

分类号 _____
UDC _____

密级 _____
编号 10486

武汉大学
工程硕士学位论文

在线 PPP 服务及星站差分技术
在物探中的应用研究

研究生姓名：安云松
学号：2009212143047
指导教师姓名、职称：黄劲松 副教授
学科、专业名称：测绘工程
研究方向：测绘工程

二〇一一年十一月

**Research on Application of
Online PPP and SBAS Technology
in Seismic Survey**

**By
An Yunsong**

October, 2011

郑 重 声 明

本人的学位论文是在导师指导下独立撰写并完成的，学位论文没有剽窃、抄袭、造假等违反学术道德、学术规范和侵权行为，否则，本人愿意承担由此而产生的法律责任和法律后果，特此郑重声明。

学位论文作者（签名）：

年 月 日

摘 要

星站差分系统（SBAS，又称星基增强系统）是通过卫星传播广域差分信号，不受地面信号传播的影响，全天候作业，是最近几年新发展起来的一种能够提供高精度高效的新型单点定位广域差分技术，相对传统的 RTK 和 DGPS 作业方法，它具有定位精度高，稳定性好，定位效率高等特点。Trimble 公司的 OmniStar 星基差分服务是基于星基增强定位技术的商业服务，实验证明它能够稳定实现平面 15cm，高程 30cm 的精密定位，1 小时以上的静态单点定位结果均值可以获得优于 5cm 的精度。它的应用很好地解决了石油物探高效高密度采集方法对测量速度和质量日益提高的要求，也解决了困扰生产多年的震源监控 DGPS 精度问题。星站差分精密单点定位技术是一种高效的生产方式，是未来物探测量方式的发展方向。

本文本讨论的另一个重点是在线 GPS 数据处理。由于使用了 IGS 连续跟踪站数据，虽然 GPS 数据处理方法依然采用静态相对定位理论，但用户只需要提供自己的单机静态定位观测数据，因此实际的操作与精密单点定位技术一样高效。单机定位、在线数据处理即可获得几个厘米的定位精度，直接获得 ITRF 基准的定位成果，具有常规 GPS 数据处理方法无法比拟的优势。文章中对 AUSPOS、CSRS-PPP、SCOUT 和 OPUS 等在线数据处理系统进行了详细的比较，并在生产应用中进行了验证。

关键词：石油物探测量，星站差分（SBAS），精密单点定位，OmniStar，在线 GPS 数据处理

ABSTRACT

Precise Point Positioning (PPP) is a new positioning technique, which was developed by JPL and applied since several years ago. SBAS (Satellite Base Augmentation System) is a main branch of Precise Point Positioning. SBAS is more efficient. Comparing with measure methods of RTK, DGPS and relative static GPS; SBAS PPP is more available accuracy, for only single receiver can get an accurate position from sub-meter to 15 centimeters. SBAS positioning method can handle the difficulties of high efficiency and high accuracy from new seismic acquisition technology. OmniStar is a most important PPP WADGPS service, and this paper includes four series of experiment data gotten by it and analyzed to prove that SBAS is a promising method to be used in seismic surveying and monitoring. Moving Base is also involved in this paper.

Online GPS data processing service systems is another main point of this paper. It adopts relative static data processing methods but only require users supporting single receiver GPS raw data to get an accurate position. Several-hours static GPS data can produce several-centimeter precise positioning result by single receiver observation. Online GPS data processing systems provide all users a convenient free high precise GPS data processing method. Here details four online GPS data processing systems, AUSPOS, SCOUT of SOPAC, OPUS and CSRS-PPP. Several methods for quality control of Online GPS data processing and SBAS in seismic surveying were discussed in this paper.

Keyword: Seismic Survey, SBAS, PPP WADGPS, Online GPS data processing

目 录

摘 要	I
ABSTRACT.....	II
1 引言.....	1
1.1 GPS 与石油物探测量	1
1.2 研究现状.....	2
1.3 本文研究内容.....	3
2 基础知识.....	4
2.1 精密单点定位.....	4
2.2 相对定位.....	9
2.3 坐标转换.....	13
3 在线 GPS 数据处理.....	17
3.1 AUSPOS 在线数据处理.....	18
3.2 OPUS 在线数据处理.....	23
3.3 SCOUT 在线处理系统	27
3.4 CSRS-PPP 在线数据处理	29
3.5 在线数据处理成果质量控制	32
4 基站差分及其物探应用	39
4.1 基站差分 GPS	39
4.2 基站差分应用研究.....	41
4.3 施工质量控制.....	56
5 结论与展望	58
参考文献.....	59

1 引言

全球导航卫星系统 GNSS (Global Navigation Satellite System) 包含了美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、中国的 Compass (北斗) 和欧盟的 Galileo 等系统, 可用的卫星数目达到 100 颗以上。从原来的 GPS 独大, 到 GPS 与 GLONASS 共享天空, 再到如今欧洲伽利略导航系统和中国北斗导航系统的突飞猛进, 卫星导航技术有了快速的进步和发展, 为全球的导航用户提供了更多的选择和更为精准的定位导航服务。

1.1 GPS 与石油物探测量

石油物探测量需要使用大地控制点作为测量基准点, 而国家大地控制网点并不均匀, 尤其是在人烟稀少的物探施工地区, 通常需要从一两百公里外引点, 而使用常规仪器, 需要投入大量的人力物力, 而且耗时, 精度很难保证, 这就是在早期物探测量中相邻区测线相接精度很差的原因。

随着 GPS 的技术发展, 其在物探中得到了广泛的应用。全球定位系统 (GPS) 在石油地球物理勘探中的应用开始于上世纪 90 年代初, 主要应用机型为 Trimble 公司的 4000 系列 (如 4000SSE 和 4000SSI), 当时主要是采用静态相对测量技术进行石油物探的控制测量, 建立测线控制点以及进行导线质量检核。得益于 GPS 全天候、空间不受限制的特性, 很好地解决了石油物探区域测量控制点少、测区难以覆盖等对于石油物探的制约, 促进了石油勘探蓬勃发展。随着全球石油勘探产业的发展, 更多的石油勘探项目位于一些未开发的地区, 区域内没有基础测量成果, 使用常规的 GPS 相对静态测量的方法无法得到精确的测量控制, 难以开展测量工作, 阻碍石油物探工作的开展。

DGPS 和 RTK 技术的出现曾经大大改善了石油物探测量的速度和质量, 将物探测量的放样和定位精度提高了一个数量级, 从分米提高到厘米级, 大降低了重复测量工作量。测量组织也更加灵活, 质量控制更加方便。但是 DGPS 和 RTK 也存在一些弱点, 那就它们的参考站有效控制范围较小, 通常在 20-30km 之间, 随着参考站与流动站间距离的增加, 对流层延迟、电离层延迟等误差相关性减弱, 精度不断下降。在今天石油物探高效采集、高密度采集的技术背景下, 对测量生产效率提出更高的要求, DGPS 和 RTK 的工作模式已经突现它们的局限性, 无法满足物探生产对测量速度的要求。

GPS 精密单点定位技术的出现有效地解决了上述难题。该技术利用 GPS 卫星精密星历和精密卫星钟差, 使用单台 GPS 接收机采集的非差码观测值和载波相位

观测值作为主要数据进行单点定位计算，其精度可达分米级甚至厘米级。由于它利用单台接收机在全球范围内进行静态或动态独立作业，并且能直接得到高精度的 ITRF 坐标系下的坐标，因此非常适合于物探测量。GPS 精密单点定位技术分为事后处理和实时两种方式。事后处理精密单点定位是指用户使用单台接收机采取静态观测方法，采集一定量的码观测数据和载波相位观测数据，再通过网络将观测数据提交给在线的高精度 GPS 数据处理服务器或是输入专门的处理软件，数据处理系统或软件会根据需要从 IGS 等网站获得精密星历，利用这些高精度的轨道参数、精密卫星钟差等处理用户 GPS 数据，从而获得厘米精度的准确成果。实时动态精密单点定位技术允许用户使用单台接收机通过卫星数字技术等方式在接收 GPS 卫星信号的同时接收基站提供的差分改正信息，从而获得分米级的成果。实时动态精度单点定位技术是以广域差分技术为基础的，弥补了区域 DGPS 和 RTK 技术覆盖范围小的缺点。

1.2 研究现状

国际全球导航卫星服务组织 IGS (International GNSS Service) 是一个为全球导航卫星系统提供应用服务的国际组织，由国际大地测量协会 IAG (International Association of Geodesy) 于 1993 年创建。目前 IGS 提供的产品包括连续跟踪站数据、精密星历、电离层改正等，其提供的精密星历的精度已经优于 5cm，卫星钟改正精度已达到 0.1-0.2ns。GPS 接收机性能也不断得到改善，载波相位测量的精度在不断提高，接收机的载波相位测量噪声多数已经小于 1mm。大气延迟改正模型和改正方法的研究也取得了很大的进展。基于这些研究成果，1997 年美国喷气推进实验室 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 的 Zumbeger^[1]提出了非差精密单点定位方法。

国内在精度单点定位技术方面的研究始于 2000 年，上海天文台在《测绘学报》上发表文章，阐述了他们应用 JPL 的 GIPSY 软件进行类似精密单点定位原理的小区域网站的静态定位试验。武汉大学的叶世榕博士对非差相位精密单点定位技术进行了较为深入的研究，并以此为主要内容完成其博士论文。武汉大学的张小红教授等经过数对 GPS 精密单点定位理论与方法的深入研究，在国内率先开发出了商业化的精密单点定位数据处理软件 TRIP。香港理工大学、同济大学、中国科学院测量与地球物理研究所等机构也开展了精密单点定位的研究工作，取得了一定的研究成果。最近几年，在双频精密单点定位研究成果的基础上，已有不少学者开始研究单频精密单点定位的模型、算法，并拓展其应用^[2]。

在精密单点定位服务的提供方面，2001 年，NavCom 的 Hatch 提出了利用 JPL 实时定轨软件 RTG 实现全球 RTK (Global RTK) 计划，通过因特网和地球静止通

信卫星向全球用户发送精密星历和精密卫星钟差修正数据，利用这些修正数据，实现 2-4dm 的实时动态定位精度，事后静态定位精度可达 2-4cm。目前 Trimble 公司的 OmniStar 系统也提供相似的服务，精度从优于 1m 到几个 cm。而 GPS 厂商方面，现在 Trimble、Novtel 和 Leica 等都提供带有精密单点定位功能的接收机。

处理软件方面，国际上，加拿大 APPLANiX 公司推出了具备精密单点定位能力的 POSpacAIR 软件，挪威 TerraTec 公司推出基于精密单点定位原理的动态定位 TerraPOS 软件，瑞士 Leica 公司也推出了自己的精密动态单点定位软件 IPAS PPP。国内常用的精密单点定位软件则是由武汉大学开发出 TRIP，其在算法设计和定位精度方面取得突破，定位解算精度和可靠性等方面已经和国际同类软件水平相当。

精密单点定位在生产应用方面已经有了很多的尝试。2004 年开始，交通部长江航道测量中心开始使用 SF 2050 型星站差分 GPS 进行航道测量，该接收机使用美国 NavCom 公司 StarFire 差分改正服务，取得了很好的效果。中国煤炭地质总局航测遥感局将精密单点定位方法应用于青海省大柴旦镇绿梁山地区地质调查，结果表明，精度完全符合要求。

1.3 本文研究内容

基于石油勘探工作对测量的需求和精密单点定位技术的发展情况，本文围绕精密单点定位的定位精度和成果可靠性进行了研究和分析，做了以下研究工作：

(1) 针对几种在线式的 GPS 数据处理系统，通过大量的数据分析，研究长距离相对定位与静态精密单点定位两种方法对于石油物探的适用性和可靠性。

(2) 对 OmniStar 广域差分精密单点定位服务在石油物探生产中的测试性应用试验结果进行了成果分析和精度及可靠性评估，并制定出相应的质量控制和改进措施。

(3) 从原理和模型方面，对 GPS 精密单点定位在石油勘探测量应用中存在的不同椭球和不同坐标系统之间的转换问题进行了一些讨论。

2 基础知识

2.1 精密单点定位

精密单点定位 (PPP-Precise Point Positioning) 指的是利用载波相位观测值以及 IGS 等组织提供的高精度的卫星星历及卫星钟差来进行高精度单点定位的方法^[3]。

在过去的近 20 年里, GPS 技术在生产、生活的各个领域得到广泛应用, 大到全球板块地壳运动监测、区域性的高等级控制网、城市差分连续运行系统, 小到工程变形监测、道路施工, GPS 是随处可见。在这些应用中, 采用的通常都是 GPS 相对定位作业方式, 数据处理时通过组成双差观测值以消除接收机钟差、卫星钟差等公共误差及削弱对流层延迟、电离层延迟等相关性强的误差影响, 不需考虑复杂的误差模型, 解算模型简单、定位精度高。虽然这种作业方式具有作业简单、定位精度高的优势, 得到了广泛的应用, 但也存在一些不足, 必须两台以上的接收机同时工作, 影响了作业效率, 作业成本较高。另外, 相对定位是基于对流层延迟、电离层延迟等误差在一定区域内具有较好相关性的前提, 随着距离的增加, 这种相关减弱, 必须通过延长观测时间, 才能获得预期精度。在如今这个快节奏、高效的年代, 有没有一种高效率的 GPS 定位技术能够克服 GPS 相对定位的这些缺点, 满足新的需求呢?

1997 年, 美国喷气推进实验室 (JPL) 的 Zumbeger 等人提出了一种有效的解决方案——非差精密单点定位方法。利用 GIPSY 软件和 IGS 精密星历, 同时利用一个 GPS 跟踪网的数据确定 5s 间隔的卫星钟差, 在单站定位方程式中, 只估计测站对流层参数、接收机钟差和测站 3 维坐标的精密单点定位研究思路, 进行了实验, 取得了 24 小时连续静态定位精度达 1-2cm、事后单历元动态定位精度达 2.3-3.5dm 的试验结果, 用实测数据证明了利用非差相位观测值进行精密单点定位是完全可行的^[4]。NRCan 的 Heroux 等人通过非差精密单点定位方法, 处理长时间静态观测数据, 结果也达到厘米级精度, 目前 NRCan 提供免费的 CSRS-PPP 网上精密单点服务, 也可以下载桌面版的 PPP-Direct 软件。

2.1.1 GPS 非差观测值的基本方程

GPS 的原始观测数据主要有两类^[5]: 测距码和载波相位, 其中, 粗码或捕获码 (C/A) 的码长约为 300m, 精码 P1 和 P2 的码长约为 30m, 而载波相位 L1 和 L2 的码长约为 19cm 和 24cm, 若测量精度以 1/100 计算, 则 C/A 码的测量精度约

为 3m, 精码 P1 和 P2 的测量精度约为 0.3 米, 相位 L1 和 L2 的测量精度约为 2mm。在地心坐标系中, L1 和 L2 载波相位和伪距 P1、P2 观测值方程分别为

$$L1_k^p(t) = \rho_k^p(t) - ct^p(t) + d_{orb}^p(t) + d_{orb}^p - I_k^p + T_k^p(t) + ct_k(t) + \frac{C}{f_1} \{N1_k^p + \varphi_k(t_0) - \varphi^p(t_0)\}_1 + \varepsilon_{k,L1}^p \quad (2.1)$$

$$L2_k^p(t) = \rho_k^p(t) - ct^p(t) + d_{orb}^p(t) + d_{orb}^p - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^p + T_k^p(t) + ct_k(t) + \frac{C}{f_2} \{N2_k^p + \varphi_k(t_0) - \varphi^p(t_0)\}_1 + \varepsilon_{k,L2}^p \quad (2.2)$$

$$P1_k^p(t) = \rho_k^p(t) - ct^p(t) + d_{orb}^p + d_{ant}^p + I_k^p + T_k^p(t) + ct_k(t) + \varepsilon_{k,P1}^p \quad (2.3)$$

$$P2_k^p(t) = \rho_k^p(t) - ct^p(t) + d_{orb}^p + d_{ant}^p + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^p + T_k^p(t) + ct_k(t) + \varepsilon_{k,P2}^p \quad (2.4)$$

式 (2.1) ~ 式 (2.4) 中:

$\rho_k^p(t)$ 为接收机 k 在时刻 t 与卫星 p 在时刻 $(t - \tau)$ 在地心地固坐标系中的空间几何距离, τ 为信号从 GPS 卫星 p 到接收机 k 所用的时间, 可用下式表示:

$$\rho_k^p(t) = \sqrt{\{(X^p(t-\tau) - x_k)\}^2 + \{(Y^p(t-\tau) - y_k)\}^2 + \{(Z^p(t-\tau) - z_k)\}^2} \quad (2.5)$$

ρ_k^p 上标“ p ”表示卫星号; 下标“ k ”为接收机号;

C 真空中的光速,

f_1 f_1 波段的频率, $f_1=1575.42$ MHz;

f_2 f_2 波段的频率, $f_2=1227.60$ MHz;

t 接收机接收信号的时刻 (GPS 时);

L_{ik}^p L_1 、 L_2 载波测得的距离;

P_{ik}^p P_1 、 P_2 码伪距;

$d_i^p(t)$ GPS 卫星 p 在 t 时刻相对于 GPS 时间的钟差;

$d_{orb}^p(t)$ 为卫星轨道误差;

d^{orb} 卫星天线相位中心变化引起的误差;

$I_k^p(t)$ L_1 波段观测值的电离层延迟, 其对同一波段的伪距和载波相位观测

值的影响大小相同, 符号相反;

$T_k^p(t)$ 信号的对流层延迟, $T_k^p(t) = m_k^p(t - \tau, t) T_k^{p0}(t)$, 其中 $T_k^{p0}(t)$ 为信号在天顶方向的对流层延迟, $m_k^p(t - \tau, t)$ 为将信号在对流层的天顶方向的延迟投影到接收机到卫星矢量方向的投影函数, 湿分量和干分量采用不同的投影函数;

$t_k(t)$ 为接收机在 t 时刻相对于 GPS 时间的钟差;

- $t^p(t)$ 为卫星 p 在 $t - \tau$ 时刻相对于 GPS 时间的钟差;
- $N_{k,i}^k$ L_1 、 L_2 载波的初始整周模糊度 ($i=1, 2$);
- $\varphi_k(t_0)$ 接收机 k 中的初始相位残差;
- $\varphi^p(t_0)$ 卫星 p 中的初始相位残差;
- $\varepsilon_{k,Li}^p$ 载波观测值噪声和无法模型化的误差;
- $\varepsilon_{k,Pi}^p$ 码观测值噪声和无法模型化的误差。

