

## 快速精密星历替代精密星历定位的初步研究

尹继尧<sup>1</sup>, 徐平<sup>2</sup>, 吴培稚<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 北京市地震局, 北京 100080)

**摘要:**由于 GPS 精密定位所需的 IGS 精密星历要在两周以后才能得到, 因而利用两天后即可得到的快速精密星历、12 小时后得到的超快速精密星历代替精密星历是 GPS 应用于地震短临预测的一个重要条件。本文利用北京市全球定位综合应用服务系统中五个 GPS 连续观测站一年半的数据, 分别用三种星历进行精密定位计算, 得到了小规模网中快速精密星历一般可以代替精密星历进行精密定位计算的结果。

**关键词:** 精密星历; 快速精密星历; 超快速精密星历; 统计分析; GPS

**中图分类号:** P228.4; P315.72\*5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2006)01-0036-06

### Preliminary Study on Rapid Ephemeris Replacing the Precise Ephemeris in GPS Locating Calculation

YIN Ji-yao<sup>1</sup>, XU Ping<sup>2</sup>, WU Pei-zhi<sup>2</sup>

(1. Institute of Earthquake Prediction, CEA, Beijing 100036, China; 2. Earthquake Administration of Beijing City, Beijing 100080, China)

**Abstract:** As the IGS precise ephemeris which is used in GPS precise positioning (for example, in GAMIT software) can only be available in two weeks later, it is an important condition for using GPS data in the earthquake short-term prediction that taking the IGS rapid ephemeris which can arrive in two days and the IGS ultrarapid ephemeris which can be obtained in 12 hours, both with as nearly same preciseness as the precise ephemeris with, to replace the IGS precise ephemeris. In this paper, based on the observation data of 5 GPS continuous stations in the global positioning integrated application and services system in Beijing in one and half year, the precise located calculation is done by using three IGS satellite ephemerides. The conclusion is that IGS rapid ephemeris can commonly replace the IGS precise ephemeris in calculation for small network.

**Key word:** Precise ephemeris; Rapid ephemeris; Ultrarapid ephemeris; Statistical analysis; GPS

## 0 引言

使用 GPS 观测数据进行定位均需星历数据, IGS(International GNSS Service)组织为了各种不同的需要提供了不同的星历,如精密星历、快速精密星历、超快速精密星历。精度最高的精密星历一般用于精密定位,实时定位一般用广播星历或超快速星历,广播星历的精度最低。在地震预测中需要用 GAMIT 等软件进行精密定位,所用的星历为精度最高的精密星历。而 IGS 组织提供的精密星历要在半

个月以后才能得到,即测站今日观测到的数据要在半个月后才能算出该站的坐标,显然这不利于地震短临预测。GPS 如不能有效的解决这个问题,会严重影响 GPS 地震监测的全面展开<sup>[1-7]</sup>。

目前我们可利用快速精密星历、超快速精密星历来代替精密星历进行定位计算,其中快速精密星历的时延为 2 日,超快速精密星历的时延为 12 小时,能满足地震短临预测的需要。这种代替能够实现不仅要看 IGS 提供的主要参数如卫星轨道、钟差

收稿日期:2005-08-24

基金项目:北京市自然科学基金项目(8041001);北京市科技攻关项目(H030630090190)

作者简介:尹继尧(1981—),男,浙江人,中国地震局地震预测研究所在读研究生,从事 GPS 数据分析。

的精度与精密星历相当,最终还要看处理实际数据的差异是否在允许的范围之内。

早期 IGS 组织提供的精密星历其卫星轨道精度为 30 ~ 40 cm,快速精密星历的精度更低。随着 GPS 定轨理论、轨道计算数学模型与数据处理软件的不完善,全球跟踪站数目的增多和跟踪站几何分布的改善,IGS 组织提供的卫星轨道和钟差的精度有了明显的提高。表 1 给出了 IGS 网站最近公布的与星历有关的信息。由表可见,对卫星轨道的精度,精密星历、快速精密星历、超快速精密星历十分接近;卫星钟差的精度,精密星历、快速精密星历接近(不大于 0.1 ns),超快速精密星历在 2 ns 左右<sup>[8-11]</sup>。由此可见,根据轨道精度对定位结果影响的规律,在目前条件下,特别是对于省区范围内的小规模网,使用快速精密星历、超快速精密星历代替精密星历进行精密定位计算是可能的,值得尝试。

