

• 经验交流 •

# GPS 基线解算和质量控制

郭海洋\*

(中国石油天然气集团公司物探监理中心)

## 摘 要

郭海洋 GPS 基线解算和质量控制 石油地球物理勘探, 2001, 36(6): 773~ 781

本文介绍了 GPS 基线向量解算的基本原理、过程和质量控制点, 重点分析了影响 GPS 基线解算结果的因素以及对这些因素的判别。通过对 GPS 基线解算的精细化处理, 能够获得高质量的定位点的坐标, 并为 GPS 网平差提供符合要求的基线向量。

关键词 GPS 基线解算 质量控制 精细化处理

## ABSTRACT

Guo Haiyang GPS base line calculation and its quality control OGP, 2001, 36(6): 773 ~ 781

The paper introduced the basic principal, process and quality-controlling point of GPS base line vector calculation, focused the analysis on factors that have influence on results of GPS base line calculation and how to identify these factors. Through refined processing of GPS base line calculation, the coordinates of position points with high quality have been obtained and they provided the base line vector consistent with demand for balancing of GPS net.

**Key words:** base line calculation, quality control, refined processing

## 引 言

全球定位系统(Global Positioning System)简称 GPS, 最初是由美国国防部作为军事系统发展起来的。该系统可以向全球用户提供连续、实时的三维导航定位, 现在已在全球范围内的航空、矿产勘探、交通、通讯、导航和测绘等领域得到广泛应用, 特别是使测绘学科发生了巨大的变化, 并导致该行业进行一场技术革命。

由于 GPS 相对定位技术要求建立测量控制点(网), 与常规方法相比, 不要求各点之间互相通视, 可以全天候测量, 具有观测数据自动记录、观测时间短和测量精度高等许多优点, 因此, GPS 测量控制点(网)被广泛用于物探工程测量中。

物探工程测量主要采用静态相对定位方法, 布设基线或 GPS 网来加密控制点。所谓 GPS

\* Guo Haiyang, Inspection Center of Geophysical Prospecting, CNPC, Zhuozhou City, Hebei Province, 072750, China  
本文于2001年7月6日收到。

网就是由独立基线构成的基线向量网。无论采用基线加密控制点, 还是 GPS 网平差加密控制点, 基线解算都是 GPS 数据处理中至关重要的一步。所以, 本文重点介绍 GPS 基线向量的解算和质量控制。

## GPS 基线解算的基本原理

基线解一般采用差分观测值, GPS 载波相位测量值可以在卫星间或接收机间求差, 也可以在不同历元间求差。在卫星间求一次差、在接收机间求一次差以及在不同历元间求一次差是常见的三种求一次差的方法。对载波相位测量的一次差还可以继续求差, 称为求二次差。常见的求二次差的方法也有三种, 即在接收机和卫星间求二次差、在接收机和历元间求二次差以及在卫星和历元间求二次差。二次差还可以继续求差, 称为求三次差。求三次差的方法只有一种, 即在接收机、卫星和历元间求三次差。考虑到 GPS 定位的误差源, 实际上经常采用的求差法只有三种, 即在接收机间求一次差、在接收机和卫星间求二次差以及在接收机、卫星和历元间求三次差(图1)。