2.1.2 精密单点定位误差源

在精密单点定位中,影响其定位结果的主要误差包括:与卫星有关的误差(卫星钟差、卫星轨道误差、相对论效应);与接收机和测站有关的误差(接收机钟差、接收机天线相位误差、地球潮汐、地球自转等);与信号传播有关的误差(对流层延迟误差、电离层延迟误差和多路径效应)。由于精密单点定位没有使用双差观测值,很多误差没有消除或削弱,所以必须采用其他方法来加以解决。常用的解决方法有两种:a)对于可以精确模型化的误差,采用模型改正。b)对于不可以精确模型化的误差,加入参数估计或者使用组合观测值。如双频观测值组合,消除电离层延迟;不同类型观测值的组合,不但消除了电离层延迟,也消除了卫星钟差、接收机钟差;不同类型的单频观测值之间的线性组合消除了伪距测量的噪声,当然观测时间要足够长,才能保证精度。

因此在精密单点定位中需要进行以下的误差改正:

1) 相对论效应改正

卫星钟相对论效应是由于卫星钟和接收机钟所处的状态(运动速度和重力位)不同而引起的卫星钟和接收机钟之间产生相对钟误差现象。GPS 卫星钟比地面钟走得快,每秒约差 0.45ms。为了保持地面接收到的信号频率与 GPS 系统设计的信号频率一致,在卫星发射之前人为将 GPS 卫星钟的标准频率减小约 0.0045MHz。但由于 GPS 卫星轨道并非圆轨道,且卫星所在位置受到的地球重力场影响也不同,相对论效应对卫星钟频率的影响并非常数,经过上述改正后仍有残余。

2) 卫星姿态影响

a) 卫星天线相位中心改正

由于 GPS 卫星定轨时利用的力模型都是对应卫星质心的,因此在 IGS 精密星历中卫星坐标及卫星钟差都是相应于卫星质心而不是相应于卫星天线相位中心的,而 GPS 观测值是相应于卫星天线相位中心和接收机天线相位中心的。一般来说,卫星天线相位中心与卫星质心并不重合,在精密单点定位中,不能利用差分的方法消除或削弱其影响,因此必须考虑其改正模型。在星固系中,卫星相位中心相对于卫星质心的偏差如表 2.1 所示。

表 2.1 星固系中卫星天线相位偏差/m

卫星系列	星固系下卫星天线相位中心偏差 (m)		
	X	Y	Z
Block II/IIA	0.279	0	1.023
Block IIR/IIF	0	0	0

b) 相位缠绕

GPS 卫星发射的是右旋极化 (RCP) 的电磁波信号, 接收机观测到的相位值依赖于卫星天线与接收机天线间的相互方位关系。接收机天线或卫星天线绕极化轴向的旋转会改变相位观测值, 最大可达一周 (天线旋转一周)。这个效应就称为“相位缠绕”。在精密单点定位中这个影响必须加以改正。

3) 高采样率的卫星钟差

GPS 卫星钟差产品的时间间隔一般为 5 分钟和 30 秒^[6]。在实际应用中, GPS 接收机观测数据采样间隔一般与外部给出的钟差产品的时间间隔不一致, 需要进行钟差的插值处理, 其插值误差将直接影响精密单点定位的精度。GPS 卫星钟差即使在 SA 取消以后, 在短时间内的变化仍然比较大, 若对采样间隔较大的钟差数据进行插值计算, 则会产生较大的插值误差, 从而影响 PPP 定位结果的精度。所以, 要提高 PPP 定位尤其是高频动态 PPP 定位结果的精度, 应采用高采样率卫星钟差产品^[7]。

4) 与测站有关的改正

a) 地球固体潮汐

固体潮与海洋潮汐产生的原因相同。天体 (太阳、月球) 对弹性地球的引力作用, 使地球固体表面产生周期性的涨落, 且使地球在地心与天体的连线方向上拉长, 在与连线垂直方向上趋于扁平, 由与纬度相关的长期项及周期分别为 0.5d 和 1d 的周期项组成。在 GPS 双差相对定位中, 对于短基线 (<100km) 其影响可以不考虑, 对于数千 km 的长基线, 有几 cm 的误差, 精密处理中需要考虑。对于精密非差单点定位, 由于不能利用站间差分的方法消除, 其影响在径向大约有 30cm, 在水平方向约有 5cm^[8], 必须利用模型加以改正。

b) 大洋负荷潮汐

海洋负荷对精密单点定位的影响结果与固体潮的一致, 但比固体潮小一个量级。海洋负荷主要由日周期与半日周期部分组成。对于单历元, 定位精度要求亚 m 级或 24h 观测时间的 cm 级静态定位, 可以不考虑海洋负荷的影响。对于亚 m 级动态定位或观测时间短于 24h 的 cm 级静态定位, 必须顾及海洋负荷的影响,

除非测站远离海岸线 (>1000km)。

c) 地球自转参数的日变化改正 (Sub-daily ERP)

5) 天顶对流层参数估计

对流层延迟影响通常表示为天顶方向的对流层延迟量 ΔD_z 和同高度角相关的投影函数 M 的乘积。90%的对流层延迟是由大气中干燥气体所引起的，称为干分量延迟；其余 10%是由水汽所引起的，称为湿分量延迟。因此，对流层延迟可用天顶方向的干、湿分量延迟及其相应的投影函数表示：

$$\Delta D_{Trop} = \Delta D_{z,dry} M_{dry}(E) + \Delta D_{z,wet} M_{wet}(E)$$

6) 模型、改正和解算策略同 IGS 的兼容性

精密单点定位中使用 IGS 的精密星历和钟差产品，且进行强制约束，在定位处理过程中需尽量保持使用的模型、观测值的加权策略及相应协议与 IGS 数据处理分析中心所使用的一致。

2.2 相对定位

GPS 单点定位（或称绝对定位）中，定位精度必然受到卫星轨道误差、钟差及信号传播误差等因素的影响，虽然通过模型改正可以削弱其中一些系统性误差，但仍会存在很大的残差，因此普通的绝对定位很难满足精密测量的要求。为了解决单点定位精度低的问题，GPS 相对定位技术应运而生。GPS 相对定位也叫差分 GPS 定位，是目前 GPS 测量中定位精度最高的定位方法，广泛地应用于大地测量、精密工程测量和地球动力学的研究中。而石油物探测量的控制测量也主要采用这种技术来联测高等级控制点，以及建立 RTK 测量基准站。

2.2.1 相对定位的概念

相对定位通常是将两台接收机分别安置在基线的两个端点，保持接收机位置静止不动，同步观测 4 颗以上的 GPS 卫星，来确定基线两个端点在协议地球坐标系中的相对位置。在实际的生产中，为了提高工作效率，会根据可用 GPS 接收机的数量，采用多台同步观测的方法，这样在可以同时测定若干条基线向量，这样不仅可以减少重复架设仪器引入误差，而且增加基线观测量，有利于提高观测成果的可靠性。

静态相对定位基本观测量为载波相位观测量。由于载波波长较短，其测量精度远高于码相关伪距测量，并且，采用载波相位观测量的不同线性组合可以有效地削弱卫星星历误差、信号传播误差以及接收机钟不同步对定位的影响。天线长时间固定在基线两测站上进行观测，可保证取得足够多的观测数据，从而可能准确地确定整周未知数。由于静态相对定位有效地消除或削弱了 GPS 观测中的多项误差，因此静态相对定位具有很高的精度。通常采用广播星历定位时，精度也可达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ ，如果采用精密星历和卫星轨道参数，定位精度还可以提高 1 到 2 个数量级，这是常规大地测量方法很难达到的。

2.2.2 静态相对定位的观测方程及其解算

载波相位相对测量中，GPS 测量受到多种误差的影响，如卫星轨道误差、卫星钟差、接收机钟差以及电离层和对流层的折射误差的影响，使得精度大大降低。通过研究各种误差规律，建立改正模型对其进行改正，可以提高定位精度，但是由于误差的影响往往难以完全消除，所以，观测值中仍存在残余的影响。理论上每一个观测历元针对误差因素设立一个未知参数，可以解决这一问题。然而，这样观测方程中会增加大量与定位无直接关系的未知参数，大量的多余未知参数不但增加了平差计算的工作量，而且影响定位未知参数的可靠性。

由于上述 GPS 观测误差对两个或多个观测站同步观测相同的卫星具有较强

的相关性，因此，将这些观测量进行不同的线性组合可以简单有效地消除或削弱误差影响。在 GPS 相对定位中，通常采用单差、双差和三差三种组合方式。

1) 单差观测模型

所谓单差是指不同观测站，同步观测相同卫星所得观测量之差。

单差观测值是把求差后的线性组合当作虚拟观测值参与计算。这种求差可以在卫星间、测站间，也可以在历元（时刻）间进行。这种求差称为求单差或一次差。

可以看出，观测值间有三种求单差的形式，分别为测站间求差、卫星间求差、历元间求差，求差后的虚拟观测值可以组成各自的线性模型。一般的计算中多使用测站间求差方法，可以将星历误差对测距的影响减降低到原误差的千分之一。测站间求差的虚拟观测模型具有以下优点：

(1) 消除了卫星钟差的影响。

(2) 大大削弱了卫星星历误差的影响。

(3) 大大削弱了对流层折射和电离层折射误差的影响，在短距离内几乎可能完全消除其影响。

2) 双差模型

所谓双差即不同观测站，同步观测同一组卫星，所得单差观测量之差。在不同的测站同一时刻观测两颗卫星，忽略大气折射残差的影响，在卫星间求差，可以消除观测方程中的钟差参数，因此在双差模型中可以消除钟差影响。

3) 三差模型

所谓的三差即在不同历元，同步观测同一组卫星所得双差观测量之差。

在不同测站上分别在两个不同历元同时观测两颗卫星，可以得到两个双差观测方程式，再对两个双差观测方程式求三次差，由于整周未知数与观测历元无关，在相减时被消去，从而得到不含整周未知数的三差观测方程。此时三差模型中的未知参数仅包含待定点的坐标，根据最小二乘法列出法方程，即可对三差模型进行求解。

静态相对定位可以获得很高的定位精度，但是存在定位时间过长的的问题。它要求至少同步跟踪 4 颗卫星，观测时间 1 小时以上，为了保证成果精度，对于长基线观测，需要更长的观测时间。而实际生产中很多任务要求实时、快速、高精度的定位，静态相对定位技术无法满足这个要求。

2.2.3 动态相对定位

动态绝对定位作业简单，易于快速实现实时定位，但是定位中受到卫星星历误差、钟差及信号传播误差等诸多因素的影响，定位精度不高，只能达到 10-50m。即使目前取消 SA 政策的情况下，也只达到 5-10m 的定位精度，很难满足高精度

动态定位的要求。而静态相对定位虽然可以达到精度要求，但无法实时快速地得到成果。

根据 GPS 测量误差的相关性，可在 GPS 动态定位中采用相对作业方法，即 GPS 动态相对定位。该作业方法是用两台 GPS 接收机，其中一台接收机安置在基准站上固定不动，另一台接收机安置在运动的载体上，两台接收机同步观测相同的卫星，并在观测值之间求差，以消除具有相关性的误差，提高定位精度。而运动点位置是通过确定该点的相对基准站的位置来实现的，这种定位方法亦可称为差分 GPS 定位。

动态相对定位可分为两类：一类为测码伪距动态相对定位，另一类为测相伪距动态相对定位。

测码伪距动态相对定位，是由安置在基准点的接收机测量该点到 GPS 卫星的伪距，该伪距中包含了卫星星历误差、钟差、大气折射误差等误差影响。而基准站接收机位置已知，利用卫星星历数据可以计算出基准站到卫星的距离，用户接收机包含有相同的卫星星历误差。当运动的用户接收机与基准站相距不太远（<100 km）时，两站的钟差、大气折射等误差具有较强的相关性。若利用两个距离求差，将距离差值作为距离改正数发送给用户接收机，则用户就得到了一个伪距改正值，可有效地消除或削弱一些公共误差的影响。运动的用户接收机所在点的三维坐标与卫星之间的距离关系为^[9]：

$$\tilde{\rho}_k^j - \delta\rho_i^j = \sqrt{(X^j - X^k)^2 + (Y^j - Y^k)^2 + (Z^j - Z^k)^2} + c \cdot (\delta\tau_k - \delta\tau_i) \quad (2.6)$$

式 (2.6) 中包含了 4 个未知数，即移动接收机在 t 时刻的三维坐标 X , Y , Z 及基准站接收机 (i) 与移动站接收机 (k) 钟差之差，当同步观测 4 颗以上卫星时，即可求出唯一解，实现动态定位。由于伪距差分可以消除大部分系统性误差，因而可以大大提高定位精度，当基准站与运动用户站之间距离小于 100 公里时，定位精度可达米级或亚米级。

由于载波相位测量的精度要高于测码伪距测量的精度，因此将载波相位观测量用于实时 GPS 动态相对定位可以大大提高定位精度。载波相位动态相对定位法，是将载波相位修正值发送给用户站来改正其载波相位实现定位，或直接将基准站采集的载波相位观测量发送给用户站进行求差，解算坐标实现定位。在小区范围内其定位精度可达 1 到 2cm，是一种快速且高精度的定位方法。

动态相对定位根据数据处理方式的不同可分为实时处理和测后处理。数据的实时处理，需要在基准站和用户之间通过数据链实时将观测数据或观测量的修正值发送给用户站，以实现实时动态定位。数据的测后处理，只需要在测后收集观测数据，进行有关的数据处理，求得定位结果，无法实时定位。

实时相对定位（差分定位）根据发送信息的不同区分，主要有伪距差分、相

位差分 and 位置差分。

伪距差分是利用基准站已知坐标求出测站至卫星的距离，并将其与含有误差的测量距离比较，然后利用一个滤波器将此差值滤波并求出其偏差，再将所有卫星的测距误差传输给用户，用户利用此测距误差来改正测量的伪距。进而利用改正后的伪距求出自身的坐标。由于差分定位是利用两站的公共误差的抵消来提高定位精度，而其误差的公共性与两站距离有关，随着两站距离的增加，误差的公共性逐渐减弱。因此，随着用户同基准站的距离增大而定位精度降低。

位置差分是一种最简单的差分方法。它是利用安置在已知点上的 GPS 接收机，对 4 颗或 4 颗以上的卫星观测，求出基准站的坐标 (X', Y', Z') ，由于存在着卫星星历误差、时钟误差、大气折射等误差的影响，该坐标与已知坐标间存在一个误差，这差别即为坐标改正数，基准站将坐标改正数发送给用户站，用户站用该坐标改正数对其观测坐标进行改正。

经过坐标改正的用户坐标已经消除了基准站与用户站的共同误差，提高了精度。其优点是传输的差分改正数较少，计算方法简单，任何一种 GPS 接收机都可以改装成这种差分系统。其缺点是要求基准站与用户必须同步观测一组卫星，由于基准与用户站接收机配备及观测环境不完全相同，因此难以保证同步观测同一组卫星，这样必将导致定位误差的不匹配，影响定位精度。坐标差分定位效果不如伪距差分。

载波相位差分定位与伪距差分定位原理相类似，其基本原理是：在基准站安置一台 GPS 接收机，对卫星进行连续观测，并通过无线电设备实时将观测数据及测站坐标信息传送给用户，用户站一方面接收 GPS 卫星信号，另一方面通过无线电设备接收基准站传送的信息，根据相对定位原理进行数据处理，实时地以厘米级的精度给出用户的三维坐标。

载波相位差分定位有两种方法，一种是改正法，与伪距差分相同，基准站将载波相位的改正量发送给用户站，并对用户站的载波相位进行改正实现定位；另一种是求差法，将基准站测得的载波相位观测值实时发送给用户站，并由用户站对载波相位观测值求差，获得静态相对定位一样的单差、双差、三差解模型，并采用与静态相对定位类似的求解方法进行坐标解算。

2.3 坐标转换

目前石油物探中经常使用的坐标系统有 1980 年西安大地坐标系, 1954 年北京坐标系, WGS84 和 ITRF, 以及其它一些施工区域当地的坐标系如欧洲的 ED50 等。而 GPS 所使用的坐标系统为 WGS84, 因此在采用 GPS 测量方法的石油物探施工和数据处理时都无法避免地需要进行坐标转换。

2.3.1 国际地球参考框架 (ITRF)

在 ITRF 之前, 天文学家、大地测量学家和地球物理学家们的一直努力建立一个的国际地球参考系统 (ITRS)。1988 年 IAU (International Astronomical Union) 和 IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) 共同建立了国际地球自转服务组织 IERS (International Earth Rotation Service), 为建立这样一个高精度的全球地面参考系统奠定了组织基础。

IERS 的三大基本任务就是确定地球自转、建立和维持国际天球参考框架 (ICRF) 和国际地球参考框架 (ITRF)^[10]。ITRF 由 IERS 中央局的地面参考框架部建立和维护, 它是一组用空间大地测量观测站的坐标和运动速度来定义的地心地固参考框架。测定这些地面站的位置和速度利用了甚长基线干涉测量 (VLBI)、激光测月 (LLR)、激光测卫 (SLR)、全球定位系统 (GPS) 和多普勒卫星跟踪和无线电定位系统 (DORIS) 等空间大地测量观测技术手段。

在每年的 IERS 年度报告和技术报告上, IERS 公布 ITRF 的年度解算结果。由于章动、极移的影响引起的国际协议地极原点 CIO 变化, 以及位置和速度的解算方法每年稍有变化, 所以 ITRF 框架每年也都在变化。ITRF 选择直角坐标分量 X, Y 和 Z 加以确定。如果需要也可以利用地理坐标, 则需要引入地球椭球, 国际上一般推荐采用 GRS80。IERS 每年向世界各国公布 ITRFY_{YY}。年序 YY 指明了 ITRF 在框架形成过程中, 使用有效所至的最终年代。现在最新的版本为 ITRF2008。

根据 IERS 的 21 号技术报告, ITRF 的原点定义为地球的质心 (包括海洋和大气质量); 坐标系统为地固坐标系, 满足引力相对论理论, 长度单位采用了国际单位制米; ITRF 三轴的定向与 BIH 系统在历元 1984.0 的定向相一致, 这是 1981 年 IUGG 和 IAU 所推荐的定向结果; 时间演化要求框架定义的水平速度场相对于地壳没有旋转变化的。