表 1 IGS 网站给出的各种卫星星历相关信息

星历名称	卫星轨道精度	卫星钟差精度	时延
广播星历	~200 cm	~7 ns	实时
超快速精密星历	<5 cm	~2 ns	12 小时
快速精密星历	<5 cm	0.1 ns	2 日
精密星历	<3 cm	<0.1 ns	15 日

本文利用北京市全球定位综合应用服务系统中 5 个 GPS 连续观测站及 10 个 IGS 跟踪站一年半的数据,采用 GAMIT 软件进行数据处理。在同样的参数设置条件下,以精密星历定位的结果为比较基准,考察使用快速精密星历、超快速精密星历与精密星历定位结果的异同。比较的方法主要采用差值法,同时考虑前兆方法常用的一些统计量,如均值、标准差、相关系数、斜率等比较。另外,为了能更好地对这三种精密星历进行比较和分析,在进行数据处理时分别采用 7 日综合解和单日进行解算,观测时间长度与观测精度的关系另文分析。

## 1 GPS 定位解算方案

### 1.1 定位解算使用的软件

本文主要利用由美国麻省理工学院(MIT)和加利福尼亚大学海洋研究所(SIO)等研制和提供的 GAMIT/GLOBK 软件对观测数据进行处理。该软件是用于大地测量目的的 GPS 分析软件,以后不断改进而成为应用面较为广泛的高精度 GPS 分析软件。GAMIT 部分主要有 ARC(轨道积分)、MODEL(组成观测方程)、AUTCLN(自动数据筛选)、SINCLN(单差数据筛选站自动修复周跳)、DBLCLN(双差数据筛选自动修复周跳)、CVIEW(人工交互式数据筛选)

以及利用双差观测按最小二乘法求解参数的 SOLVE 等主要程序及相关的程序组成,它可以解算卫星轨道和站坐标以及其它一些辅助参数等。GLOBK 是利用卡尔曼滤波技术进一步分析有 VLBI 和 GAMIT 等 GPS 分析软件解算的解向量和它们的协方差阵的软件。通过运行 GLOBK,可对 GAMIT 等软件得到的多日、多期和多个同步观测区的计算结果进行综合平差分析,求出精密轨道、观测点的精确坐标和不同期观测各观测点的变化速率等。

### 1.2 数据来源

GPS 观测数据来源于北京市全球定位综合应用服务系统中 5 个 GPS 连续站(表 2)。观测时间为 2003 年 6 月到 2004 年 12 月,共一年半。由于台网整体调试、通讯故障、个别台站进行中期改造等,造成了一些缺数,严重时不能求得 7 日解,1 日解的缺数段更多。本文以 7 日解为主,1 日解为辅进行分析研究。

表 2 观测台站基本参数表

代码	站名	经度	纬度
CHAO	朝阳	N39°45'	E116°29'
DAXN	大兴	N39°31'	E116°21'
DSQI	东三旗	39°53'	116°24'
SHIJ	石景山	39°45'	116°12'
YANQ	延庆	40°15'	115°58'

3 种星历数据均来源于 IGS 分析中心。这里需要特别指出的是,IGS 提供的精密星历和快速精密星历格式一致,但超快速精密星历为两天数据,其中前一天数据为基于跟踪站的观测值计算得到数据,后一天为预报数据。在利用超快速精密星历进行定位计算时,我们只用前一天的星历数据,不用预报数据。在进行数据处理中为保证结果的可比性和可靠性,除了星历不同外,软件运行的环境及参数设置等均保持不变。

### 1.3 数据处理中一些参数的选取

IGS 跟踪站的选择:在使用 GAMIT 软件进行基线计算时,IGS 跟踪站的选择对计算结果有一定影响。本文选取观测时间长、速度稳定、误差小、具有良好几何分布的 10 个 IGS 跟踪站(BJFS, WUHN, LHAS, KUNM, IRKT, URUM, DAEJ, GUAM, TSKB, USUD),参与北京市 GPS 监测网各站的定位解算。解算中所需的一些主要参数设置见表 3。