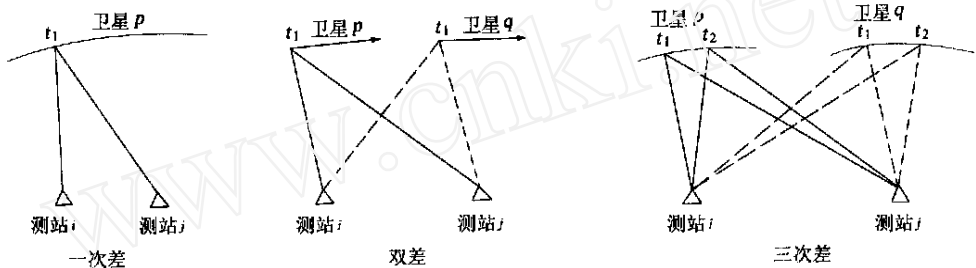


图1 求一次差、二次差、三次差示意图

较为常用的差分观测值为双差观测值, 即由两个测站(接收机)的原始观测值分别在测站和卫星间求二次差后得到的观测值(图1)。双差观测值可以表示成下面的形式

$$\Delta \varphi_{ij}^p = \frac{f}{c} \Delta \rho_{ij}^{pq} + l_{ij}^{pq} - \frac{f}{c} \left( \delta \rho_{ion} \right)_{ij}^{pq} - \frac{f}{c} \left( \delta \rho_{trop} \right)_{ij}^{pq} - \left( N_0 \right)_{ij}^{pq}$$

其中

$$\Delta \varphi_{ij}^q = \Delta \varphi_{ij}^p - \Delta \varphi_{ij}^p$$

$$\Delta \rho_{ij}^q = \Delta \rho_{ij}^p - \Delta \rho_{ij}^p$$

$$l_{ij}^{pq} = l_{ij}^p - l_{ij}^q$$

$$l_{ij}^p = \frac{f}{c} \left( \hat{\rho}_j^p V_{T_j} - \hat{\rho}_j^p \Delta \tau_j^p - \hat{\rho}_i^p V_{T_i} + \hat{\rho}_i^p \Delta \tau_i^p \right)$$

$$l_{ij}^q = \frac{f}{c} \left( \hat{\rho}_j^q V_{T_j} - \hat{\rho}_j^q \Delta \tau_j^q - \hat{\rho}_i^q V_{T_i} + \hat{\rho}_i^q \Delta \tau_i^q \right)$$

$$\left( \delta \rho_{ion} \right)_{ij}^{pq} = \left( \delta \rho_{ion} \right)_{ij}^q - \left( \delta \rho_{ion} \right)_{ij}^p$$

$$\left( \delta \rho_{trop} \right)_{ij}^{pq} = \left( \delta \rho_{trop} \right)_{ij}^q - \left( \delta \rho_{trop} \right)_{ij}^p$$

$$\left( N_0 \right)_{ij}^{pq} = \left( N_0 \right)_{ij}^q - \left( N_0 \right)_{ij}^p$$

式中:  $\Delta \varphi_{ij}^q$  为在接收机  $j$  和  $i$  至卫星  $q$  和  $p$  之间的二次差虚拟观测值;  $\Delta \rho_{ij}^{pq}$  为在卫星  $q$  和  $p$  至

接收机  $j$  和  $i$  之间的距离二次差:  $\left(\delta\rho_{ion}\right)_{ij}^{pq}$  为在接收机  $j$  和  $i$  至卫星  $q$  和  $p$  之间的电离层延迟之二次差;  $\left(\delta\rho_{trop}\right)_{ij}^{pq}$  为在接收机  $j$  和  $i$  至卫星  $q$  和  $p$  之间的对流层延迟之二次差;  $\left(N_0\right)_{ij}^{pq}$  为在接收机  $j$  和  $i$  至卫星  $q$  和  $p$  之间的整周未知数之二次差;  $V_{T_i}, V_{T_j}$  分别为接收机  $i, j$  的钟差;  $\Delta t_p^i$ 、 $\Delta t_q^i$  分别为第  $p, q$  颗卫星信号传到接收机  $i$  所用的时间;  $\Delta t_p^j$ 、 $\Delta t_q^j$  分别为第  $p, q$  颗卫星信号传到接收机  $j$  所用的时间。

若在某一历元中, 对4颗卫星进行了同步观测, 则每个历元在两个测站上共有8个载波相位观测值, 可以组成4个一次差观测值和3个二次差观测值。

在进行基线解算时, 电离层延迟和对流层延迟一般并不作为未知参数, 而是通过模型改正或双频改正将它们消除。因此, 基线解算时一般只有两类参数: 一类是测站的坐标参数, 数量为3(基线解算时将一个端点的坐标作为已知值固定); 另一类是整周未知数, 数量为  $n-1$  ( $n$  为同步观测卫星总数)。