2.3.1.1 ITRF 原点

ITRF 的原点为地球的质心, 这个地球质量不仅包含了固体地球的质量, 而且还包含了海洋和大气的质量。从 ITRF88 到 ITRF93, ITRF 的坐标原点采用了 SLR 确定的地球质心, 这是美国得克萨斯大学空间中心单独计算的结果。从

ITRF94 开始，地球质心的确定同时采用了 SLR 和 GPS 技术，ITRF 坐标原点是多个 SLR 和 GPS 数据处理中心确定的地心的加权平均结果。

2.3.1.2 ITRF 定向

ITRF 的定向保持了国际协议原点 (CIO) 定义的参考极，使用国际参考子午面 (IRM) 与格林尼治首子午面近似一致。CIO 和 IRM 是按国际时间局 (BIH) 1967 年平差结果保持的。后来，IERS 又保持了自己的参考极 (IRP) 和 BIH 定向，IRP 与 CIO 大约相差 30mas，IRM 与格林尼治首子午面一致，范围在 5mas 以内 (历元 1984.0)。

从 ITRF88 到 ITRF92，几个坐标框架之间没有旋转参数，它们坐标轴保持一致。ITRF93 坐标框架的定向稍有不同，它采用了 IERS 的参考极 IRP，其定向参数与 1988.0 时 IERS 的定向参数一致；但是，从 ITRF94 到 ITRF97，定向参数与 ITRF92 相一致。

不同版本的 ITRF 之间的可以相互转换，例如 ITRF2008 与 ITRF2005 转换公式^[11]：

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i05} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i08} + T + D \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i08} + R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{i08} \\ \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{i05} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{i08} + \dot{T} + \dot{D} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{i08} + R \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{i08} \end{cases} \quad (2.7)$$

2.3.2 WGS84 坐标系

1984 年，美国国防部制图局继 WGS72 以后，发展的一套新的世界大地坐标系，称为 1984 年世界大地坐标系，即 WGS84。该坐标系是在 WGS72 基础上，经过多年的修正和不断完善，并于 1985 年开始启用的新一代地心坐标系。WGS84 较 WGS72 具有更精确的定义，地心坐标更为精确，各区域参心坐标系对于 WGS84 的转换精度更高。除了平移外，还计算了尺度变化和坐标轴的旋转参数，WGS84 定义的地球重力场模型和大地水准面更为精确。随着采用 WGS84 坐标系的全球定位系统 (GPS) 应用的迅猛发展，使得 WGS84 坐标系也得到广泛传播和使用。

WGS1984 系统与 ITRF 之间符合得很好，WGS84 (G730) 与 ITRF92 之间的差异小于 10cm，WGS84 (G873) 与 ITRF94 之间的差异小于 2cm^[10]。

2.3.2.1 WGS84 坐标系的特点

WGS84 是地固地心坐标系，特点如下：

- (1) 坐标原点与地球质心重合，地球质心是指包含海洋和大气等整个地球

质量的中心。

(2) 尺度仅限于地球框架，并符合引力相对论理论。

(3) 定向与国际时间局 BIH 定义的 BIH1984.0 方向一致。

WGS84 是右手坐标系，其 Z 轴指向国际地球自转服务 (IERS) 的参考地极 (IRP)，这个方向与 BIH 定义的在历元 1984.0 的地极 (CTP) 基本一致，其差异小于 $\pm 0.005''$ 。X 轴是过原点与 Z 轴垂直的平面和 IERS 参考子午面 (IRM) 的交线，它和 BIH 定义的在历元 1984.0 的首子午面互差小于 $\pm 0.005''$ 。Y 轴根据右手系的法则确定，它是 X 轴在过原点与 Z 轴垂直的平面内逆时针旋转 90 度所指的方向。

2.3.2.1 WGS84 坐标系的参数

椭球的长半轴 $a=6\ 378\ 137.0\ \text{m}$ 。

椭球的扁率 $1/f=298.257\ 223\ 563$ 。

$GM=(3\ 986\ 004.418\pm 0.008)\times 10^8\ \text{m}^3/\text{s}^2$

WGS1984 坐标系统的定义参数还有很多，这里就不再列出了。

2.3.3 坐标转换模型

坐标系统之间的转换包括不同参心大地坐标系之间的转换，参心大地坐标系与地心大地坐标系之间的转换，以及不同地心坐标系间的转换。根据转换的形式，又可分为二维坐标转换和三维坐标转换，如果两系统被转换点的大地高比较精确，一般采用三维转换的方法，否则采用二维转换的方法。

两个空间直角坐标系为 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 和 $O_2-X_2Y_2Z_2$ ，这个两个坐标系原点 O_1 和 O_2 不重合， O_1 在 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 中的坐标为 ΔX ， ΔY ， ΔZ ；坐标轴不平行，对应的坐标轴之间存在 3 个微小的旋转或称欧拉角，记为 ε_x ， ε_y ， ε_z ；两个坐标系的尺度也不一致， $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的尺度为 1， $O_2-X_2Y_2Z_2$ 的尺度则为 $1+m$ 。这里， ΔX ， ΔY ， ΔZ 为平移参数， ε_x ， ε_y ， ε_z 为旋转参数， m 为尺度参数，这 7 个参数合称为两个坐标系之间的转换参数。也有一些转换模型包含更多的参数。不同坐标系的三维转换模型很多，这里介绍一下石油物探中常用的两种七参数转换模型。

2.3.3.1 布尔沙模型 (B 模型)

布尔萨·沃尔夫模型又称为七参数转换或七参数赫尔莫特变换，在该模型中共采用了 7 个参数，分别是 3 个平移参数，3 个旋转参数（也被称为 3 个欧拉角）和一个尺度参数 m 。设有两个分别基于不同基准的空间直角坐标系， $O_1-X_1Y_1Z_1$ 和 $O_2-X_2Y_2Z_2$ ，采用布尔沙模型将 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 下坐标转换为 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 下的坐标转换公式为：

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = (1+m) \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

式中 ΔX_0 、 ΔY_0 、 ΔZ_0 为 3 个平移参数， ε_x 、 ε_y 、 ε_z 为 3 个旋转参数， m 为尺度变化因子。为了求得这 7 个参数，至少需要 3 个公共点，当多于 3 个公共点时，可按最小二乘法求得 7 个参数的最或然值。

在进行坐标转换时，我们将所选取的点分为公共点和外部检核点。公共点用于求解参数，外部检核点用于检核参数。对转换的精度进行评定时主要参考坐标转换的内符合精度和外符合精度，内符合精度由计算参数的公共点转换后的坐标与原真值的残差表示，外符合精度由外部检核点根据计算参数进行坐标转换后的坐标值与真值的残差表示。

2.3.3.2 莫洛坚斯基模型 (M 模型)

该模型的旋转和相似变换中在地面网的大地原点上，并认为在旋转变化中大地的参心向量保证不变。

设有任意点在第一坐标系中的坐标为 X_{1i} ， Y_{1i} ， Z_{1i} ，在第二坐标系中为 X_{2i} ， Y_{2i} ， Z_{2i} ，同时假设在第一坐标系中有参考点 K，其坐标为 X_{1k} ， Y_{1k} ， Z_{1k} ，则莫洛坚斯基模型为

$$\begin{bmatrix} X_{2i} \\ Y_{2i} \\ Z_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X^M \\ \Delta Y^M \\ \Delta Z^M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \\ Z_{1i} \end{bmatrix} + m^M \begin{bmatrix} X_{1i} - X_{1k} \\ Y_{1i} - Y_{1k} \\ Z_{1i} - Z_{1k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_Z^M & -\varepsilon_Y^M \\ -\varepsilon_Z^M & 0 & \varepsilon_X^M \\ \varepsilon_Y^M & -\varepsilon_X^M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1i} - X_{1k} \\ Y_{1i} - Y_{1k} \\ Z_{1i} - Z_{1k} \end{bmatrix}$$

(2.9)

式中 ΔX^M ， ΔY^M ， ΔZ^M ， ε_x^M ， ε_y^M ， ε_z^M ， m 为该模型的转换参数。在该模型中受旋转和尺度影响的只是 P 点至参考点 K 的坐标差。

在三维转换模型中，以 B 模型最直观，用得十分广泛，而其他模型基本上不太采用。但不管使用哪种模型，都必须将两坐标系的大地坐标换算为相应原空间直角坐标，然后才能计算转换参数，这就涉及到大地高是否精确的问题。如果大地高存在较大的误差，精度较低，那么在所计算得到的转换参数就会包含较大的残差，因此在计算转换参数时有时需要剔除误差较大的点，或都只选择水平或是高程分量参与计算。

3 在线 GPS 数据处理

在线 GPS 数据处理，是一种利用 IGS 连续跟踪站观测数据和精密星历，使用专门的程序，处理用户通过网络上传的 GPS 数据的服务。在线 GPS 数据处理服务通常由知名的大地测量或测绘机构网站提供，负责处理用户 GPS 数据的是一套完善的系统，实现接收用户的 GPS 数据、检查用户 GPS 数据质量、收集各种信息、从 IGS 网站收集连续运行参考站的观测数据和精密星历、GPS 数据处理和生成及发送处理报告等各项功能。

在线 GPS 数据处理服务具有使用方便、精度高、处理速度快的特点。一般的在线 GPS 数据处理系统只需要用户提供正确的天线高、天线类型，上传 GPS 观测数据，就可以为用户完成数据处理，并返回数据处理报告。在线 GPS 数据处理服务都有自己的数据处理核心软件或是使用专业 GPS 数据处理程序，如 GAMIT 等，并且使用精密星历和轨道参数，因此可以获得一般用户自己处理所无法达到的精度。通常，使用 Ultra Rapid 星历和轨道参数可以获得厘米级的精度，而使用 Final 星历和轨道参数可以达到 1 厘米的精度。有数据表明 AUSPOS 使用 2h 的数据便能获得 cm 级的定位精度 (3D)，8h 就可以获得水平方向优于 1cm 和垂直方向优于 2cm 的定位精度。利用 24h 的观测数据可以获得 mm 级的内部符合精度和 1cm 左右的外部符合精度^[12]。因为使用的 IGS 产品都是基于 ITRF 框架系统的，提供成果也都是基于这一框架的，因此在线 GPS 数据处理服务是获得控制点精确 ITRF 坐标的一种非常方便的方法。在线 GPS 数据处理系统一般都能在用户提交数据 30 分钟到 1 个小时左右完成处理并返回处理报告，是一种方便、快速的、高精度的 GPS 数据处理方式。

在线 GPS 数据处理用户只需要提供单机的静态观测数据就可以获得待点定的精确坐标，因此实际的使用效果与精密单点定位方法是一样的。当建立区域控制点时，只要在工作区域选择观测条件良好的位置并使用单台双频接收机进行观测即可，省去了远距离联测大地控制点的工作，却可快捷的获得高精度 ITRF 框架的位置成果。

目前公认的比较可靠的、可提供全球范围内处理服务的在线数据处理服务系统有以下几种：

- (1) 澳大利亚国土资源部的在线 GPS 数据处理系统 AUSPOS；
- (2) 加拿大自然资源部的在线 GPS 数据处理系统 CSRS-PPP；
- (3) 圣地亚哥加州大学的 SOPAC 中心的 SCOUT 在线 GPS 数据处理系统；
- (4) 美国国家海洋和大气管理局的国家地理学会的在线 GPS 数据处理系统 OPUS。

这几个在线 GPS 数据处理系统虽然使用的数据处理核心程序不同,但都可以达到 cm 级的精度,相互之间也具有很好的一致性,用户使用频率和认可度较高。下文将对这四个在线 GPS 数据处理系统的使用和特点进行详细介绍,对各系统的定位精度和质量控制方法进行研究分析。

3.1 AUSPOS 在线数据处理

澳大利亚国土资源部提供的 AUSPOS - Online GPS Processing Service 在线处理系统是认可度最高的在线 GPS 数据处理系统之一。AUSPOS 可以使用 International GNSS Services (IGS) 的产品计算地球上任意一点的在 ITRF 框架下的准确坐标,所采用的 IGS 产品包括 Final, Rapid 和 Ultra-Rapid 三种,具体使用哪一种产品根据当时是否可用来决定^{[13][14]}。AUSPOS 在线 GPS 数据处理系统只处理双频载波相位观测数据。AUSPOS 的 GPS 数据处理程序为 Bernese GPS Software Version 5.0。

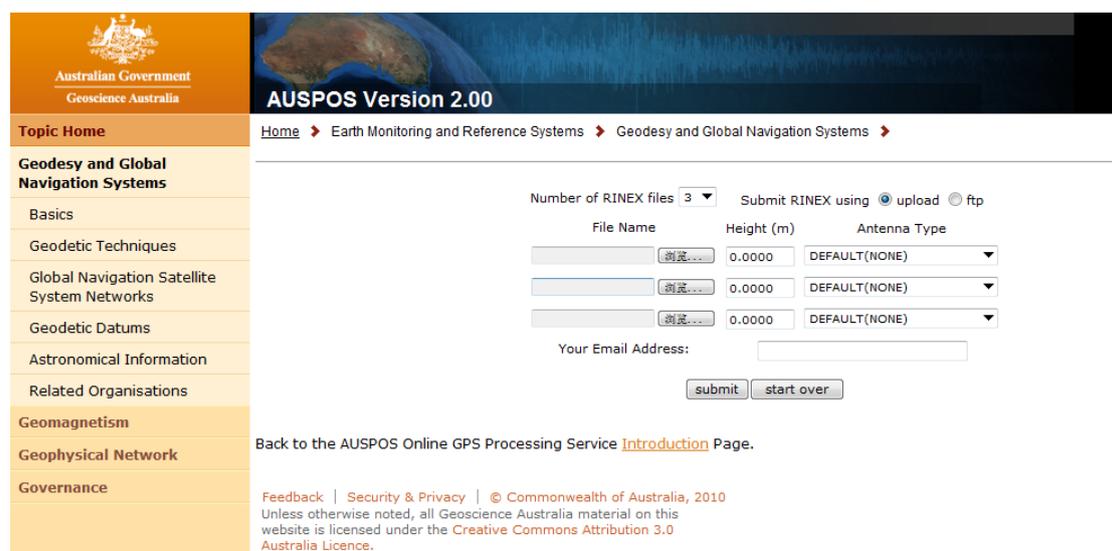


图 3.1 AUSPOS 数据上传界面

3.1.1 用户数据提交

在网络浏览器的地址栏中输入“http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl”,即可进入 AUSPOS 的数据上传网页界面。新的 2.00 版本网页如图 3.1 所示。

AUSPOS 在线 GPS 数据处理系统要求用户提交 GPS 数据为 RINEX 格式(与接收机无关数据交换格式)。

经过 5 个简单的步骤即可完成数据的提交。

(1) 上传文件个数 (Number of RINEX Files): 用户根据上传文件的个数,选择下拉菜单中相应的数字。网页会刷新,提供需要的输入框。

(2) 文件上传方式 (Submit RINEX using): 系统提供 upload 和 ftp 两种

方式。

Upload 方式：允许用户直接通过网页上传数据。

FTP 方式：处理系统根据用户输入网址从 FTP 服务器上提取数据。

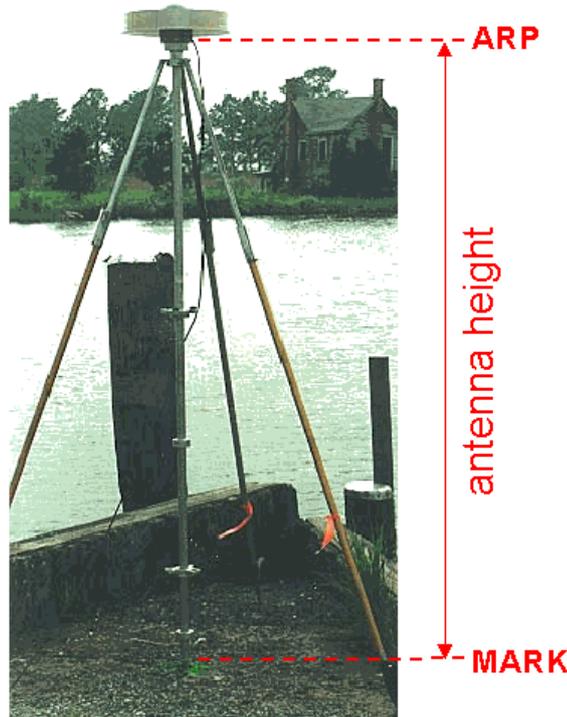


图 3.2 天线高量取方法

(3) 数据文件 (File Name): RINEX 数据文件的路径。

重复这一步骤，输入全部 RINEX 数据文件信息。

在 FTP 选项下，需要输入 RINEX 数据文件的网址，例如：

ftp://machine.com.au/pub/site0010.00o.Z, 默认的是匿名登录提取文件，如果需要用户名和密码，用户需要输入在网址中包含用户名和密码，格式如下 ftp://username:passwd@machine.com.au/pub/site0010.00o.Z, 用户名和密码之间要用“:”分隔，密码与网址之间要用@分隔。

UPLOAD 选项下：点击 BROWSE 按钮浏览查找要上传的 RINEX 文件。

处理系统允许将 RINEX 数据文件打包成 ZIP 格式的压缩文件，以减少上传数据量。压缩文件只能包含一个 RINEX 文件，一个 RINEX 文件只能包含一个测站的一个观测时段数据。

(4) 天线高和天线类型 (Height, Antenna Type): RINEX 数据文件对应的观测时段的的天线高和天线类型。每一个 RINEX 数据文件都要求输入这两项信息。

需要注意的是，这里的天线高不是到卫星天线相位中心的高度，而是地面标志的中心到天线参考点的竖直距离(参见图 3.2)。不同卫星天线的参考点标记的不同，通常天线上都有比较详细的说明。输入时需要格外注意，以免计算出的高

程有误。天线类型中提供了大多数常用的天线类型，如果不确定所用的天线类型或是没有所用的类型时选择 Default (None) 即可。

(5) 邮件地址 (Your Email Address): 数据处理结果将会发到该邮箱中，时间通常为 30 分钟到 1 个小时，视系统中排队任务的多少。

完成以上的输入步骤，数据检查无误后，点击 Submit 提交。

Startover 按钮会清空所有填写的内容。

点击提交后，数据开始上传，系统会打开一个新的窗口，窗口会提示与处理任务相关的信息。数据上传过程中窗口将一直保持空白。

当数据上传完成后，专门的检查程序将检查用户的数据质量。数据无法通过格式的检查，或者其他原因无法计算时，会向你的邮箱发送错误信息。可以根据提示修改错误，改正数据后重新提交。