GLOBK 平差主要约束:在完成 GAMIT 计算之后,进行 GLOBK 平差计算,计算中采用 ITRF2000 框架。平差计算主要约束为:IGS 核心站约束为 0.003 m, 0.003 m, 0.010 m;与 SIO 的全球解 H 文

件联合求解,放松轨道至 20 m。

表3 GAMIT 软件的参数设置表

历元间隔	30 s
截止高度角	10°
处理模式	松弛解
卫星钟差改正	用广播星历的钟差参数
接收机钟差改正	用伪距计算出的钟差
对流层误差模型	Saastamoninen 模型和缺省气象参数
天顶延迟参数个数	13/天
电离层延迟模型	消除电离层的 LC-HELP 观测量
数据筛选	以 AUTCLN 为主,辅之 CVIEW
光压模型	BERNE
卫星轨道约束	20 m
IGS 跟踪站坐标约束	(NER) 0.005 m 0.005 m 0.010 m
GPS 监测站坐标约束	(NER) 9.999 m 9.999 m 9.999 m

位移基准:位移变化的时间序列分析中必须选择描述位移的相对参照点,即所谓的位移基准。对于地壳运动观测网,位移基准有观测网的内部基准(即取网内的点作基准)与观测网的外部基准或模型基准(如位错模型基准,板块运动模型基准等),它们均具有相应的运动学或动力学意义。本文采用的是内部基准进行时间序列分析,选择了网内较为稳定的五个点作为基准,分别为:BJFS, CHAO, DAXN, SHIJ, YANQ。

## 2 7日综合解结果分析

为了地震短临预测的需要,需要把最新的半个月数据用快速精密星历或超快速精密星历替代精密星历进行计算。为了实现这种替代必须处理全部数据,针对缺数、干扰、仪故等环境原因分析它们的异同及适用范围。我们利用上文所介绍的数据处理方法,分别用精密星历,快速精密星历,超快速精密星

历对表2中的5个连续站进行了数据处理。

### 2.1 数据处理结果时序图

图1、2是东三旗、大兴台定位计算结果时序变化曲线,时间从2003年6月8日到2004年12月18日,求得基准站水平和垂直位移的时间序列。为了便于比较,图1、2中的坐标一致,N分量加上基值20 mm, E分量加上基值10 mm。

从图1、2可以看出,利用三种精密星历处理后所得到的时间序列在总体趋势变化上是一致的,尤其东三旗台的垂直分量,在持续下降的趋势变化上(可能与当地开采地下水有关)有几个明显的波动变化在三类图中都得到很好的反映。需要特别指出的是,用GAMIT/GLOBK解算上述5个站的坐标,水平分量中误差一般在2 mm左右,垂直分量中为5 mm左右,在有些情况下,如数据量太少、有干扰等,中误差还要大些。

### 2.2 差值的比较

以精密星历的结果为准(做减数),快速星历或超快速星历的结果为被减数,两两相减分别得到两组数据。如果差值垂直分量在10 mm以内,水平分量在±4 mm以内,则表明它们在统计上没有显著差别。

图3为5个台利用快速星历和精密星历得到的7日解的差值时序图,图4为利用超快速星历和精密星历得到的7日解的差值时序图。图中的石景山台的多路径效应较大,延庆台的中间改造和设备故障较多,可能是引起时间序列曲线相对变化大的原因。从图3和图4看到:

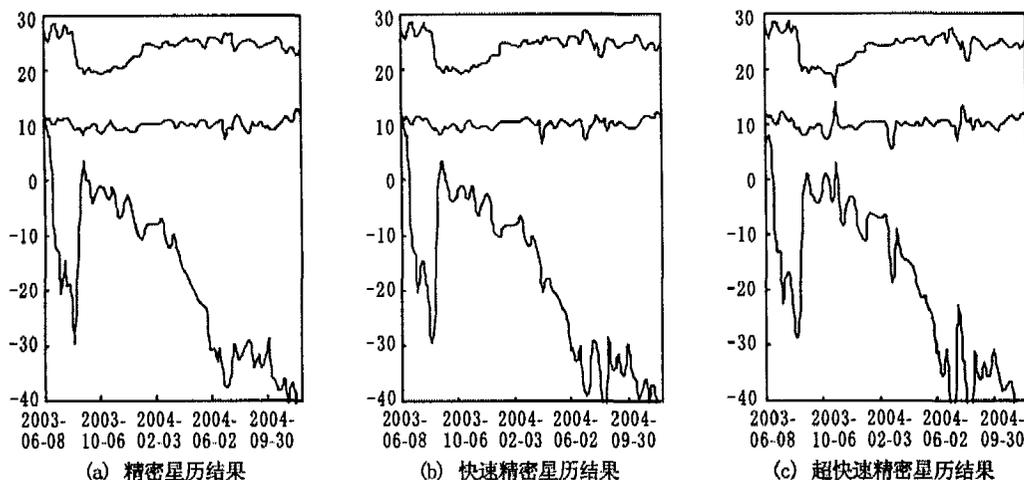


图1 东三旗台 N(上,加20 mm), E(中,加10 mm), U(下)分量时序图

Fig. 1 Time series of N (up, plus 20 mm), E (middle, plus 10 mm), U (down) at DSQI station.

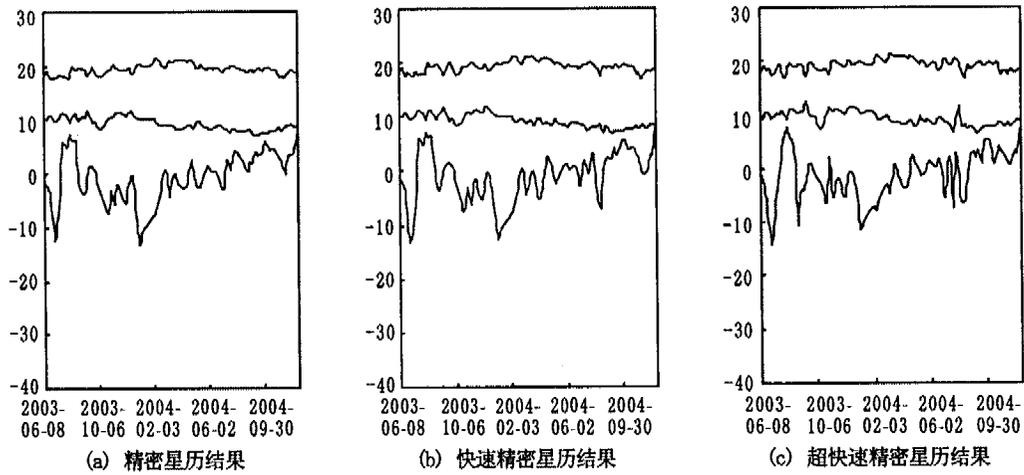


图 2 大兴台 N(上,加 20 mm),E(中,加 10 mm),U(下)分量时序图

Fig. 2 Time series of N (up, plus 20 mm), E (middle, plus 10 mm), U(down) at DAXN station.