## GPS 基线解算的分类

采用静态相对定位方法进行控制点加密, 实际上是用多台接收机进行同步观测, 以便确定各点间的相对位置。所谓同步观测, 是指在多个点上设置接收机, 同时在相同时段内连续跟踪、观测相同的若干颗卫星。同步观测时间段简称时段。当有  $m$  台 GPS 接收机进行了一个时段的同步观测后, 每两台接收机之间就形成一条基线向量(我们将这种两点间的相对位置量称为基线向量坐标, 对应于两点间的长度称为基线长度), 所有同步观测的基线向量数为  $m(m-1)/2$  (图2)。其中最多可以选出相互独立的同步观测基线数为  $m-1$  条 (图3)。

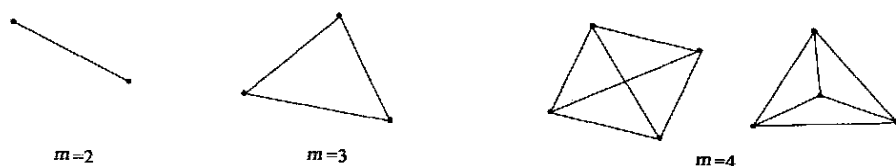


图2 同步观测测站个数与基线向量数的关系

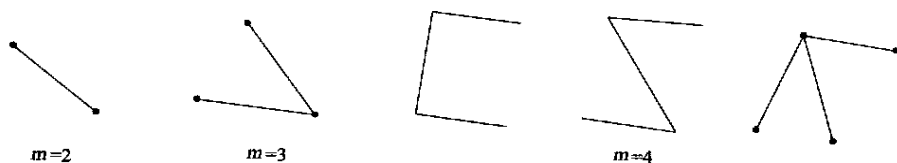


图3 同步观测测站个数与相互独立的基线向量数的关系

独立基线的选取有多种选择, 关键是要保证所选的独立基线不能构成闭合环。凡是构成了闭合环的同步基线是函数相关的, 同步观测获得的独立基线虽然不具有函数相关的特性, 但它们是误差相关的。基线解算一般分为单基线解和多基线解。

### 单基线解

所谓单基线解算, 就是不顾及同步观测基线间的误差相关性, 对每一条基线单独进行解算。由于其基线解算结果无法反映同步基线间误差的相关性, 所以不利于 GPS 网平差处理。

## 多基线解

多基线解的解算是在顾及了同步观测基线间误差相关性的情况下,对同步观测的所有基线一并计算。由于多基线解在解算时考虑了同步观测基线间的误差相关性,所以在理论上是严密的,有利于 GPS 网平差计算。

## GPS 基线解算的过程

目前,我国使用的绝大部分软件是接收机厂家配备的处理软件,国内也于20世纪90年代初开发研制出 GPS 数据处理软件。上述软件的使用方法虽具有不同的特点,但 GPS 基线解算过程是基本相同的。

### 观测数据的读入

在 GPS 外业观测中,每天必须把原始观测数据输入到计算机中。在进行基线解算时,需首先读取这些 GPS 原始观测数据。接收机厂家配备的 GPS 数据处理软件,能读取本厂生产的 GPS 接收机的原始观测数据,而不能直接读取其他厂家生产的 GPS 接收机的原始观测数据;如果要处理这些原始观测数据,首先需要进行格式转换。目前最常用的格式转换软件是 R NEX 格式。

### 输入数据的检查

在把原始观测数据输入到计算机中后,就需要对野外手工输入的原始观测数据进行检查,检查的内容有测站名、测站坐标、天线高(包括斜高以及天线高固定偏差)等,如有错误立刻进行修改。

### 设置基线解算的参数

设置基线解算的参数是基线解算的一个重要环节。基线解算的参数包括单基线解与多基线解、卫星截止高度角、电离层与对流层改正模型、 $L_1$ 与 $L_2$ 频率选择、解算模糊度的基线长度、单位权中误差(RM S)、整周模糊度检验值(RAT D)、卫星选择、时段选择等。通过设定基线解算的控制参数,用以确定基线处理方法和基线的精化处理。

