMIT GPS Analysis Software. MIT, 1993.
- 5 Rocke C. Monitoring Selective Availability Dither Frequencies and Their Effect on GPS Data. *Bulletin Géodésique*, 1991(65): 162~169
- 6 Feigl K L. A Scheme for Reducing the Effect of Selective Availability on Precise Geodetic Measurements from the Global Position System. *Geophysical Research Letter*, 1991(18), 1289~1292
- 7 Dixon T H. First Epoch Geodetic Measurement with the Global Positioning System Across the Northern Caribbean Plate Boundary Zone. *Journal of Geophysical Research*, 1991 (96), 2397~2415
- 8 刘经南. GPS网与地面网综合数据处理商业化软件包的研制和应用. *测绘通报*, 1992(5): 1~6

## Data Analysis of '92 GPS Campaign in China

Liu Jingnan      Ge Maorong

(Institute of Earth Science and Survey Engineering, WTUSM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

**Abstract** The strategies for the data processing of the '92 GPS campaign in China using GAMIT (GPS analysis software) and GPSADJ (GPS network adjustment software) on a personal computer is discussed first. Then some problems in the data processing and the corresponding solving methods are described in detail. At last the results of the data processing is analysed. The repeatability of horizontal components and baseline length is better than  $5 \times 10^{-8}$ , and the repeatability of the vertical component is better than  $9 \times 10^{-8}$ . The relative accuracy of baseline length after network adjustment is about  $3 \times 10^{-8}$  and the accuracy of station position is about 6cm.

**Key words** '92 GPS campaign in China; high-precision relative positioning; network adjustment