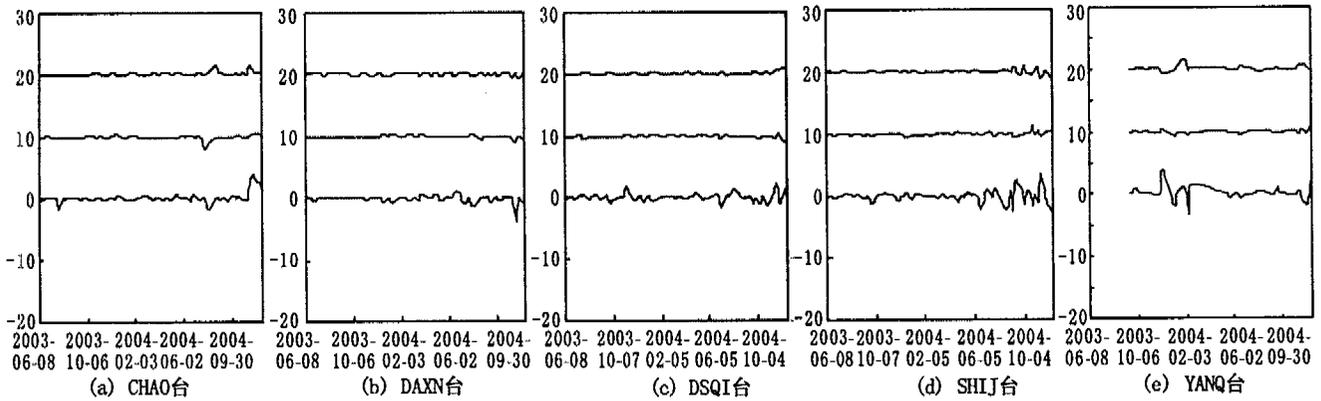


图 3 7 日解 N(上,加 20 mm),E(中,加 10 mm),U(下)分量快速星历与精密星历差值时序图

Fig. 3 Difference time series of N (up, plus 20 mm), E (middle, plus 10 mm), U(down) in seven days between Rapid ephemeris and Precise ephemeris.

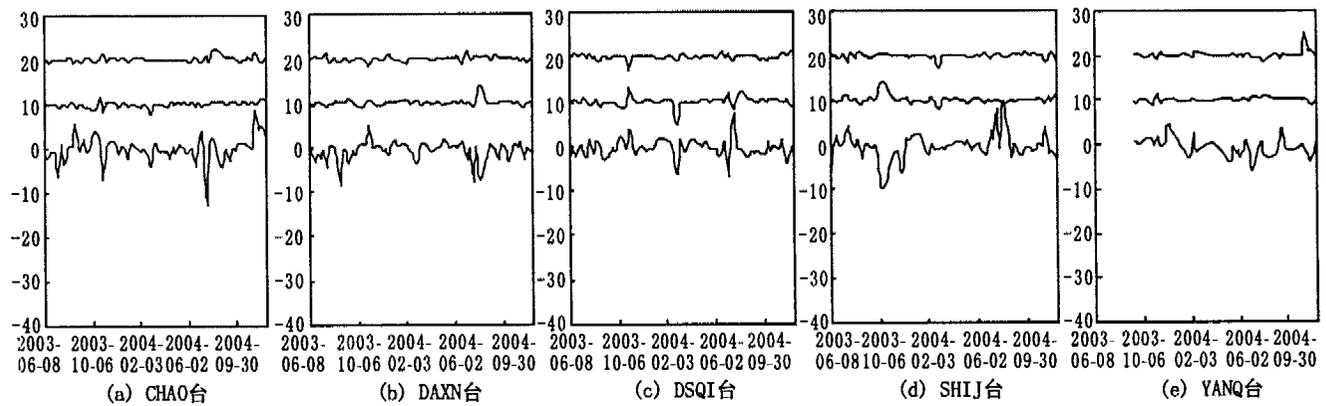


图 4 7 日解 N(上,加 20 mm),E(中,加 10 mm),U(下)分量超快速星历与精密星历差值时序图

Fig. 4 Difference time series of N (up, plus 20 mm), E (middle, plus 10 mm), U(down) in seven days between Ultrarapid ephemeris and Precise ephemeris.

(1) 所有差值均未超出允许的误差范围,即 4 mm(水平分量)、10 mm(垂直分量),由此可见对于 7 日解使用超快速星历、快速星历与使用精密星历无显著差别;

(2) 若以精密星历为准,显然曲线在零附近变动幅度越小越好,则快速星历的结果要优于超快速星历;

(3) 各差值曲线与图 1 和图 2 中的相应曲线相

比,波动、持续变化、高频成分、低频成分等变化形态几乎没有传递过来,说明了这些常用的分析形态保留在各分量的时间序列中了;