### 基线解算

GPS 接收机采集的数据是接收机天线至卫星的距离和卫星星历等数据,而不是常规测量所测的地面点间的边长、角度和高差等。因此,接收机采集的 GPS 数据还需要通过一系列的处理,才能得到定位成果。

#### GPS 测量数据的预处理

GPS 测量数据处理包括观测值的预处理、基线向量解算和 GPS 向量网与地面网的联合平差等步骤。GPS 测量数据预处理前,需要先将接收机采集的数据通过传输、分流,解译成相应的数据文件。GPS 测量数据预处理的目的是对野外采集的卫星信号和数据数据进行编辑、加工与整理,分离出各种专用信息文件,为严密数据处理作准备。预处理工作包括:

(1) 数据检验。对观测数据进行平滑滤波检验,剔除观测值中的粗差,删除无用观测值。

(2) 数据格式的标准化。将各类接收机的数据文件加工成彼此兼容的标准化文件。包括文件记录格式标准化、数据类型标准化、数据项目标准化、数据单位标准化和采样间隔密度标准化等。

(3) GPS 卫星轨道方程的标准化。一般用一多项式拟合观测时段内的星历数据, 包括卫星轨道位置的地固坐标系坐标计算和分段轨道拟合的标准化。

(4) 诊断整周跳变点。发现并修复原始观测值周跳, 使原始观测值复原。

(5) 星钟多项式标准化。卫星钟差多项式的拟合及标准化。

(6) 对观测值进行系统误差改正。如相对论改正和大气折射模型改正。

预处理所采用的方法和模型的优劣, 将直接影响最终成果的质量, 是提高 GPS 测量精度的重要环节。

### 基线解算

预处理完成后就可进行基线解算, 基线解算的过程实际上是一个平差的过程, 平差所采用的观测值主要是双差观测值。基线解算时的平差分以下三个阶段进行:

(1) 初始平差。根据双差观测方程, 组成误差方程和法方程后, 求解待定的未知参数及其精度信息; 通过初始平差, 解算出整周未知数参数和基线向量的实数解或浮动解。

(2) 整周未知数的确定。根据初始平差结果, 使用搜索法将整周未知数固定成整数。

(3) 确定基线向量的固定解。将确定了的整周未知数作为已知值, 仅将待定点的坐标作为未知参数再次进行平差, 解算出基线向量的整数解(即固定解), 基线解算是自动完成的。

对于 GPS 控制网来说, 需要从所有基线中选取独立基线组成基线向量网, 然后才能进行 GPS 网平差计算。

## GPS 基线解算的质量监控

基线解算完成后, 必须对基线解算进行质量检查, 检查的内容有: 短基线(一般认为小于 20km 的基线)的模糊度是否解出、单位权中误差(RM S)、整周模糊度检验值(RA T D)、相对定位精度因子(RDOP)等。对于 GPS 网平差来说, 还需要检查同步环闭合差、异步环闭合差和重复基线较差, 合格的基线才可以使用, 不合格的基线应对其结果进行残差分析, 然后重新解算, 重新解算仍不合格的基线需重新测量。有些厂家的 GPS 数据处理软件会把基线解的主要质量指标显示在屏幕上, 以便于检查。

### 单位权中误差 RM S

RM S 为基线解算时的单位权中误差, 即

$$RM S = \sqrt{\frac{V^T P V}{f}}$$

式中:  $V$  为观测值的残差;  $P$  为观测值的权矩阵;  $f$  为多余观测数。

RM S 表明了观测值的质量, 与观测条件好坏无关, 它可看作表示内符合精度的一项指标。  
模糊度检验值 RA T D

RA T D 值反映了所确定出的整周模糊度固定为整数的可信度(可靠性), 它可表示为

$$RA T D = \frac{RM S_{\text{次最小}}}{RM S_{\text{最小}}}$$

显然 RA T D 值应大于或等于 1。该指标与观测值的质量有关, 也与观测条件的好坏有关。RA T D 值越大, 说明整周模糊度固定为整数的可信度越高, 一般情况下, RA T D 值应大于 3。