3.1.2 处理报告

处理系统完成 GPS 数据计算后，会向用户提供详细的数据处理报告。AUSPOS 在报告中提供几项指标用来标识结果的精度和可靠性。

- (1) 天线高和天线相位中心改正量。
- (2) 先验坐标更新 (可用范围为 0.000 - 15.000 m);
- (3) 坐标精度 (可用范围为 0.001 - 0.025 m, 1 Sigma);
- (4) 均方根误差 (RMS) (可用范围为 0.0005 - 0.0250 m);
- (5) 数据剔除率 (可用范围为 0 - 25%)。指的是同一时段中，删除的观测值个数与获取的观测值总数的比值。

AUSPOS 处理系统在 2.00 版本中发生了一些变化。数据处理时，原来处理系统的软件根据被解算点到各参考站的距离自动选择 3 个的参考站点进行计算。新的 2.00 版本中，处理软件升级到使用多个参考站点的数据来解算，进一步提高处理结果的精度和可靠性。

处理报告中精度指标减少到两种，分别为坐标精度 (Coordinate Precision - Geodetic, One Sigma) 和模糊度解算 (Ambiguity Resolution - per baseline)。在模糊度解算这一项中，如果平均模糊度解算率达到或优于 50%，表明解算的结果是可靠的。详细内容如图 3.3:

4 Solution Information

4.1 Coordinate Precision - Geodetic, One Sigma

Station	σ East (m)	σ North (m)	σ Up (m)
8595	0.002	0.003	0.005
GLSV	0.003	0.003	0.005
KIT3	0.003	0.002	0.005
NICO	0.003	0.003	0.005
NSSP	0.002	0.002	0.005
POLV	0.002	0.003	0.005
RAMO	0.002	0.003	0.005

4.2 Ambiguity Resolution - per baseline

Baseline	Ambiguities Resolved	Baseline Length (km)
NICO - RAMO	83.6 %	519.7
GLSV - POLV	94.7 %	302.2
KIT3 - NICO	70.3 %	2964.0
NICO - NSSP	95.5 %	1128.0
8595 - NSSP	96.9 %	479.4
GLSV - NICO	94.0 %	1702.3
AVERAGE	88.2%	1182.6

图 3.3 AUSPOS2.0 解算精度信息

AUSPOS 在新的 2.00 版本中还有一项与旧版本不同，就是计算中所有参考站点的坐标不再被认为是零误差的，在平差处理时，在水平分量和垂直分量上被分别分配了 5mm 和 10mm 的标准偏差。所以在处理不同的站点的用户数据，甚至于在计算同一站点的不同时段数据时，相同的参考点的坐标会有微小的差别。由于分配的标准差是 5mm 和 10mm，因此这些差别都在 10mm 以内。表 3.5 就是各参考点在处理同一待定点不同时段数据时的变化。

表 3.5 参考点在不同时段数据处理时的变化

Station	X (m)	Y (m)	Z (m)	ITRF2008 @	ΔX	ΔY	ΔZ
7318	-1405773.097	4800859.205	3945287.961	25/11/2006	0.000	-0.004	0.000
7318	-1405773.097	4800859.201	3945287.961	24/11/2006			
AIRA	-3530185.547	4118797.306	3344036.922	25/11/2006	0.006	-0.007	-0.003
AIRA	-3530185.541	4118797.299	3344036.919	24/11/2006			
BJFS	-2148744.151	4426641.242	4044655.900	25/11/2006	-0.003	0.004	0.006
BJFS	-2148744.154	4426641.246	4044655.906	24/11/2006			
DAEJ	-3120042.035	4084614.848	3764026.894	25/11/2006	0.005	-0.006	-0.004
DAEJ	-3120042.030	4084614.842	3764026.890	24/11/2006			
GUAO	228378.933	4631946.903	4367028.487	25/11/2006	0.002	-0.005	-0.001
GUAO	228378.935	4631946.898	4367028.486	24/11/2006			
KUNM	-1281255.790	5640746.075	2682879.946	25/11/2006	-0.002	0.001	0.001
KUNM	-1281255.792	5640746.076	2682879.947	24/11/2006			
LHAZ	-106941.539	5549269.860	3139215.036	25/11/2006	0.002	-0.004	-0.004
LHAZ	-106941.537	5549269.856	3139215.032	24/11/2006			
OSN1	-3067861.857	4067639.054	3824293.967	25/11/2006	0.005	-0.007	-0.003
OSN1	-3067861.852	4067639.047	3824293.964	24/11/2006			
SUWN	-3062022.922	4055447.984	3841818.247	25/11/2006	0.003	-0.006	-0.004
SUWN	-3062022.919	4055447.978	3841818.243	24/11/2006			
TWTF	-2994428.208	4951309.196	2674496.811	25/11/2006	-0.006	0.006	0.005
TWTF	-2994428.214	4951309.202	2674496.816	24/11/2006			

3.2 OPUS 在线数据处理

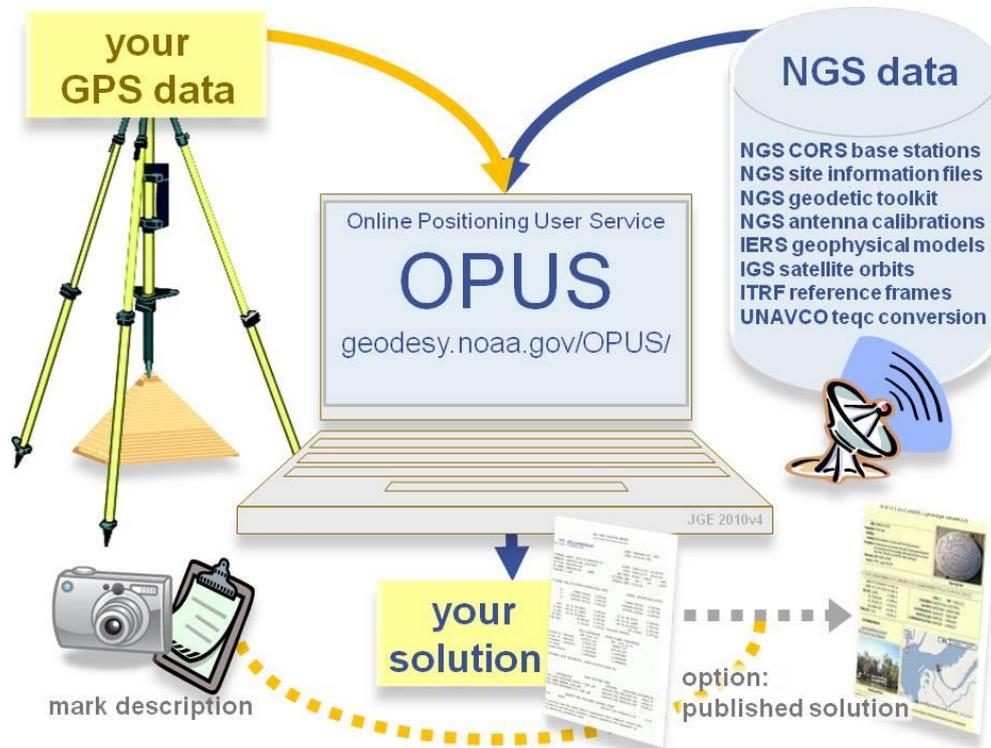
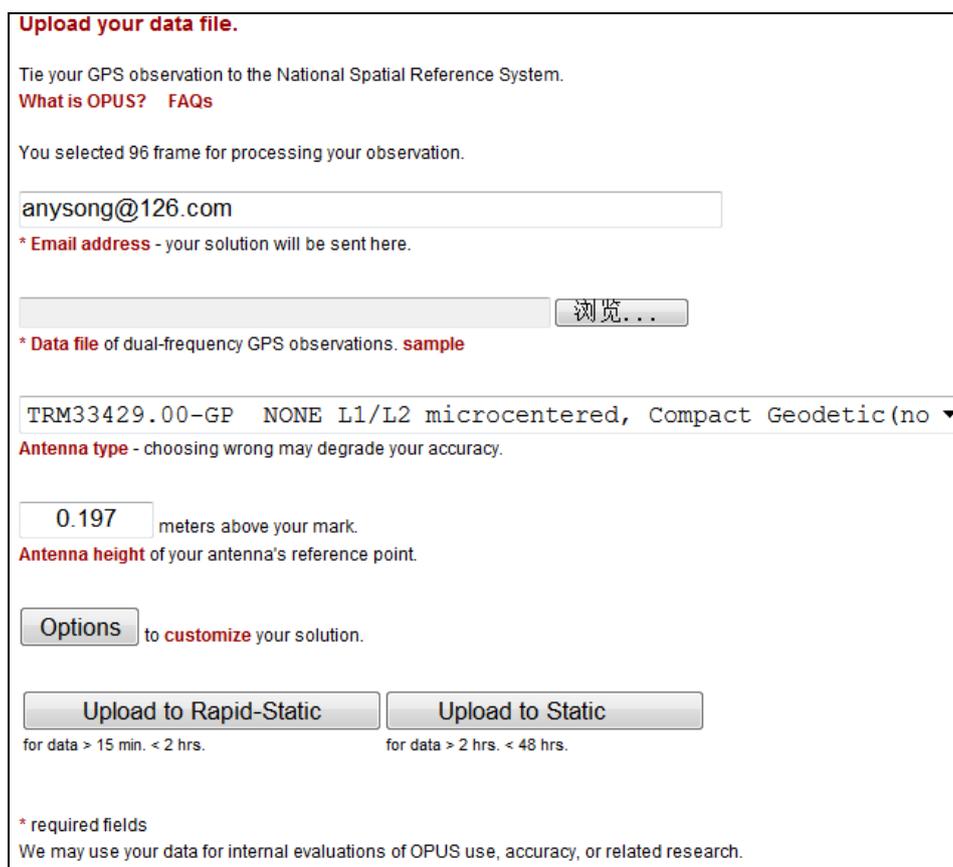


图 3.4 OPUS 系统构成

OPUS^[15]在线 GPS 数据处理系统由美国国家海洋和大气管理局的国家地理学会运行。OPUS 是在线定位用户服务 (Online Positioning User Service) 的缩写, 为用户提供一个获得基于国家参考坐标系坐标的简便途径。将由大地型接收机采集的 GPS 数据文件上传到处理系统, 系统会通过电子邮件发送基于 NSRS 的处理结果。

OPUS 在线 GPS 数据处理系统的静态数据处理程序为 PAGES (Program for the Adjustment of GPS EphemerideS), NGS 连续参考站网的计算工作也采用该软件。OPUS 提供给用户的坐标是由三个最近的 CORS 站点通过双差载波相位解算的单基线解的平均值。所得到的成果位置与其它的国家椭球参考系相一致。

3.2.1 用户界面-数据上传 (Uploading)



Upload your data file.

Tie your GPS observation to the National Spatial Reference System.
What is OPUS? FAQs

You selected 96 frame for processing your observation.

* **Email address** - your solution will be sent here.

* **Data file** of dual-frequency GPS observations. **sample**

Antenna type - choosing wrong may degrade your accuracy.

meters above your mark.
Antenna height of your antenna's reference point.

to **customize** your solution.

for data > 15 min. < 2 hrs. for data > 2 hrs. < 48 hrs.

* required fields
We may use your data for internal evaluations of OPUS use, accuracy, or related research.

图 3.5 OPUS 用户界面

OPUS 数据上传只需要简单的五个步骤，界面如图 3.5 所示：

1) 电子邮箱

输入一个电子邮箱，用于接收系统发送处理报告或是提示信息。

2) GPS 数据文件

OPUS 系统具有很强 GPS 数据格式识别能力，用户可以提供任何一种 GPS 接收机数据格式，系统将通过 UNAVCO 的 TEQC 软件自动将原始数据转换成 RINEX 数据格式。用户也可以直接提交 RINEX 格式的 GPS 数据。OPUS 系统也可以识别 UNIX 压缩文件，也可以是 GZIP 或 PKZIP 格式。

一次处理只能提交一个 GPS 数据文件，但一个压缩文件可以包括多个 GPS 数据文件。

OPUS 系统可以接受 1, 2, 3, 5, 10, 15 或是 30 秒采样率的数据，但数据处理时都将按照 30 秒采样率来处理。在数据文件中包含的一些测量信息，比如天线类型，天线高，和点名信息等，基于格式和信息准确性原因，在处理时并不会被处理系统采用。

3) 天线类型

选择观测使用的天线型号。天线类型必须选择正确，以便数据处理时，OPUS 系统确定应该使用的正确的天线改正模型。错误的天线类型或是缺省类型可以造成 10 厘米的高度误差。

4) 天线高度

天线高度指天线参考点到测量标志中心的竖直高度，参考图 3.2。

5) 可选项

可选项允许用户配置数据处理的一些参数和输出报告的内容。选择参加计算的参考站点，选择高程异常模型和投影方式，以及是否共享处理成果。如果不选择将使用缺少设置。对于一般用户可以直接略过，使用 OPUS 的缺省配置。

3.2.2 处理软件：

OPUS 系统为不同的数据类型提供了三种不同的优化软件。

STATIC（静态数据）：使用 PAGES 软件，要求观测数据不少 2 个小时，最多不超过 48 小时。结果坐标是三个最近的 CORS 站点到待定点的双差载波相位解算的单基线解的平均值。图 3.6 为解算方法的示意图。

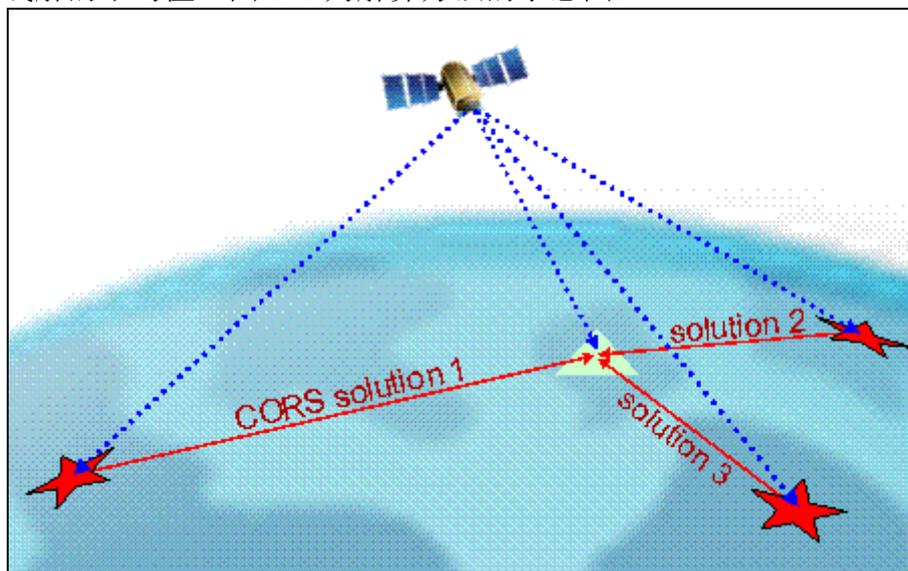


图 3.6 OPUS 的 STATIC 待定点求解示意图

RAPID-STATIC（快速静态数据）：使用 RSGPS 软件，要求观测数据至少 15 分钟，但不超过 2 个小时。所有被使用的历元中包含的四种类型(L1, L2, P1 (or C1), and P2) 观测数据都要满足要求。

KINEMATIC（动态数据）：目前还未提供。

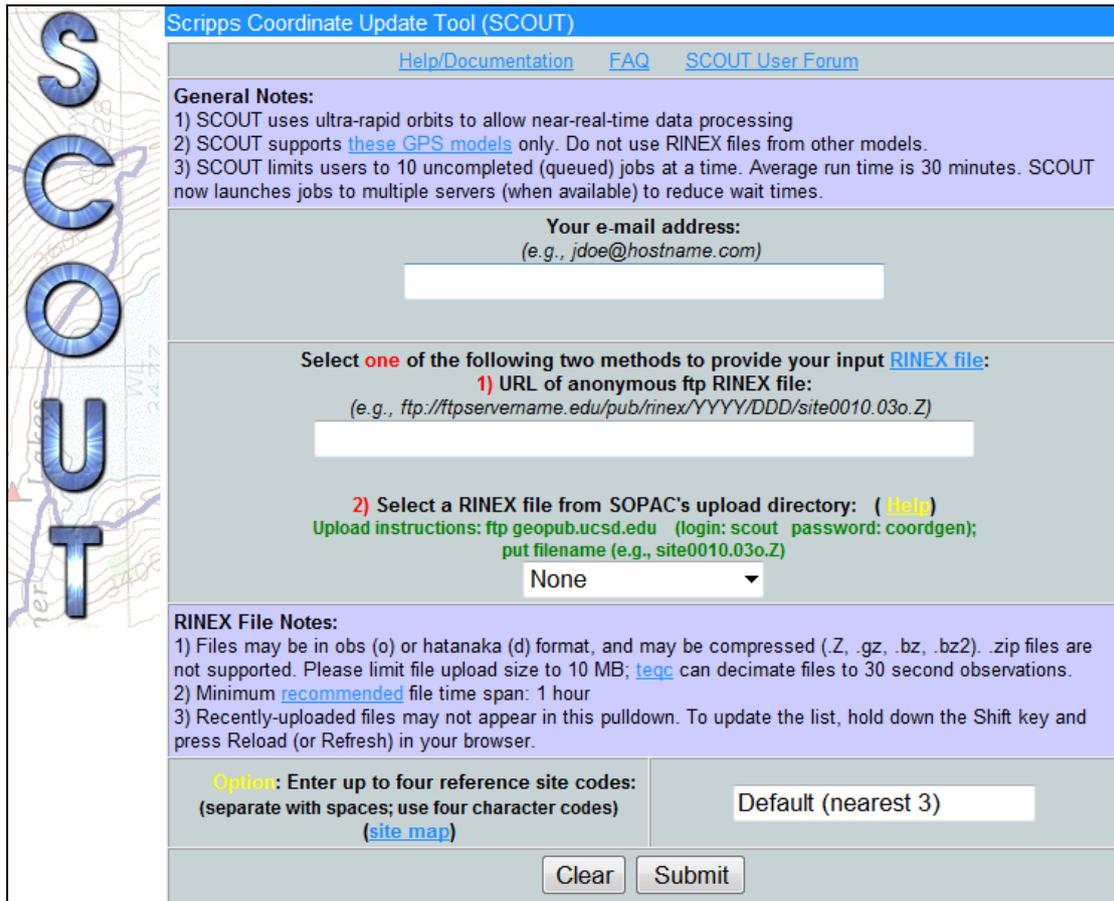
3.2.3 处理控制指标

- (1) 轨道数据: orbit used = precise or rapid
- (2) 数据使用率: > 90% observations used
- (3) 整周模糊度解算比: > 50% ambiguities fixed
- (4) RMS: Static: overall RMS < 3 cm
- (5) Peak-to-Peak errors: < 5 cm

3.3 SCOUT 在线处理系统

SCOUT 是由圣地亚哥加州大学的 SOPAC 运行维护的在线 GPS 数据处理系统。SCOUT 的核心处理程序使用的是 GAMIT 软件包，而 GAMIT 软件包是公认的性能比较稳定、精度较高的 GPS 数据处理软件。

3.3.1 系统界面



The screenshot displays the 'Scripps Coordinate Update Tool (SCOUT)' web interface. On the left is a vertical logo with the word 'SCOUT' in large blue letters over a map background. The main content area has a blue header with the title and navigation links for 'Help/Documentation', 'FAQ', and 'SCOUT User Forum'. Below the header is a 'General Notes' section with three numbered points. The next section is for 'Your e-mail address' with a text input field. This is followed by a section for selecting a RINEX file input method, with two options: '1) URL of anonymous ftp RINEX file' and '2) Select a RINEX file from SOPAC's upload directory'. Option 2 includes upload instructions and a dropdown menu currently set to 'None'. Below this is a 'RINEX File Notes' section with three numbered points. At the bottom, there is an 'Option' section for 'Enter up to four reference site codes' with a text input field containing 'Default (nearest 3)'. The interface concludes with 'Clear' and 'Submit' buttons.