(4) 在分析时,图中几个幅度较大的差值(虽

然在误差范围以内)是需要重点研究的,经检查,这些点大多数为原始数据量太少等已知原因造成的,个别点找不到原因,这也与我们的分析水平有关。

分析表4中各统计量,除个别数据外,差值的均

表4 差值的几个统计量比较

台站	快速星历			快速星历		
	N	E	U	N	E	U
东三旗	0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.05	-0.68
差值 大兴	0.18	0.18	-0.57	0.08	0.30	-0.70
均值 石景山	0.05	0.00	-0.14	-0.13	-0.01	-0.31
/mm 朝阳	0.06	-0.02	0.21	0.17	0.02	-0.12
延庆	0.10	-0.02	0.02	-0.06	0.01	-0.48
东三旗	0.22	0.21	0.66	0.62	0.56	2.93
差值 大兴	0.18	0.19	0.57	0.53	0.62	2.18
标准 石景山	0.34	0.28	0.98	0.62	0.75	2.74
差 朝阳	0.29	0.30	1.08	0.58	0.56	2.93
/mm 延庆	1.09	0.25	1.13	0.99	0.48	2.14
东三旗	0.000 46	-0.000 30	-0.000 34	0.000 28	0.000 20	-0.000 63
差值 大兴	-0.000 06	0.000 40	-0.000 89	0.000 31	0.000 29	0.000 64
斜率 石景山	-0.000 58	0.000 34	-0.000 34	-0.000 02	-0.000 67	0.000 64
朝阳	0.000 65	0.000 05	0.001 72	0.000 57	0.001 00	0.002 99
延庆	0.000 34	0.000 30	-0.000 92	0.001 45	0.000 62	-0.004 57
东三旗	0.995	0.976	0.999	0.969	0.666	0.989
相关系数 大兴	0.983	0.994	0.992	0.864	0.883	0.890
石景山	0.933	0.975	0.983	0.834	0.880	0.892
朝阳	0.964	0.963	0.991	0.829	0.895	0.944
延庆	0.902	0.964	0.907	0.828	0.894	0.686

值,快速精密星历比超快速精密星历更接近零值;差值的标准差,快速精密星历小于超快速精密星历的结果;差值斜率,快速精密星历比超快速精密星历更接近零值;相关系数,快速精密星历比超快速精密星历更接近1。可以认为快速星历的结果更接近精密星历的结果。

### 3 单日解结果分析

由于单日解的误差远大于7日解,在当前GPS地震预测分析中的应用受到一定限制,但短临预报需要比7日解更短的定位数据,如3日解、1日解、甚至几小时解(我们将另文讨论取得小于7日解的可能性)。以前述相同方法来讨论三种星历定位对单日解的影响,因篇幅原因,只给出主要图件和主要结论。用GAMIT/GLOBK求得的单日解垂直分量的误差一般为15 mm左右,水平向的NS分量为5 mm左右,EW分量为8 mm左右。与精密星历结果差值在三个分量上的误差应低于它们的两倍。

图5为单日解北京5个台的快速星历和精密星历所得的差值时序图。差值绝大部分都在0附近波动,虽然突跳点比7日解要多,但都没有超出误差范围之外。有些突跳点还存在同步现象,其中大部分

是原始数据量不足造成的,限于篇幅在此不做详细讨论。

超快速星历和精密星历的差值在各台站的均值虽然接近于零,但有相当一部分超过了上述给出的误差范围,因此在目前参数设置条件下,对于北京地区现有规模的网超快速星历不宜代替精密星历求单日解,对于规模小的网仍可能有用。

### 4 结论

地震短、临预测需要几天、几小时的基础观测数据,目前使用IGS半个月后的精密星历进行GPS定位计算不能满足这种需要,而用时延较短的快速精密星历、超快速精密星历代替精密星历进行解算有助于GPS实现地震预测在短临预报中的应用。随着GPS定轨理论及轨道计算数学模型与数据处理软件的不断完善,以及全球跟踪站数目的增多和跟踪站几何分布的改善,IGS确定GPS卫星轨道的精度有了明显的提高。本文结果表明,根据地震预测的需要及GPS观测网规模的大小,在用GAMIT/GLOBK定位计算时用快速精密星历、超快速精密星历代替精密星历进行求解是可能的。经差值对比和一些常用统计量分析表明:

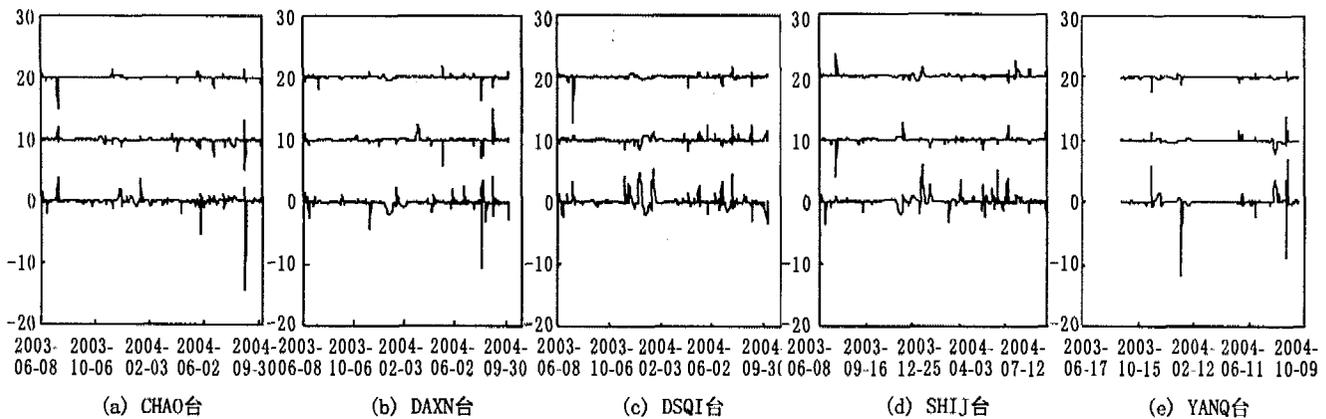


图5 单日解N(上,加20 mm),E(中,加10 mm),U(下)分量快速星历与精密星历结果差值时序图

Fig. 5 Difference time series of N (up, plus 20mm), E (middle, plus 10mm), U (down) in one day between rapid ephemeris and precise ephemeris.

(1) 对于7日综合解,快速精密星历和超快速精密星历一般可代替精密星历进行解算,快速精密星历解算的结果要优于超快速精密星历的结果;

(2) 对于1日解,快速精密星历一般可代替精密星历进行解算,但超快速精密星历不宜代替精密星历进行解算。

由此可见,对于像北京地区目前规模的GPS观测网及规模更小的网,使用快速精密星历代替精密星历对最新半个月的GPS数据进行定位计算一般是可行的。

本文得到顾国华研究员、戴连君高级工程师、邢成起研究员、屈利军研究生等人的帮助,在此表示衷心的感谢。

#### [参考文献]

- [1] 王敏,沈正康,牛之俊,等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型研究[J]. 中国科学(D辑),2003,23(增刊):21-32.
- [2] 甘卫军,沈正康,张培震,等. 青藏高原地壳水平差异运动的GPS观测研究[J]. 大地测量与地球动力学,2004,24(1):29-35.
- [3] 王琪,牛之俊,石俊成. 中国地壳运动观测网络基本站观测精

度研究[J]. 大地测量与地球动力学,2003,23(3):9-13.

- [4] 顾国华,孙惠娟,孙汉荣. GPS形变检测网起算点坐标对水平形变的影响[J]. 地壳形变与地震,1999,19(1):43-48.
- [5] 顾国华,张晶. 中国地壳运动观测网络基准站GPS观测的位移时间序列结果[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(2):61-67.
- [6] 陈智梁,张选阳,沈凤,等. 中国西南地区地壳运动的GPS监测[J]. 科学通报,1999,44:32-35.
- [7] 孟国杰,赵承坤,顾国华,等. 中国地壳运动观测网络首期观测数据处理[J]. 地震,2001,21(1):63-68.
- [8] Shen Z K, Jackson D D, Ge B X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements[J]. J. G. R., 1996,101(B12):27957-27979.
- [9] Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, et al.. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China[J]. Intern. Geological Review, 1997, 37(8):661-735.
- [10] Wessel P, Bercovici D. Interpolation with spline in tension: a Green's Function approach[J]. Mathematical Geology, 1998,30(1):77-93.
- [11] Darby D J, Meertens C M. Terrestrial and GPS measurements of deformation across the Taupo back arc and Hikurangi forearc region in New Zealand[J]. J. G. R., 1996,23(22):3103-3106.