双差解将整周模糊度固定, 只把测站的坐标作为未知数来平差, 得到的解叫双差固定解, 只要能成功固定整周模糊度, 双差固定解的精度最高。

#### 相对定位精度因子 RDOP

RDOP 值是指在基线解算时待定参数的协因数阵的迹  $\text{tr}(Q)$ , 即

$$\text{RDOP} = [\text{tr}(A^T P A)^{-1}]^{\frac{1}{2}}$$

其中:  $A$  为误差方程式中待定坐标未知数前面的系数阵;  $P$  为相应观测值的权阵。

RDOP 值的大小与基线位置和卫星在空间的几何分布及观测条件有关, 当位置确定后, RDOP 值就只与观测条件有关了。而观测条件又是时间的函数, 因此, 对某一条基线向量来说, RDOP 值的大小与观测时间段有关。

RDOP 值更客观地反映了整个测段中卫星几何强度(观测条件)对相对定位精度的影响, 它不受观测值的影响。为保障相对定位的精度, RDOP 值一般不超过某一定值。对于约1小时的静态定位, RDOP 一般为0.1, 对于经过初始化确定了整周模糊度的动态相对定位, 由于观测值很少, RDOP 值可达到约0.4。

#### 基线长度的中误差

基线解算后, 要求基线长度中误差在标称精度计算的精度值内, 目前大多数厂家的软件规定的基线长度标称精度为  $(0.5 \sim 1.0 \text{ cm}) + (1 \text{ ppm} \sim 2 \text{ ppm}) \times D$ ,  $D$  为基线长度(单位: km)。小于10km 的基线中误差应为0.01~0.02m, 若超过此限, 基线解算成果的可信度较差。

20km 以内的基线, 单频接收机接收的数据通过差分处理, 就能保证定位结果的精度。当基线长度大于20km 时, 应使用双频接收机观测, 以便有效地消除电离层的影响。特别是太阳活动高峰期时, 使用双频接收机的数据处理结果明显优于单频接收机的数据处理结果。使用单频接收机的数据处理的基线长度在正常年份比真值约小0.5ppm~0.7ppm, 在太阳活动高峰期的一、二月份的中午可达3ppm~5ppm。2000年就是太阳活动高峰期, 所以经常出现 GPS 观测数据质量不高的现象。

#### 双差固定解与双差浮动解(实数解)

整周模糊度在理论上是一个整数, 但平差解算得到的却是一个实数。

对于短基线(例如小于20km 的基线), 由于双差模糊度具有很好的整数特性, 就将整周模糊度确定为整数, 在进一步平差时不作为未知数求解, 这种解算方法解算出的基线结果称为双差固定解。

对于长基线来说, 由于电离层折射误差、卫星轨道误差等难以有效地消除, 整周模糊度求解精度往往很低, 这时将整周模糊度勉强取为整数, 对于相对定位精度有损无利, 这时维持整周模糊度的实数解, 由此而解算出的基线结果称为双差浮动解。

双差固定解与双差浮动解的向量坐标差达分米级时, 则处理结果可能有疑, 原因可能是观测质量不佳。一般地, 若短基线的双差固定解精度高, 则长基线双差浮动解也为佳。

#### 同步环闭合差

同步环闭合差就是由同步观测基线所构成的闭合环的闭合差。同步环闭合差在理论上应等于零, 由于观测等误差存在, 实际上同步环闭合差不等于零。国家测绘行业的全球定位系统测量规范规定了同步观测环各坐标分量闭合差和同步环闭合差应满足下式

$$W_x = \sqrt{n/5} \cdot \sigma, W_y = \sqrt{n/5} \cdot \sigma, W_z = \sqrt{n/5} \cdot \sigma$$

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} = \sqrt{3n/5} \cdot \sigma$$

式中:  $n$  为同步闭合环的边数;  $\sigma$  为相应级别规定的精度 (按平均边长计算);  $W_x$ 、 $W_y$ 、 $W_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴坐标分量闭合差;  $W$  为同步环闭合差。

同步环闭合差应小于或等于全球定位系统测量规范规定的允许值。若同步环闭合差超限, 说明组成同步环的基线中至少一条有问题, 对于有问题的基线要删去, 如果该基线需要保留就得重新进行观测。