图 3.7 SCOUT 用户界面

3.3.1.1 观测信息

SCOUT 也有类似于其他几种在线 GPS 数据处理系统一样的 WEB 输入界面（图 3.7），要求输入邮箱和 GPS 数据文件，也可以选取参加计算的参考站点，但是天线高、天线类型、点名等信息会从 RINEX 数据文件中提取，因此在提交的 RINEX 文件应该认真核对各项信息，保证准确无误，否则影响计算结果的正确性。如果这些信息无法从 RINEX 文件中识别、提取，系统将会要求提供这些信息。

SCOUT 系统使用 GAMIT 软件包处理 GPS 数据，软件可以识别大部分主要厂家的天线类型，如果使用的天线类型不在这个范围内，GAMIT 软件将无法进行处理，

从而导致处理失败。上传数据前，可以对照 SCOUT 的说明文件进行检查。

3.3.1.2 数据格式

SCOUT 系统可以识别 Z、GZ 和 BZ 等格式压缩文件，GPS 数据可以识别一般的 RINEX 格式，也可以识别压缩 RINEX 格式 (Hatanaka.yyd) 的文件。

RINEX 格式的正确性可以使用 UNAVCO 的 TEQC 软件进行检查。RINEX 的文件名应符合标准的 RINEX 文件格式，如 AAAADDDS.YY_o，AAAA 是唯一的点名，DDD 为年积日，S 为时段号，YY 为两位的年，o 代表观测文件。如果 RINEX 文件名及数据格式不正确，软件将无法进行数据检查，从而处理任务失败。

3.3.1.3 上传方式

SCOUT 在线处理系统不提供 UPLOAD 上传方式，用户需要将数据存放在可匿名登录的 FTP 服务器上，在 SCOUT 的网页界面内输入数据文件准确的网址，系统根据网址提取数据文件。SCOUT 还提供了专门的 FTP 空间供用户上传数据，用户通过指定的用户名和密码 (ftp geopub.ucsd.edu login: scout password: coordgen) 登录 FTP 服务，上传 RINEX 格式的 GPS 数据，或是可识别格式的压缩包文件。当 GPS 数据被成功上传到 SCOUT 的 FTP 服务器后，刷新 SCOUT 的处理网页，在文件下拉菜单中就可以找到该文件并选取。

最后点击提交，即可排队等待处理。

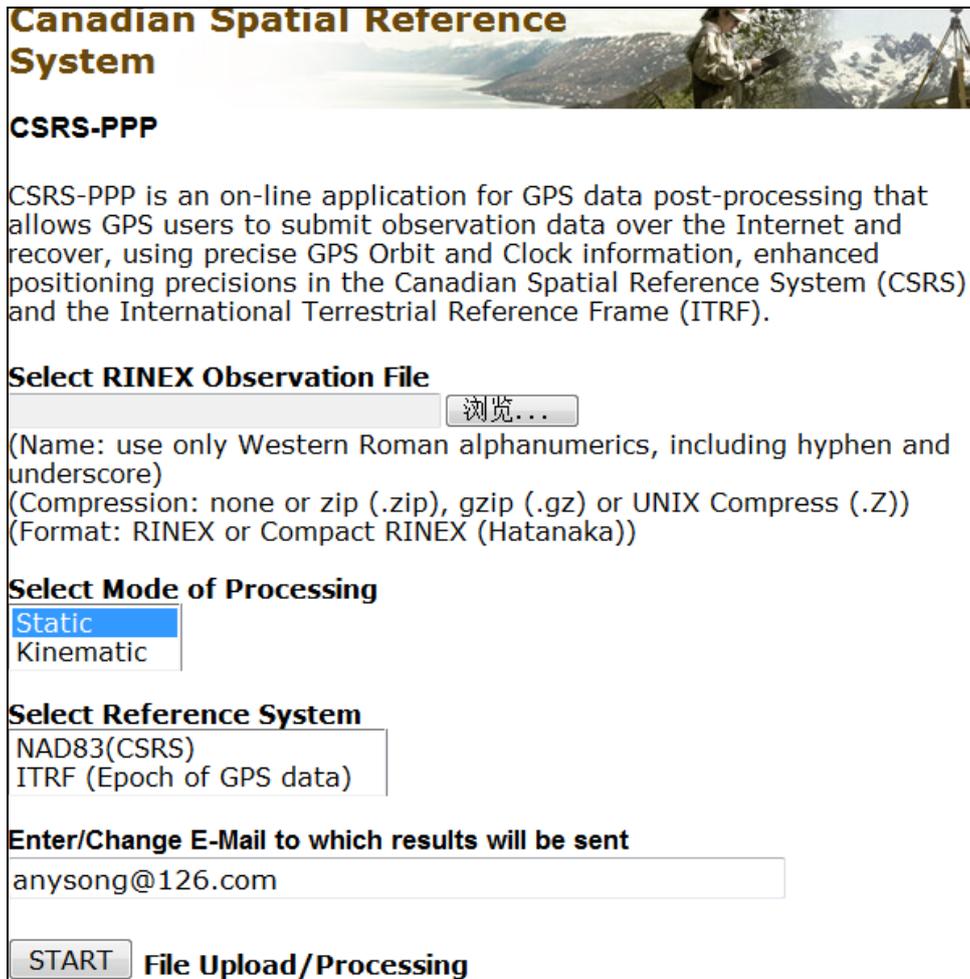
3.3.2 处理报告

SCOUT 处理系统提供的处理报告比较简单，只包含主要几项信息：

- (1) 数据处理任务中使用到的参考站点，参考历元；
- (2) WGS84 系统的经纬度坐标及标准差；
- (3) ITRF2005 基准下的空间直角坐标及标准差；
- (4) 平均基线长度；
- (5) 卫星轨道数据。

3.4 CSRS-PPP 在线数据处理

Online Global GPS Processing Service (CSRS-PPP) 是 NRCan (加拿大自然资源部) 提供的免费在线后处理的精密单点定位服务。CSRS-PPP 是 Canadian Spatial Reference System (CSRS) Precise Point Positioning (PPP) 的缩写, 即加拿大椭球参考系统精密单点定位服务。



Canadian Spatial Reference System

CSRS-PPP

CSRS-PPP is an on-line application for GPS data post-processing that allows GPS users to submit observation data over the Internet and recover, using precise GPS Orbit and Clock information, enhanced positioning precisions in the Canadian Spatial Reference System (CSRS) and the International Terrestrial Reference Frame (ITRF).

Select RINEX Observation File

(Name: use only Western Roman alphanumeric, including hyphen and underscore)
(Compression: none or zip (.zip), gzip (.gz) or UNIX Compress (.Z))
(Format: RINEX or Compact RINEX (Hatanaka))

Select Mode of Processing

Static
 Kinematic

Select Reference System

Enter/Change E-Mail to which results will be sent

File Upload/Processing

图 3.8 CSRS-PPP 用户界面

CSRS-PPP 与前面介绍的三个系统有很大不同, 该系统采用的精密单点定位方法处理用户的 GPS 数据, 而前面介绍的三个系统采用的软件都是使用静态相对定位方法来处理数据。CSRS-PPP 在线精密单点定位系统采用精密卫星轨道参数和卫星钟参数, 处理用户的 GPS 原始观测数据, 可以获得准确的坐标成果。系统提供静态和动态两种处理模式。质量良好的观测数据能够获得 cm 级精度, 用户可以得到基于 NAD83 和 ITRF2005 参考坐标系的坐标^[16]。

CSRS-PPP 不仅可以处理双频 GPS 接收机的原始数据, 也可以处理单频 GPS 接收机的原始数据。处理模式有静态和动态两种, 每个历元会进行单独改正。

处理软件会从提交的 RINEX 格式数据文件中选取 L1 和 L2 伪距观测值和载波相位观测值进行解算或是只采用 L1 的伪距观测值。L1 伪距解只当 L1 和 L2 以及载波相位解算失败时才会采用。

目前 CSRS-PPP 处理系统可以使用 NRCan 的每小时 GPS 轨道和钟差产品，提供最迅速的测后 90 分钟静态和动态 GPS 处理服务。

3.4.1 系统界面

3.4.1.1 CSRS-PPP 的数据上传步骤：

- (1) 选择 RINEX 格式的数据文件。
- (2) 选择数据处理的模式 STATIC 或 KINEMATIC。
- (3) 选择参考坐标系 NAD83 (CSRS) 或是 ITRF (Epoch of GPS data) 。
- (4) 输入接收处理报告的邮箱地址。
- (5) 提交。

界面如图 3.8 所示。

3.4.1.2 数据文件

CSRS-PPP 系统采用 Upload 的方式数据上传文件，直接选择数据文件网页上传。GPS 数据的格式可以是 RINEX 格式或是压缩 RINEX 格式 (Hatanaka)，数据文件可以不压缩或是 zip (.zip), gzip (.gz) or UNIX Compress (.Z) 等格式压缩文件。

用户可以通过 CSRS 在线数据库或是 PPP DIRECT 桌面程序来提交 RINEX 格式的 GPS 数据，程序界面如图 3.9。

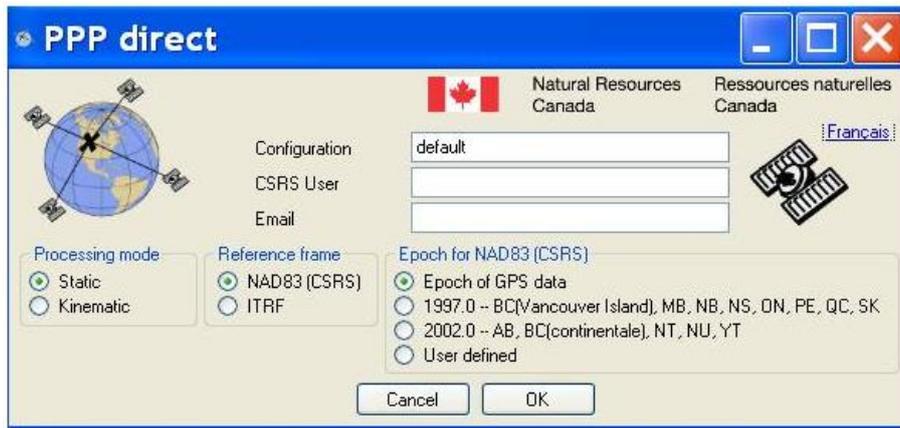


图 3.9 PPP direct 程序界面

3.4.1.3 观测信息

CSRS-PPP 系统没有要求输入天线高、天线类型、点名等信息，这些信息需要从 RINEX 数据文件中提取，因此在提交的 RINEX 文件中的各项信息，保证准确无误，否则会导致计算结果错误。

3.4.2 处理报告

CSRS-PPP 在线 GPS 数据处理系统，提供了 RMS、置信度 95%的误差椭圆、相对于先验坐标的改正值、整周模糊解算精度、载波相位残差等控制指标。

3.5 在线数据处理成果质量控制

3.5.1 静态观测时段长度与成果质量

在线数据处理中使用的参考站为 IGS 的连续运行参考站点, 距离待定点的距离可能在 1000 公里以上, 远的可达到 2000 公里, 因此使用在线数据处理时, 对于野外的观测条件要求更加严格。除了通常的 GPS 静态观测中要求测前星历预报, 选取 DOP 值较小的时段, 选择观测条件更好的测站位置外, 还要有足够的观测时间。因此如何决定观测时段的长度是保证数据处理成功和成果精度的关键, 针对这个问题, 本文对不同时段长度对成果精度的影响进行了分析研究。

表 3.6 不同时段长度数据对应三维坐标成果

时段长度	Latitude (+n)	Longitude (+e)	Ell. Height	备注
06h	38 26 56.7507	106 19 15.3351	1097.151 m	所有坐标基于 ITRF05 (2006)
12h	38 26 56.7504	106 19 15.3361	1097.147 m	
18h	38 26 56.7505	106 19 15.3363	1097.152 m	
24h	38 26 56.7505	106 19 15.3366	1097.154 m	
30h	38 26 56.7505	106 19 15.3367	1097.150 m	
36h	38 26 56.7505	106 19 15.3367	1097.153 m	
42h	38 26 56.7505	106 19 15.3368	1097.154 m	
48h	38 26 56.7505	106 19 15.3369	1097.157 m	

表 3.7 不同时段长度数据对应成果 RMS

时段长度	Latitude (+n)	Longitude (+e)	Ell. Height	备注
06h	0.009 m	0.040 m	0.053 m	Sigmas (95%) 所有 RMS 值都 来自处理报告
12h	0.006 m	0.014 m	0.033 m	
18h	0.005 m	0.012 m	0.027 m	
24h	0.004 m	0.009 m	0.023 m	
30h	0.003 m	0.009 m	0.021 m	
36h	0.003 m	0.007 m	0.019 m	
42h	0.003 m	0.007 m	0.017 m	
48h	0.003 m	0.006 m	0.016 m	

在试验过程中, 以 6 小时基础时段, 按 6 小时的长度增加观测数据量, 使用同一在线 GPS 数据处理系统 CSRS-PPP 进行处理, 对处理成果的收敛性和稳定性