### 异步环闭合差

由非同步观测基线所组成的闭合环称为异步环, 其闭合差称为异步环闭合差。国家测绘行业和石油物探全球定位系统测量规范规定了异步观测环各坐标分量闭合差和异步环闭合差应符合下式

$$W_x = 3\sqrt{n} \cdot \sigma, W_y = 3\sqrt{n} \cdot \sigma, W_z = 3\sqrt{n} \cdot \sigma, W = 3\sqrt{3n} \cdot \sigma$$

式中:  $n$  为异步闭合环的边数;  $\sigma$  为相应级别规定的精度 (按平均边长计算);  $W_x$ 、 $W_y$ 、 $W_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴坐标分量闭合差;  $W$  为异步环闭合差。

若异步环闭合差超限, 说明组成异步环的基线中至少有一条基线质量不合格, 可通过相邻异步环或重复基线查出质量不合格的基线, 并删除质量不合格的基线。

一般说来, 异步环闭合差符合限差要求时, 同步环闭合差一定符合限差要求。

### 重复基线较差 (重复边互差)

不同观测时段对同一条基线的观测结果, 称为重复基线。这些观测结果的差异就是重复基线较差。国家测绘行业和石油物探行业全球定位系统测量规范都规定, 重复基线较差应小于接收机标称精度的  $\sqrt{2}$  倍。

## 影响 GPS 基线解算结果的因素

### 起点坐标不准确

一般要求起点坐标在 WGS-84 系统下具有  $\pm 10\text{m}$  的精度, 实际上起点坐标误差较大, 起点坐标不准确, 导致基线出现尺度和方向上的偏差。起点坐标不准确对边长的影响较之对高差和方位影响要小, 对边长的影响与边长成比例。

### 少量卫星观测时间太短, 导致该卫星的整周模糊度确定不准

当卫星观测时间太短时, 会导致无法准确确定该卫星的整周模糊度。对于参与基线解算的卫星来说, 如果与其相关的整周模糊度无法准确确定, 就将影响整个基线解算的结果。

### 周跳修复不完善

在整个观测时段里, 有些子时段周跳太多, 致使周跳修复不完善。

### 多路径效应严重

在整个观测时段里, 多路径效应比较严重, 致使基线解算结果的残差普遍比较大。

### 对流层或电离层影响过大

因对流层或电离层的折射造成电磁波的延迟较大。

## 影响 GPS 基线解算结果的因素的判别

### 起点坐标不准的判别

对附加人为误差重新计算, 考察其差异; 选取不同的基线起点, 用该点的伪距定位结果计算基线, 比较互差。起点坐标不准的判别较困难, 在实际工作中最好提高起点坐标的准确度。

### 个别卫星观测时间短的判别

个别卫星观测时间短的判别非常容易, 只要查看观测数据的记录文件对每颗卫星的观测数据的数量就可以了, 或者查看一下卫星的可见性图就一目了然。

### 周跳太多的判别(对于卫星观测值中某些子时段周跳太多的情况判别)

分析  $RATD$  值较小, 但  $PDOP$  值、 $RDOP$  值也较小, 说明可能存在周跳; 从基线解算后所获得的观测值残差上来分析, 当在某测站对某卫星的观测值含有未修复的周跳时, 与此相关的所有双差观测值的残差都会出现整倍数的增大。

### 多路径效应严重的判别

考察周围条件(如测站周围是否有高建筑物或山坡、是否有大面积水域(海边、湖岸和江岸)), 通过观测值的残差来分析,  $L1$  波段双差解残差普遍较大,  $L2$  波段半周跳很多。

### 对流层和电离层折射影响的判别

同一基线重复观测, 高差闭合差和异步环闭合差较大; 双差观测值的残差明显大于正常观测值的残差。

## GPS 基线解算精化处理技术

### 改进伪距定位结果的方法

建立参考中心控制网, 中心站长期观测的伪距定位值取平均值; 全松弛网平差; 利用正、反基线解算结果取平均值后, 重新解算基线; 修正时标。

### 卫星观测时间短的处理

删除观测时段太短的卫星和卫星时段, 通过删除卫星和卫星时段, 不让它们参加基线解算, 以保证基线解算结果的质量。

### 周跳太多的处理

若多颗卫星在相同的时间内经常发生周跳, 可采取删除周跳严重的时间段的方法进行分段处理来改善基线解算结果的质量; 若是某个卫星经常发生周跳, 可采取删除该卫星观测值的方法来改善基线解算结果的质量。用三差观测值基线解; 人为输入精确基线, 作为修复周跳的依据。

### 多路径效应严重的处理

升高卫星截止高度角的截止限值; 多路径效应会造成观测值残差较大, 因此可采取缩小编辑因子的方法来剔除残差较大的观测值; 删除多路径效应严重的观测时间段或卫星。

### 对流层或电离层折射影响过大的处理

升高卫星截止高度角的截止限值; 对于 40km 以上的长边, 加气象改正; 分别采用模型对



对流层或电离层折射延迟进行改正;使用消除了电离层折射影响的双频观测值进行基线解算。对于短基线,因气象条件一致,利用基线两端同步观测求差,可以更好地削弱大气折射的影响。

## 利用残差图来判断影响基线解算结果质量的因素

在基线解算时,要经常利用残差图来判断影响基线解算结果质量的因素,或确定哪颗卫星或哪个时段的观测质量有问题。所谓残差图就是根据观测值残差绘制的一种图表(图4、图5)。正常残差图为残差绕着零轴上、下摆动振幅不超过0.1周。

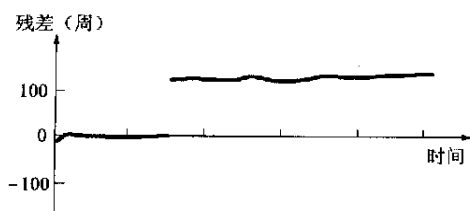


图4 某卫星含有周跳的残差图

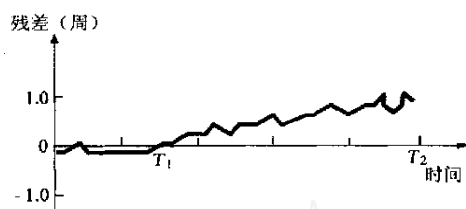


图5 某卫星受不明因素影响的残差图

## 结 束 语

影响 GPS 基线向量解算质量的因素较多,只有分析判别出影响 GPS 基线解算结果的主要因素,并通过精化处理,才能获得高质量的定位点坐标和基线向量。但上述成果仍是属于 WGS-84大地坐标系的,而不是我们使用的平面直角坐标和海拔高程。因此,必须把WGS-84坐标系的坐标转换成我国北京54坐标系的坐标(即进行两种不同坐标系的坐标转换),再把北京54坐标系的大地坐标转换成平面直角坐标,把北京54坐标系的大地高程加上大地水准面差距(高程异常值)得到海拔高程,经检查无误后才能作为控制点使用。

## 参 考 文 献

- [1] 刘基余,李征航,王跃虎,桑吉章 全球定位系统原理及其应用,测绘出版社,1993
- [2] 刘大杰,施一民,过静君 全球定位系统(GPS)原理与数据处理,同济大学出版社,1996
- [3] 周忠谟,易杰军,周琪 GPS 测量原理与应用,测绘出版社,1997
- [4] 王昆杰,王跃虎,李征航 卫星大地测量学,测绘出版社,1990
- [5] 宋健敏,李泰然,庞祚光,单国政 物探测量及质量监控,石油工业出版社,1996

(本文编辑:刘勇)