进行分析，并对其 RMS（均方根误差）进行分析。下文中所列出的各种成果及精度指标均从 CSRS-PPP 处理报告中取得。

表 3.6 为不同时段长度的 GPS 数据处理得到对应的三维坐标。

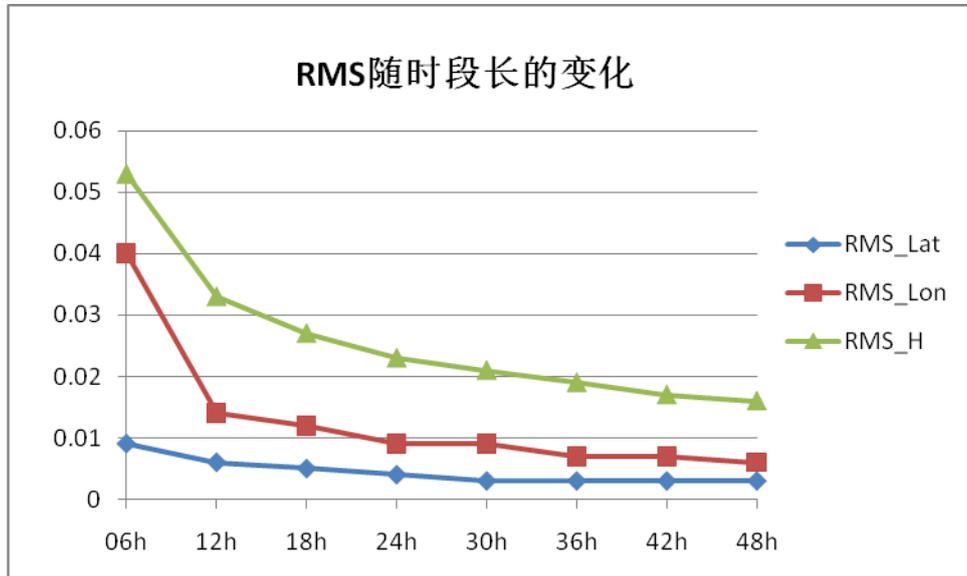


图 3.10 不同时段长度成果 RMS 收敛情况

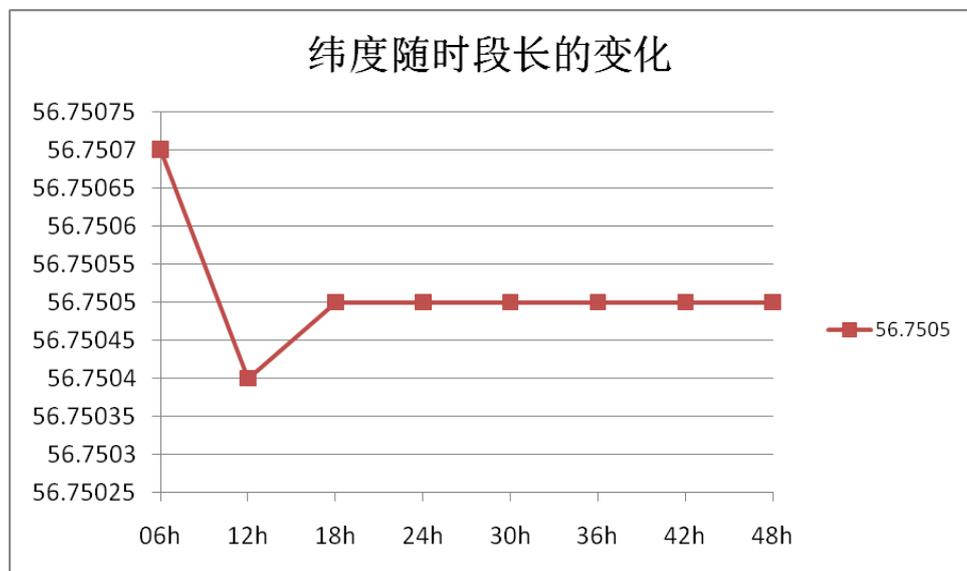


图 3.11: 不同时段长度对应坐标纬度方向收敛情况

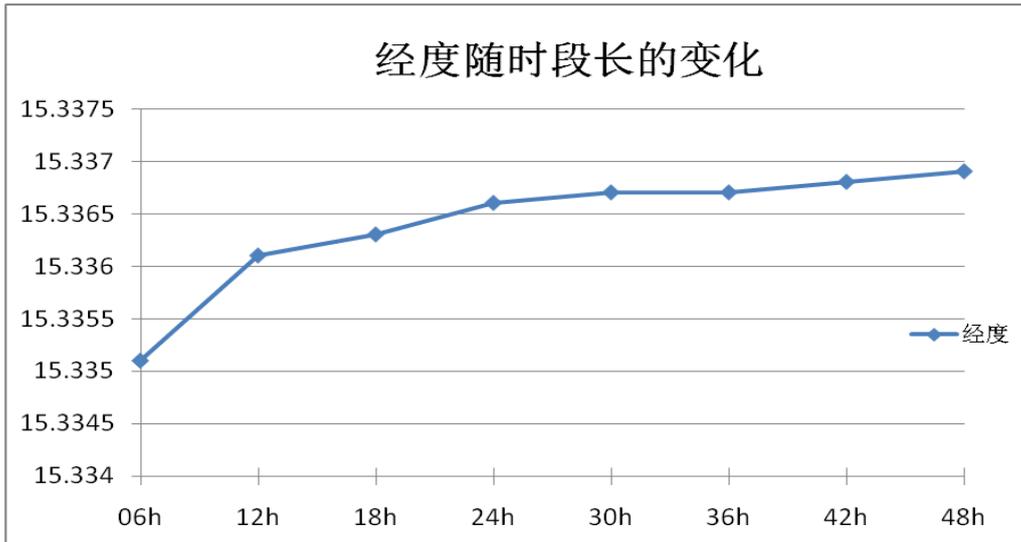


图 3.12: 不同时段长度对应坐标经度度方向收敛情况

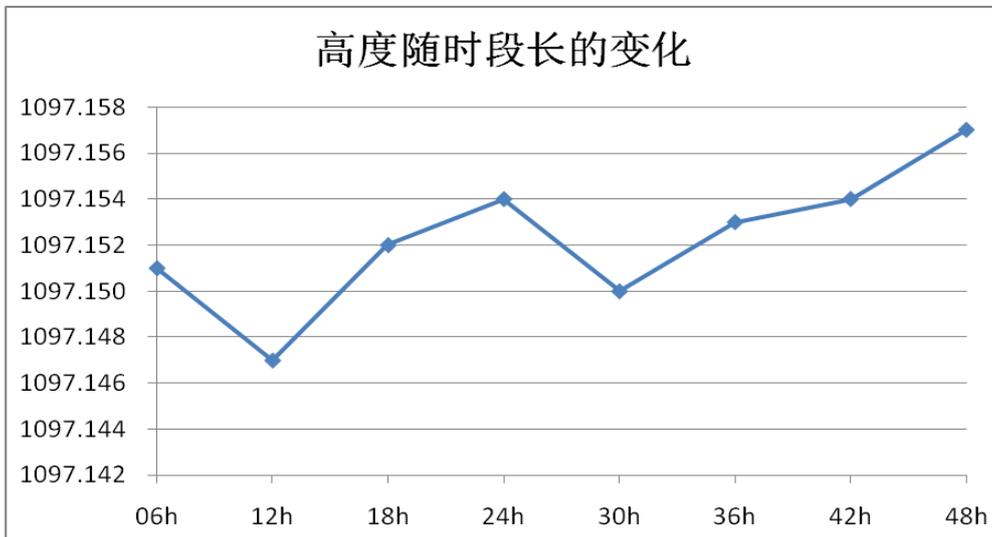


图 3.13: 不同时段长度对应坐标高度方向收敛情况

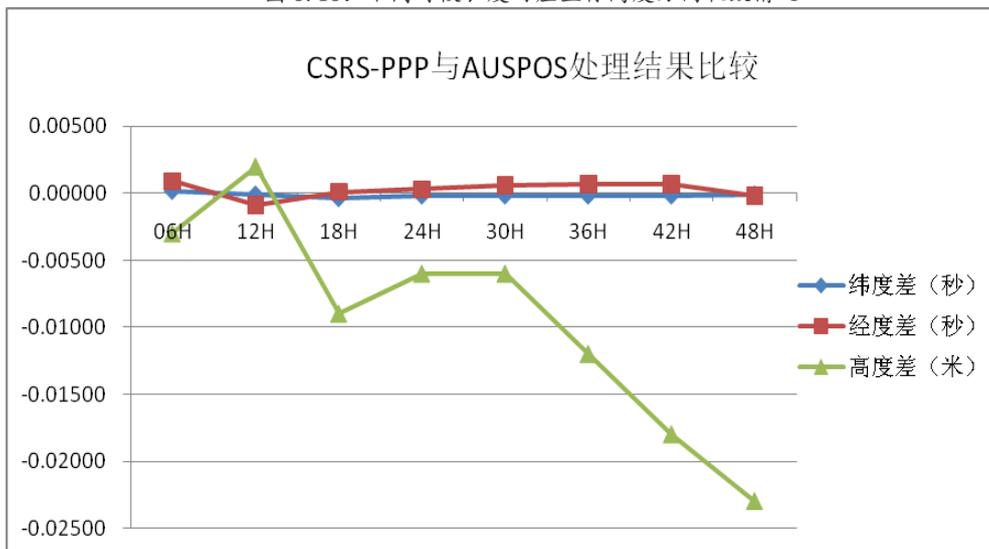


图 3.14: AUSPOS 与 CSRS-PPP 处理结果在各个方向上差别

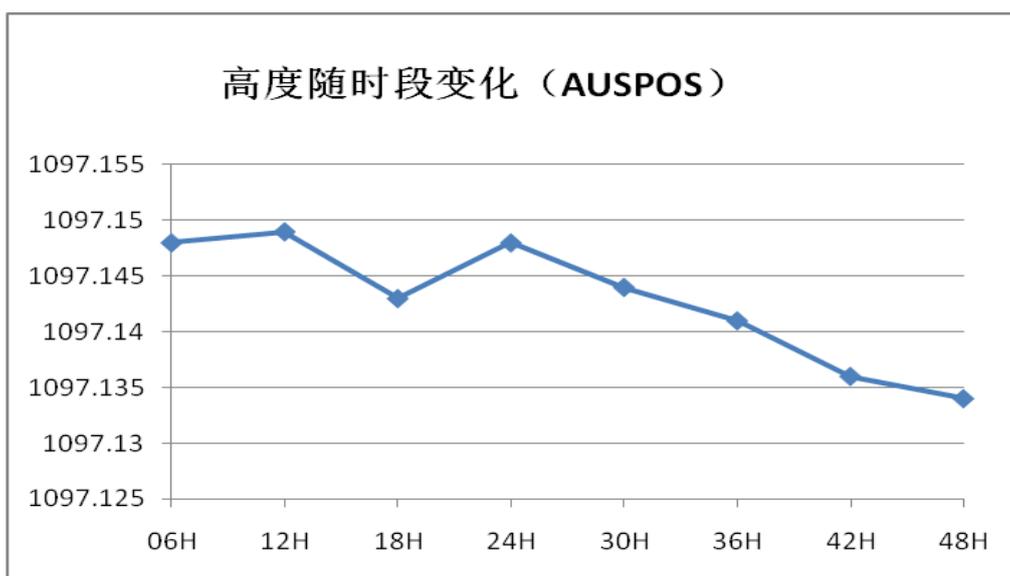


图 3.15 AUSPOS 处理结果，不同时段长度对应坐标高度方向收敛情况

下面以 2008 年的一个实测数据及检查结果来说明 AUSPOS 系统的处理结果的稳定性。

两站点 Z16 和 Z18，距离 38673.82 米。使用 AUSPOS 处理的原始数据都为 48 小时观测，使用 IGS Final 数据进行处理，结果（见表 3.8）RMS 都在优于 1 厘米。两个点站点数据分别上传、处理，因此虽解算过程使用相同的参考站点，但处理结果间没有相关性。

表 3.8 AUSPOS 处理报告中的点位成果及精度

点名	X	Y	Z	备注
Z16_	5367396.845	1770969.55	2946577.938	
	0.003 m	0.01 m	0.005 m	RMS
Z18_	5348481.234	1800649.378	2962608.269	
	0.001 m	0.016 m	0.008 m	RMS

本地基线处理使用 LG0 软件，版本为 7.0，观测数据 24 小时。单基线解算的标准差：平面 0.0003m，高程 0.0006m。

表 3.9 在线处理结果与单基线处理结果比较

站点名	X	Y	Z	备注
Z16	5367396.8450	1770969.5500	2946577.9380	AUSPOS
Z18	5348481.2340	1800649.3780	2962608.2690	AUSPOS
Z18	5348481.2526	1800649.3887	2962608.2851	单基线解算
Δ	-0.0186 m	-0.0107 m	-0.0161 m	

表 3.9 中的比较结果表明，AUSPOS 的基线解算具有很高的精度，1000km 以

上的基线内部精度多数优于 1 厘米，独立处理的点位坐标外部检核误差也优于 2 厘米。

通过分析可以得出这样的结论：

(1) 图 3.10 所示，12 小时观测数据的处理结果精度 (RMS) 相对于 6 小时有明显的改善，24 小时以上观测数据的计算精度显示良好稳定性。

(2) 图 3.11、3.12、3.13 所示，24 小时以上的观测数据计算精度，经度、纬度方向都保持在 0.0005 秒以内，高度方向保持在 0.015m 以内，表现出很好的收敛性，平面方向收敛性要优于高度方向。说明在 24 小时的长时段观测可以保证成果的精度和可靠性。

(3) 通过对 RMS 的收敛情况的分析，24 小时到 48 小时之间的观测数据成果精度可以持续改善，但幅度很小，都在 0.005 米以内。

(4) 图 3.14 所示，将 AUSPOS 和 CSRS-PPP 两个在线数据处理系统对相同数据的处理结果进行比较发现，在平面位置方面两个系统处理所得成果具有很好的—致性，但在高度方向存在一定差异，但差别在 0.025m 以内。这说明虽然两种处理方法所得成果的精度都很高，虽在高度方向存在差异但是都在 3cm 以内。

(5) CSRS-PPP 使用精密单点定位方法，AUSPOS 使用静态相对定位数据处理方法，两种系统处理结果的比较表明，静态精密单点定位可以获得很高成果精度，达到 cm 级，完全满足石油物探测量控制起算需求。

(6) 两个在线 GPS 数据处理系统计算成果在高度方向，都表现出收敛性，但收敛速度和效果不如平面方向。AUSPOS 的相对静态处理方法收敛速度要优于 CSRS-PPP 的精密单点定位方法，但成果收敛方向不同，原因有待于进一步深入研究。

3.5.2 成果质量控制

在线 GPS 数据处理成果的质量主要从两方面来控制：

(1) 在线 GPS 数据处理系统提供标识成果的精度和可靠性的一些指标，比如 RMS、数据剔除率等。

(2) 目前多个在线 GPS 数据处理系统可以选择，因此除了处理系统内部的指标控制外，系统之间的成果比对，作为一个外部检查手段可以有效保证成果的可靠性。

3.5.2.1 数据处理系统精度指标

在线 GPS 数据处理系统提供了一些通用的指标来标识成果的精度和可靠性。这是判断用户观测数据质量和处理结果精度、可靠性的最直接和有效的办法。

(1) AUSPOS 在线 GPS 数据处理 2.0 系统中，提供了坐标精度、RMS (一倍 Sigma)、数据剔除率、整周模糊度解算程度 (Ambiguity Resolution) 等。这些

指标的可用范围 AUSPOS 都给出了建议值，当然具体数值应该根据实际应用对精度的要求来设置。系统一般建议 RMS 范围为 0 至 0.025m，数据剔除率应小于 25%，整周模糊度解算比应大于 50%以上，如果指标在这些范围内，成果被认为是可靠的。

(2) CSRS-PPP 在线 GPS 数据处理系统，提供了 RMS、置信度 95%的误差椭圆、相对于先验坐标的改正值、整周模糊解算精度、载波相位残差等指标。

(3) OPUS 在线 GPS 数据处理系统提供了 RMS、平面平差精度、高程平差精度等及 XYZ、ENU 的方差矩阵等指标。

(4) SCOUT 在线 GPS 数据处理系统提供的指标参数相对要简单的多，只有坐标精度 RMS 一项。

在石油物探测量中，通常使用在线 GPS 数据处理的方法来获得工区控制的起始 WGS84 坐标，用于日常的 RTK 施工，根据甲方和石油物探对点位精度的要求，一般认为 RMS 在 5cm 以内成果就是可靠的，可用于生产。而实际生产中我们会同时选取 2-3 个控制点进行长时段的观测，并分别进行在线处理，然后与单点约束平差（或单基线解算）结果进行比较，以检查在线处理结果的精度和可靠性。

3.5.2.2 多系统成果检核

各个在线 GPS 数据处理系统的处理核心软件可能采用不同算法，也可能存在某些不足，因此为了保证所得到成果的可靠性。在使用在线 GPS 数据处理系统时，一般会采用至少 2 个系统进行处理，如果两个系统处理所得结果比较差别在允许范围（10cm，应该根据甲方要求确定）内，就可以任选其中一个成果或是两个成果的平均值作为最终成果。

在线 GPS 数据处理系统通常都使用 IGS 的精密星历和电离层改正等，IGS 提供了 Ultra Rapid、Rapid 和 Final 三种产品。在实际生产中，需要的尽快的获得起算坐标、开始测量，因此最初获得的成果都利用 Ultra Rapid 产品解算的，为了获得更高的测量精度，通常会在获得使用 Final 产品计算的结果后替换最初的坐标。

3.5.2.3 质量控制规程

在线数据处理服务的高精度已经被大量的数据所验证。通过与各方面的测量专家，甲方油公司的测量监督等的沟通与探讨，通过数据分析、验证，目前在中国石油集团东方地球物理公司利比亚项目经理部已经形成了一套可操作、可靠的质量控制规程。

质量控制规程主要分为三个步骤：数据观测质量控制、数据处理质量控制、质量外部检查。

a) 数据观测质量控制：

(1) 布点要求，作为控制网的 WGS84 起算点，与 IGS 连续运行跟踪站联测的点数应该不小于 2 个，点位必须分布均匀，能够反映控制网的最弱精度。

(2) 控制点标志要求：作为控制网的起算点，应该按照甲方的首级控制点要求来进行控制点建设，便于长期保存和后期利用。

(3) 时段长度：观测时段长度要求最少 24 小时。

(4) 时段数：通常采用一个时段即可。原因是处理时采用多种处理系统同时处理，可以有效的发现问题，另一个原因就是观测时间过长，会影响野外观测效率。

(5) 采样率：要求采用 15 秒。这样可以在进行联测观测的同时进行本地控制网的观测数据采集，15 秒可以保证控制网有足够的观测数据。而一般在线处理系统使用 30 秒采样率。

(6) RINEX 文件格式：数据格式转换时要求严格按照要求输入文件名、点名、天线类型、天线高等，错误的信息会造成处理的结果的错误或处理失败。

b) 数据处理质量控制：

(1) RMS：应小于 0.05m。

(2) 数据剔除率：应小于 20%。

(3) 模糊度解算比：应大于 50%。

c) 外部质量控制：

(1) 不同时段间误差：应小于 5cm。

(2) 不同处理系统结果差：应小于 5cm。

(3) 两点间单基线符合差：应小于 5cm。

4 星站差分及其物探应用

4.1 星站差分 GPS

4.1.1 广域差分 GPS 系统 (WADGPS)

GPS 受美国 AS 和 SA 政策影响, 在无法使用 P 码的情况下, GPS 用户实时定位精度降低到 100m 左右。美国政府虽于 1996 年初曾宣布停止 SA, 并于 2000 年 5 月 2 日永久中止全球性的 SA, 但即使没有 SA 干扰, GPS 实时定位精度也难于高过 $\pm 15\text{m}$ 至 30m 。而建立和发展差分 GPS 系统可以有效的提高 GPS 实时定位精度, 有利于 GPS 技术更广泛的应用。差分 GPS 实时定位技术基本上可以分为二种类型, 即局域差分 GPS 和广域差分 GPS^[17]。

局域差分 GPS (LADGPS) 实时定位技术由基准站、数据通信链和用户站组成。它提高用户站定位精度的原理是建立在基准站和用户站对 GPS 卫星同步同轨跟踪的基础上的。在一定距离内 (一般不超过 150km), 两种站上的观测值相应于同一卫星的同一轨道弧段, 它们之间存在强相关性, 即它们都包含相同的误差。由于 LADGPS 削弱用户站定位误差是基于同轨性原理的, 所以对基准站和用户站之间的距离间隔的要求和对用户站定位精度改善都有较大限制。

广域差分 GPS (WADGPS) 技术的基本思想是对 GPS 观测量的误差源加以区分, 并对每一个误差源分别加以“模型化”, 然后将计算出来的每一个误差源的误差修正值 (差分改正值), 通过数据通讯链传输给用户, 对用户 GPS 定位中的误差加以修正, 以达到削弱这些误差源的影响, 改善用户 GPS 定位精度的目的。这种方法既削弱了 LADGPS 技术中主控站和用户站之间时空相关性的要求, 又保持了 LADGPS 的定位精度。因此在 WADGPS 系统中, 只要数据通讯链有足够能力, 主控站和用户站间的距离原则上是有限制的。

广域差分 GPS 所针对的这些误差源主要表现在以下三个方面:

- (1) 星历误差, 包括 SA 中 ϵ 技术的影响。
- (2) 卫星钟差误差, 包括 SA 中 δ 技术的影响。

(3) 大气延时误差 (包括电离层和对流层延时), 广域差分 GPS 技术通过建立精确的区域大气延时模型, 能够准确地计算出其对区域内不同地点的大气延时值, 从而获得较好的定位精度。

WADGPS 系统就是为削弱这三种主要误差源而设计的一种导航定位系统工程。WADGPS 系统一般由一个主控站、若干个 GPS 卫星跟踪站 (又称基准站或参考站)、

一个差分信号播发站、若干个监控站、相应的数据通讯网络和若干个用户站组成。

4.1.2 广域增强差分系统

4.1.2.1 系统简介

广域增强系统 (Wide Area Augmentation System, 简称 WAAS) 是由美国联邦航空局开发建立的空中辅助导航的系统, 目的是提高 GPS 系统的准确性, 完整性和可用性。简单的讲, WAAS 是为了保证飞机上 GPS 系统在其覆盖范围内的任何机场, 在所有飞行阶段 (包括精确着陆在内) 的精度和可用性。WAAS 系统利用遍布北美和夏威夷的地面参考站网 (Wide-area Reference Station, 简称 WRS) 采集 GPS 信号并传送给主控站 (Wide-area Master Station, 简称 WMS)。主控站经过计算得出差分改正 (Deviation Correction, 简称 DC) 并及时将改正信息经地球站传送给 WAAS 地球同步卫星。最后由地球同步卫星将信息播发给用户, 使用接收到的改正信息用户就可以精确计算自己的位置。

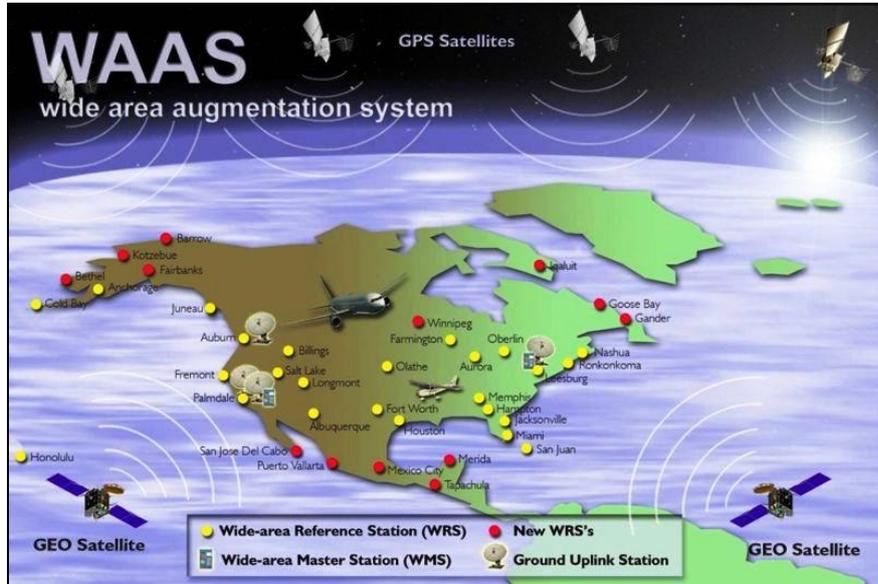


图 4.1 美国 WAAS 系统

国际民航组织将这一类的系统称为星基增强系统 SBAS (Satellite Based Augmentation Systems), 而 GPS 生产厂家通常称之为星站差分系统, 本章的讨论中也将采用这种提法。除美国的 WAAS 外, 欧洲和亚洲也都发展了自己的星基增强系统, 比如欧洲的 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), 日本的 MSAS (Multi functional Satellite Augmentation System) 以及印度的 GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation)。目前比较成熟的商用 SBAS 系统有美国的 NavCom 公司建立的 StarFire 网络和美国 Trimble 公司的 OmniStar 网络, 均可以覆盖全球南北纬 76° 范围, 提供精度分米级的有偿服务。

4.1.2.2 工作方式

WAAS 的主要工作方式是将主控站所算得的广域差分改正信息，通过地球站传输至地球同步卫星，该同步卫星以 GPS 的 L1 频率为载波，将上述差分改正信息当作 GPS 导航电文转发给用户站。它的技术特点是：（1）由于数据传输链所采用的载波频率和 GPS 卫星的信号一致，因此用户 GPS 接收机可以直接接收到 WAAS 中的差分改正信息而无需外加通信链。（2）同步卫星信号的实时传输能力强，而且可覆盖很大的区域，从而较好的解决了主控站与播发站，播发站与用户站之间数据传输问题。（3）若在 WAAS 中要求同步卫星所传输的信号不仅仅是差分改正信息，而且还包括 C/A 码和同步卫星星历，则这一同步卫星就成为空基的“伪”卫星，相当于增加了卫星测距源，因而用户的定位精度和可靠性都要高于 WADGPS 系统。

4.1.2.3 应用案例

系统：StarFire RTG (Real Time GIPSY 实时 GIPSY) 是美国 NavCom 公司在 WCT (Wide-Area Correction Transform) 基础上，应用 JPL 的实时修正算法和 GIPSY 软件，建立的全球差分定位服务系统。可适应各种环境，无需基准站，无需地面通讯数据链，并具有多种模式和特有的用途。

案例：

交通部长江航道测量中心

使用 StarFire 星站差分功能的 SF2050 型接收机，武汉市沌口至青山长江两岸大堤上，两个 D 级 GPS 点相距 20 多公里，比对结果分别为 $\Delta S=0.154$ 、 $\Delta S=0.106$ 米，与仪器标称的精度基本一致。

2004 年 12 月，利用 SF2050 型接收机应用到安徽省安庆市长江下游东流水道的航道整治工程，对水下沉排探摸船及水下摄影进行了精确定位。

2005 年 2 月，在湖北省嘉鱼县长江陆溪口水道，为航道整治工程进行了施工设计测量，测绘比例尺分别为 1:5 千、1:2 千的地形图。

2005 年 4 月，在江西省九江市境内长江张南水道，为航道整治工程进行了工程竣工验收测量，使用星站差分技术与德国 ATLAS FS-20 型多波束扫测系统对整治工程的丁坝群进行扫测，获得了非常好的效果

4.2 星站差分应用研究

4.2.1 OmniStar 星站差分系统

4.2.1.1 星站差分系统组成

OmniStar 最初是由 Fugro 公司开发和运营的一套可以覆盖全球的高精度星

站差分 GPS 系统，通过卫星提供 GPS 差分改正数据服务。2011 年 4 月被 Trimble 公司收购。该系统通过分布在世界各地的 70 个地面参考站点来测定 GPS 系统的误差，由分别位于美国、欧洲和澳大利亚的 3 个控制中心站对各参考站点的数据进行分析和处理，并将经分析确认后的差分改正数据通过同步卫星广播给用户，实现高精度的实时定位。OmniStar 提供测量、定位、环境和包括陆地和近海的卫星服务。在陆地应用方面 OmniStar 服务可以满足精密定位系统的需求，提供实时的差分定位服务。

整个系统可分为三部分：地面部分（参考站、数据处理中心和注入站）、地球同步卫星（INMARSAT）和用户端。

（1）地面部分：遍布全球的由双频 GPS 接收机组成的参考站网络，连续接收来自于 GPS 卫星的信号，参考站获得的数据被送到数据处理中心，经过处理以后生成差分的改正数据，差分改正数据通过数据通讯链路传送到卫星注入站并上传至 INMARSAT 同步卫星，发布给用户。

（2）空间部分：由地球同步卫星（INMARSAT）组成，主要是转发地面监测站生成的差分改正信号，迅速传输给用户端。

（3）用户端：用户端的 GPS 接收机有两个接收部分，一个是 GPS 接收机，一个是 L 波段的通信接收器，GPS 接收机跟踪所有可见的卫星然后获得 GPS 卫星的测量值，同时 L 波段的接收器通过 L 波段的卫星接收改正数据。接收机将所有基准站改正量进行加权处理优化后应用于 GPS 测量，就确定一个实时的高精度的点位坐标。

4.2.1.2 OmniStar 广域差分改正服务

OmniStar 拥有超过 100 个遍布全球的参考站，连续监测所有的 GPS 卫星信号，各参考站测量出视野内的全部卫星的误差并计算出改正量，并通过同步卫星迅速的发送给用户，可以消除绝大部分的误差。

OmniStar 公司提供三种不同精度的改正服务。VBS 服务提供的改正量数据是一种可以被所有接收机识别的 RTCM-104 的标准格式，可以为用户 GPS 测量提供亚米级的改正。HP 服务使用的是更加精密的参考站数据，而 XP 服务使用的则是与参考站点不相关的卫星轨道和钟差改正数据。

目前 OmniStar 公司提供的三种导航服务，95%置信度的定位精度为：

VBS 服务 水平精度：优于 1 m (3 ft)

XP 服务 水平精度：+/- 15 cm (3 ft)

HP 服务 水平精度：+/- 10 cm (2 ft)

垂直误差一般为水平误差的 2 到 2.5 倍。

系统基准：OmniStar 的 VBS 改正量在北美地区是基于 NAD83 基准的，在所有其他的地区基于 ITRF2000 系统。HP 和 XP 改正量在全球范围内都是基于 ITRF2000。根据不同厂家的设计，部分接收机具有转换和输入不同基准下的定位数据的功能。

OmniStar 差分改正服务可以覆盖全球从北纬 76 度到南纬 76 度之间的绝大部分陆地地区。公司目前共有 6 颗卫星用于陆地地区，发送广域差分改正信号。

4.2.2 OmniStar XP 实时单点定位测试

4.2.2.1 实验准备：

1) 用户接收机

实验所选用的是 Trimble®公司双频接收机 DSM 232 型，该型号可以同时接收 GPS 卫星信号和多种信标信号。可以使用 OmniStar XP/HP 卫星改正服务。GPS 天线可以从多种数据改正源接收改正信号，支持输出 NMEA-0183 或者 NMEA2000。通过串口可以使用 Trimble Standard Interface Protocol (TSIP) 来设置、控制和输出数据。DSM 232 接收机可以以 10Hz 的速率输出位置报告数据。

2) 数据采集方法

通过 RS232 接口与微机相连，通过超级终端程序接收实时的定位结果。存贮为文本格式。试验使用的数据记录格式为 NMEA-0183 的 GGA，主要包含时间、位置、固定等相关数据。

GGA 信息数据格式如下所示：

```
$GPGGA,062518.00,3956.80134749,N,11618.00870946,E,2,7,1.4,49.057,M,-6.590,M,9.0,0100*5D
```

各字段的含义：

[1] 位置固定的 UTC 时间，格式为 hhmmss（时分秒）

[2] 纬度，格式为 ddmm.mmmmmmmm（度分），前面以 0 补位

[3] 纬度方向：N-北，S-南

[4] 经度，格式为 dddmm.mmmmmmmm（度分），前面以 0 补位

[5] 经度方向，E-东，W-西

[6] GPS 质量指示器：0-固定无效，1-GPS 固定，2-差分 GPS 固定，4-实时动态、固定整数，5-实时动态、浮动整数

[7] 在用的卫星数量，00 到 12

[8] HDOP 水平精度因子

[9] 米制高度（平均海水面参考）

[10] M: 高度测量单位-米

[11] 地球椭球面相对大地水准面的高度

[12] M: 高度测量单位-米

[13] 差分 GPS 数据记录时限（从最近一次接收到差分信号开始的秒数，如果不是差分定位将为空）

[14] 差分参考站 ID，0000 到 1023。当选择了参考站 ID 却没有接收到改正时，为空

[15] 校验字，跟在参考站 ID 后用*分隔

3) 测试方案

将 DSM232 双频接收机安置在固定点上进行了静态实时单点定位，设置为 OmniStar XP 差分信号改正模式。原始定位数据采用 GGA 格式文本记录。

将每一组的所有位置坐标分别求取平均值作为真值，计算出各组的每一个位置坐标与真值的较差。对差值进行分布统计，以评价定位精度是否达到标称精度。

4.2.2.2 实验观测数据分析

实验观测在两地共采集了三组数据（利比亚 2 组，北京 1 组），并进行了分析，主要为了研究该 OmniStar 的 XP 差分改正服务的定位精度水平和可靠性，以确认该方法和设备的可用性。

1) 实验观测 1:

观测时段为 2007 年 12 月 30 日 23: 36: 50 至次日 7: 49: 21 总计 8:12:31，其中

23: 36: 50 至 01: 08: 40 采用 2 秒采样率，次日 01: 08: 41 至 7: 49: 21 采用 5 秒采样率记录，总共记录 7565 条 GGA 格式位置信息。

表 4.1 观测值与均值的较差数量统计

>	Easting	%	Northing	%	Hor. Err.	%	Elevation	%
0.000	7206	95.25	6126	80.98	5726	75.69	5319	70.31
0.050	359	4.75	1301	17.20	1839	24.31	1927	25.47
0.100	0	0.00	138	1.82	219	2.89	291	3.85
0.150	0	0.00	0	0.00	1	0.01	28	0.37
Max Error	0.078	/	0.142	/	0.153		0.200	/

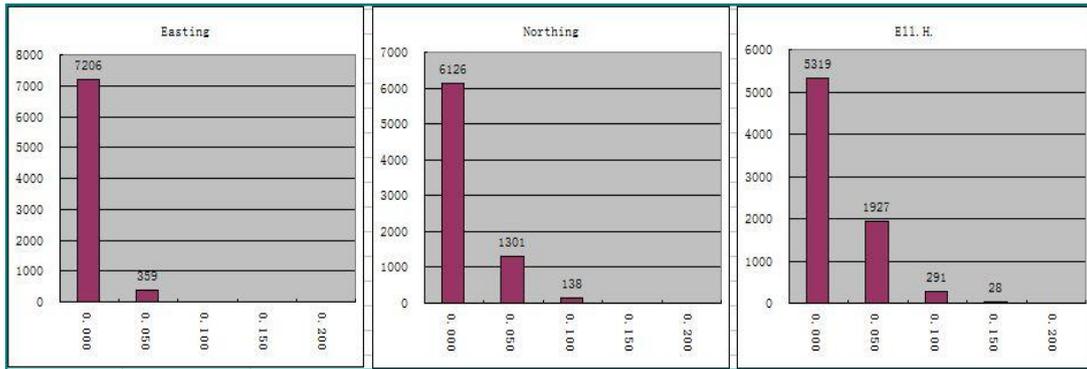


图 4.2 各分量的误差分布统计

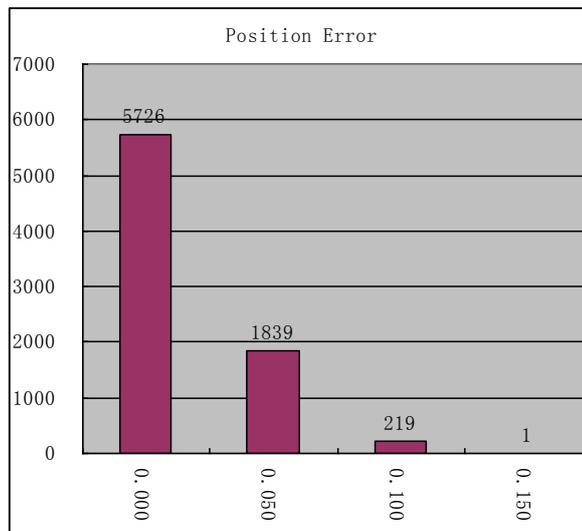


图 4.3 平面位置误差统计

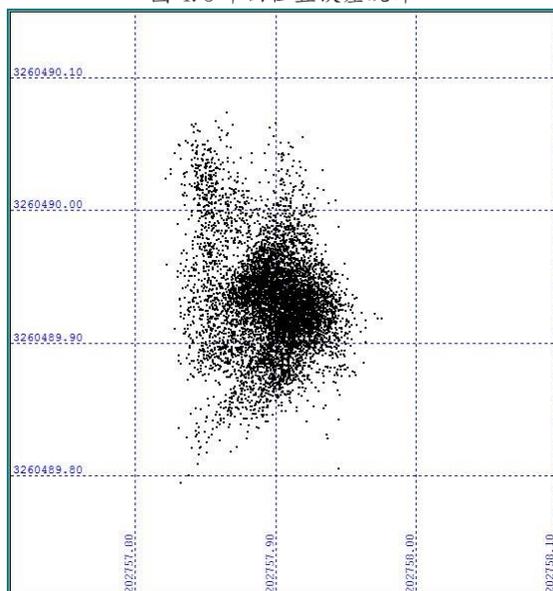


图 4.4 平面位置图

结果分析:

表 4.1: 各观测值与均值的差值数量统计和所占比例。其中平面位置大于 0.15m 的观测值为 1 个, 小于 0.01%, 高程较差最大为 0.20m, 全部小于 2 倍的中误差 (水平 0.20m 和垂直 0.30m)。

图 4.2 分别为在东坐标、北坐标和椭球高方向上的差值统计。图 4.3 为平面较差的分布统计。图 4.4 为观测值的平面位置图, 格网为 0.10m。图 4.5、4.6、4.7 是差值在东、北、高三个方向上的分布情况。

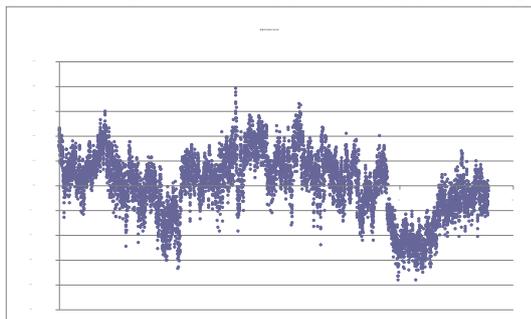


图 4.5 差值在东坐标方向分布

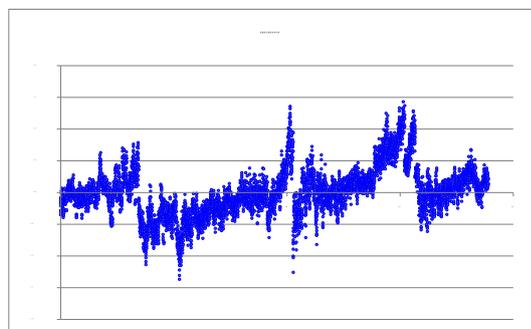


图 4.6 差值在北坐标方向分布

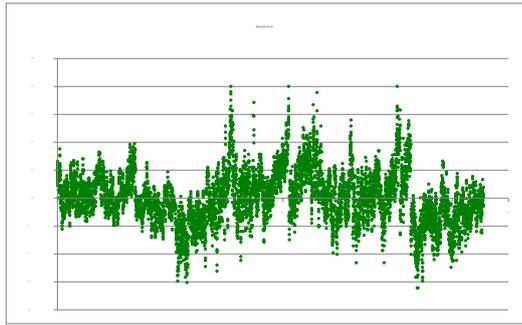


图 4.7 差值在垂直方向分布

2) 实验观测 2

观测时段为 2007 年 12 月 31 日 19: 06: 06 至 22: 36: 16, 总计 3:30:10, 采用 5 秒采样率, 总共记录 2499 条 GGA 格式位置信息。