## 作者介绍

- 吴如山** 教授, 1939年生, 1984年于美国麻省理工学院获地球物理学博士学位。现在美国加州大学圣克鲁斯分院从事地震学和勘探地震学中的波传播与成像研究, 任“地震波模拟与成像实验室”主任, 并在同济大学任顾问教授和博士生导师。
- 李国发** 高级工程师, 1966年生, 1987年毕业于长春地质学院。一直从事地震资料处理及地震资料处理新方法研究工作, 发表论文多篇。现任大港油田物探公司副总工程师, 同时在石油大学攻读博士学位。
- 牛文杰** 讲师, 1967年生, 1991年毕业于天津大学, 获机械学硕士学位。主要从事工程图学、计算机图形学的教学、科研工作, 研究方向为计算机图形学、科学计算可视化、地质统计学、计算机仿真等。现在北京航空航天大学攻读博士学位。
- 裴正林** 高级工程师, 1962年生, 2000年获中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业博士学位, 发表论文20余篇。现在石油大学(北京)从事博士后研究工作, 主要研究方向为小波变换、遗传算法及神经网络应用、层析成像理论方法等。
- 陈生昌** 高级工程师, 1965年生, 1989年毕业于同济大学海洋地质系, 获硕士学位。曾从事地球物理方法和地球物理综合解释等工作, 发表学术论文10余篇。现在同济大学海洋地质与地球物理系攻读博士学位, 研究方向为地震波场传播与成像。
- 匡斌** 高级工程师, 1966年生, 1989年毕业于石油大学勘查地球物理专业, 一直从事地震资料处理方法研究和软件编程工作。现在同济大学攻读博士学位, 研究方向为地震波传播和成像。
- 杨云飞** 助理工程师, 1970年生, 1992年毕业于北京大学物理系, 2001年毕业于同济大学海洋系。现在同济大学经济与管理学院攻读管理科学与工程专业博士学位, 主要研究方向为信息管理、企业战略和城市管理。
- 王永刚** 副教授, 1951年生, 1975年毕业于华东石油学院物探专业, 1986年毕业于成都地质学院研究生班。先后完成部级课题及各油田委托科研项目10余项, 发表论文多篇。现在石油大学(华东)资源系从事地球物理勘探的教学和科研工作。
- 卢刚臣** 工程师, 1972年生, 1995年毕业于石油大学综合勘探专业, 获学士学位。毕业后一直从事地震资料综合解释工作, 发表论文多篇。现正在石油大学(北京)攻读综合勘探专业硕士学位。
- 乔大军** 工程师, 1969年生, 1990年毕业于石油大学(华东)勘查地球物理专业。一直从事地震资料的采集和解释工作。现在中原油田地调处方法研究所从事野外地震勘探方法的研究和设计工作。
- 郭向宇** 高级工程师, 1961年生, 1983年毕业于华东石油学院物探专业, 1997年于石油大学(北京)获硕士学位。一直从事地震资料处理方法研究工作, 发表学术论文多篇。现正在石油大学(北京)攻读博士学位。
- 郭树祥** 高级工程师, 1957年生, 1982年毕业于华东石油学院物探专业。长期从事地震资料处理方法研究工作, 现正在中国科学院地球物理所攻读博士学位。
- 周建宇** 高级工程师, 1962年生, 1982年毕业于青岛海洋大学海洋地球物理专业。曾发表论文多篇, 现从事地球物理综合解释、油藏开发管理及开发地震工作。
- 居春荣** 高级工程师, 1958年生, 1982年毕业于华东石油学院物探专业, 1998年获石油大学矿产普查与勘探专业硕士学位。现从事地球物理资料综合解释、层序地层学研究工作。
- 武耀辉** 高级工程师, 1958年生, 1982年毕业于华东石油学院物探专业。长期从事地震资料处理、解释及科研管理工作, 曾获石油天然气总公司和河北省科技进步奖多次, 发表专业论文数篇。现在中国科学院和西北大学攻读博士学位。
- 付金华** 高级工程师, 1961年生, 1982年毕业于青岛海洋学院物探专业。毕业后一直从事石油地质研究工作, 在胜利临盘油田的勘探开发中贡献突出, 有三项科研成果获省、部级科技进步二等奖。
- 郭海洋** 高级工程师, 1946年生, 1969年毕业于武汉测绘学院航空摄影测量系。多年来一直从事石油物探工程测量的生产管理与质量监督工作, 发表论文多篇。现任中国石油天然气集团公司物探监理中心测量总监。