表 4.2: 观测值与均值的较差数量统计

>	Easting	%	Northing	%	Hor. Err.	%	Elevation	%
0	2104	84.19	2407	96.32	1922	76.91	1015	40.62
0.05	324	12.97	91	3.64	502	20.09	963	38.54
0.1	67	2.68	1	0.04	71	2.84	323	12.93
0.15	4	0.16		0	4	0.16	131	5.24
0.2							52	2.08
0.25							13	0.52
0.3							2	0.08
Max Error	0.16		0.11		0.16		0.33	

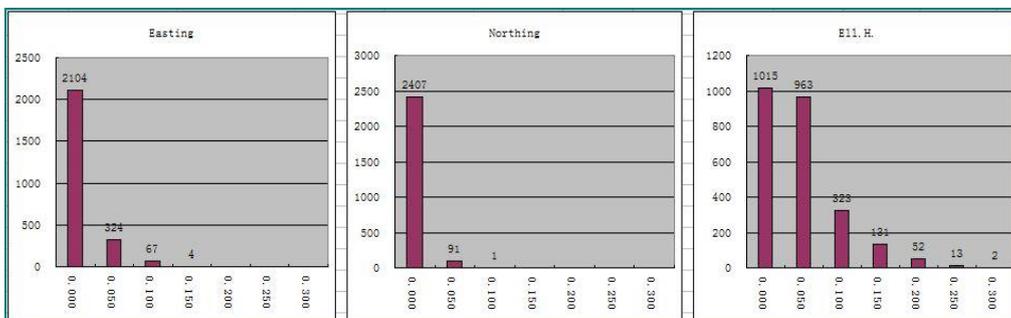


图 4.8 差值在各方向上的统计

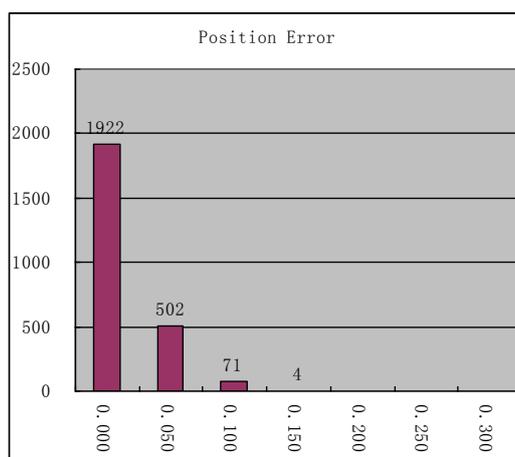


图 4.9 平面差值分布统计

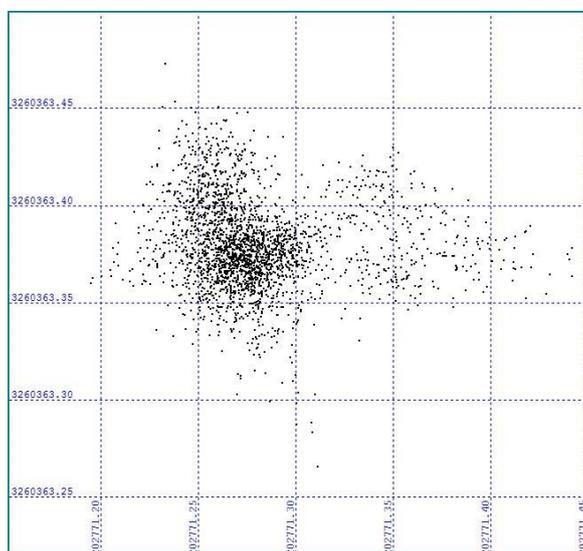


图 4.10 平面位置散点分布图

结果分析:

表 4.2 为各位置坐标与均值的差值数量统计及其所占比例。其中平面位置较差大于 0.15m 的观测值为 4 个，占 0.16%。高程较差最大为 0.33 米，99.92% 小于 2 倍的中误差 (0.30m)。

综合图 4.8 的东坐标、北坐标和椭球高方向上的差值统计图表、图(4.9)的平面差值分布统计和图 4.10 网格为 0.05 米的平面位置离散图，可以表明 OmniStar XP 具有很高的定位精度，完全满足标称的水平 15cm 和垂直 30cm 误差水平。

3) 实验观测 3

北京采集的 OmniSTAR 数据和分析

2008 年 3 月 28 日，测试在北京市海淀区城区进行，采用 1 秒采样率，共记录 39693 个位置数据。测试 OmniStar XP 服务在不同区域、不同环境的可靠性。

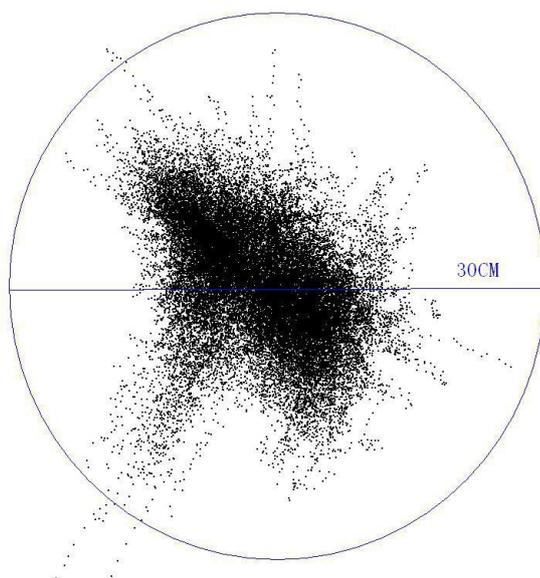


图 4.11 平面位置收敛情况

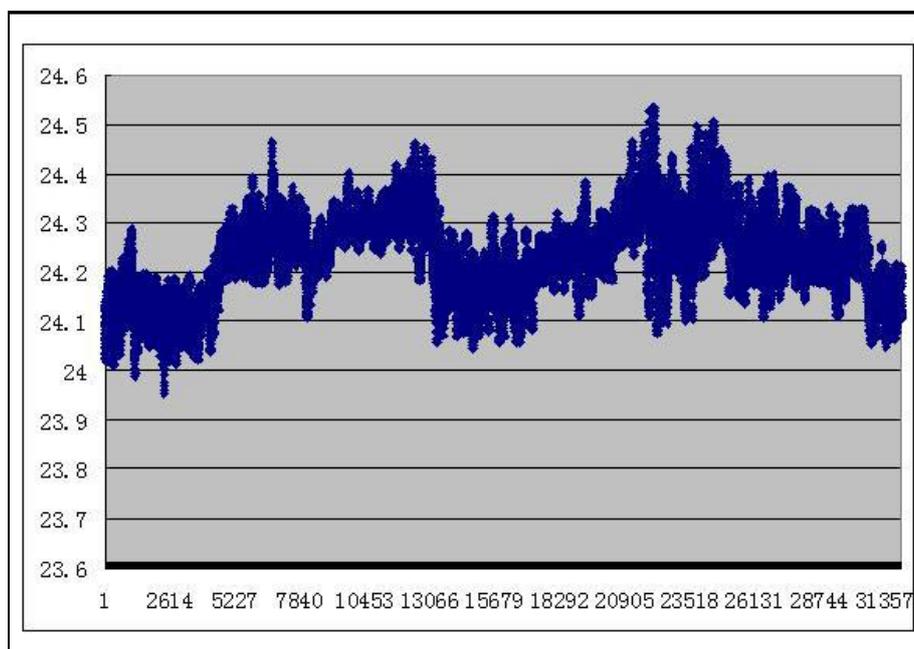


图 4.12 高程收敛情况

结果分析:

通过对北京城区采集数据进行分析,可得出这样的结论:

(1) 在成果重复性、稳定性测试方面,相对于均值,99.84%的水平误差小于 ± 15 厘米的标称精度,99.92%的垂直误差小于 ± 30 厘米的标称精度,达到了标称的95%的置信水平,具有很高的可靠性。完全可以满足地震勘探对测量的精度要求。

(2) 从数据分析可以看出,北京市城区采集的数据高程方面有明显的干扰。

综合以上两地三组测试数据,可以得出这样的结论:OmniStar XP 差分服务,①位置误差在特定时段内存在一定的方向性。②平面精度可以达到标称的 ± 15 厘米,垂直精度优于标称的2倍平面精度。

在离 OmniStar 参考基站较远的地区,如中国西北、中亚地区和俄罗斯,如果使用这项目技术还得做进一步和论证。

4) 实验观测 4

测试目的: 检验 OmniStar 差分系统的基准与 ITRF2000 框架的符合性

OmniStar 在美国之外提供的参考站的差分改正值都是基于 ITRF2000 基准的,ITRF2000 与 GPS 所采用的 1984 世界椭球只有微小的差别,一般情况可以忽略不计。假设使用 OmniStar XP 差分改正服务得到的定位成果与 ITRF2000 具有很好的符合性,那么就可以考虑通过这种方法的长时间观测求均值方法取得未知点的 ITRF2000 成果,这样可以提高控制网建网速度,控制成本。

测试方案:

选取一测试站点,进行 24 小时的静态观测,与 IGS 跟踪站联测得到精确的 ITRF2000 坐标。在同一个点上进行几个小时的连续 OmniStar XP 星站差分定位观测,求取平均位置。比较两种观测方法的差值,以确定星站差分的精度是否在接受的范围,是否可用于获得高精度 WGS84 成果。

测试结果分析:

IGS 联测: GPS 静态观测,15 秒采样率,15 度截止高度角。数据处理使用澳大利亚在线 GPS 数据处理服务 (AUSPOS)。处理信息和结果如下:

表 4.3: 观测信息

User File	Antenna Type	Antenna Height (m)	Start Time	End Time
01210010.08o	LEIAX1202GG NONE	0.0000	2008/1/1 5:51	2008/1/2 7:12

表 4.4: 参考站信息

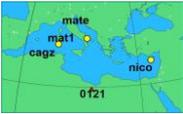
Date	IGS Data	User Data	Orbit Type	
2008-01-01	Mate cagz nico	0121	IGS Rapid	
2008-01-02	Mate mate cagz	0121	IGS Rapid	

表 4.5: 计算结果及 RMS

	Latitude (DMS)	Longitude (DMS)	Ellipsoidal Height (m)	Above-Geoid Height (m)
Mate	40 38 56.8753	16 42 16.0570	535.651	490.025
Nico	35 8 27.5517	33 23 47.2076	190.015	162.019
Cagz	39 8 9.2046	8 58 21.9329	237.971	191.410
0121	29 26 14.8949	17 56 10.0894	353.155	324.473
0121	0.003m	0.004m	0.034m	RMS

星站差分定位观测：采用 5 秒采样率，记录 3 小时 30 分，共获取 2499 个位置坐标。分析结果见表 4.6、图 4.13、4.14、4.15。

表 4.6: 星站差分数据误差统计表

>	Easting	%	Northing	%	Hor. Err.	%	Elevation	%
0	1613	64.55	2283	91.36	1275	51.02	551	22.05
0.05	859	34.37	215	8.6	1178	47.14	1261	50.46
0.10	27	1.08	1	0.04	46	1.84	459	18.37
0.15	0	0	0	0		0	126	5.04
0.20	0						61	2.44
0.25							30	1.2
0.30							11	0.44
Max Error	0.129		0.109		0.135		0.366	

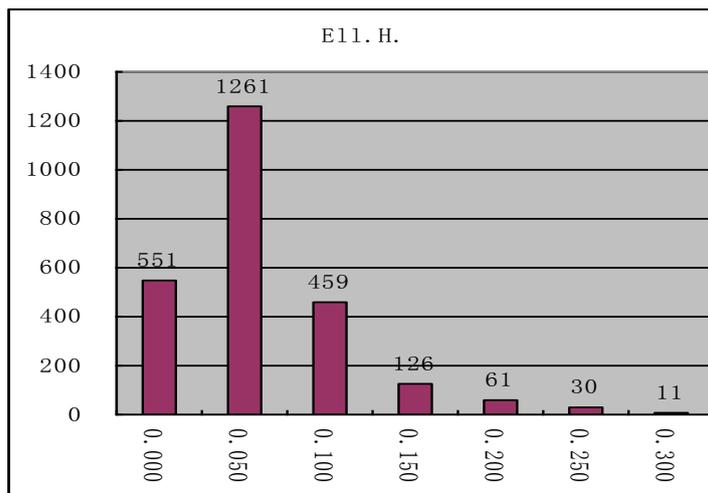


图 4.13 高程误差统计

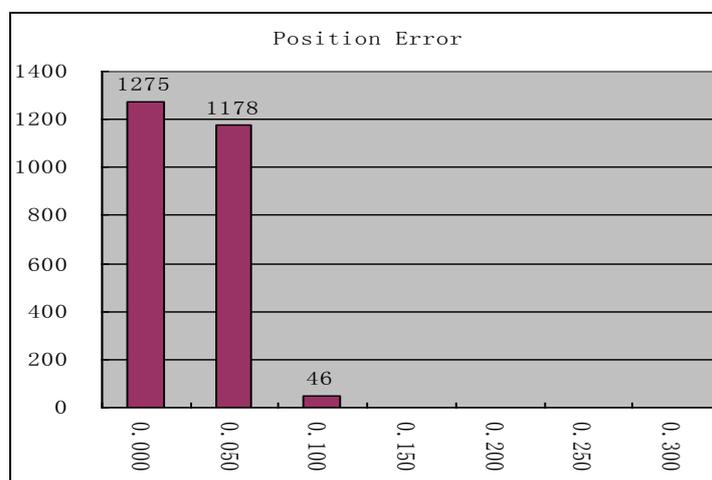


图 4.14 平面误差统计

表 4.6 为基站差分单点定位结果相对于 IGS 联测结果为真值的误差分布统计，平面最大为 0.135 米，高程最大为 0.366 米。图 4.13、4.14 为高程和平面误差分布统计。结果表明基站差分单点定位精度无法满足获得精确 WGS1984 起算坐标的要求。图 4.15 为基站差分单点定位结果的分段（360 个记录为一个段）均值与 IGS 联测结果的差值比较，可以看出第一的均值和第二段的均值由于初始化成功后初期，误差较大，所以均值的误差也较大；以后的每个段均值都小于 3cm，完全可以满足起算坐标的精度。

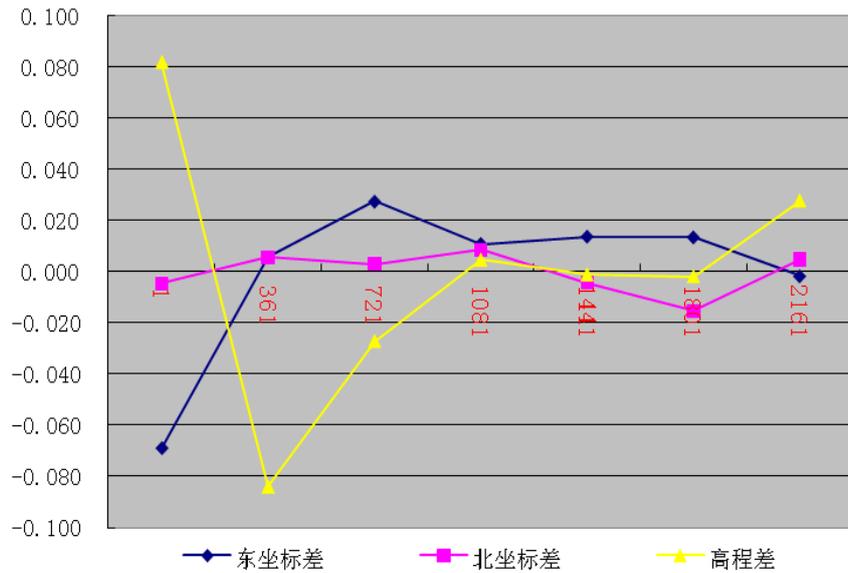


图 4.15 差分单点定位坐标与 IGS 联测结果分段比较

表 4.7 : IGS 联测结果与星站差分结果均值比较

测量方法	东坐标 m	北坐标 m	椭球高 m	平面 m
星站差分均值	202771.281	3260363.379	353.195	
与 IGS 静态联测	202771.313	3260363.364	353.155	
较差	-0.032	0.015	0.040	0.035

表 4.7 中的星差分均值为所有观测数据的均值，比较结果可以看出 3 个多小时的星站差分静态单点定位坐标均值与 IGS 联测坐标的平面和椭球高比较差值均优于 5cm。

结合图 4.15 可以得出这样的结论：

(1) 采样率小于 5 秒，观测时长 1 小时以上星站差分静态单点定位坐标的均值在平面和高程方向均优于 5cm，精度水平完全可以达到石油勘探测量起算点的精度要求，因此这种办法可以考虑在无 WGS84 起算点地区，作为快速得到精确的 WGS84 坐标的一个途径。

(2) 此时，星站差分静态单点定位采样率应该不大于 5 秒，用于计算平均位置的观测记录，应该是接收机初始化成功、坐标稳定后的观测记录。这里建议选取观测开始 1 小时以后的记录参与计算。

4.3.3 移动基准站测试

移动基准站，指的是在进行载波相位相对定位时，将基准站也设置在运动的载体上。用户定位是通过解算其到移动基准站的相对位置来获得，也被称为移动基准站 GPS 载波相位差分技术。

由于 Trimble DSM232 没有移动基准站 (Moving Base) 功能，还有本身作为基准站要求参考点坐标差值的限制 (参考点的已知坐标与准确 WGS84 坐标差值不得大于 5 米)，移动基准站测试研究的 GPS 接收机采用 Trimble SPS551 进行。

2008 年 4 月 23 日，北京通县郊区，OmniStar 经 SPS551 转发差分信号给流动站，流动站以 RTK 方式接收，流动站做静态单点定位。

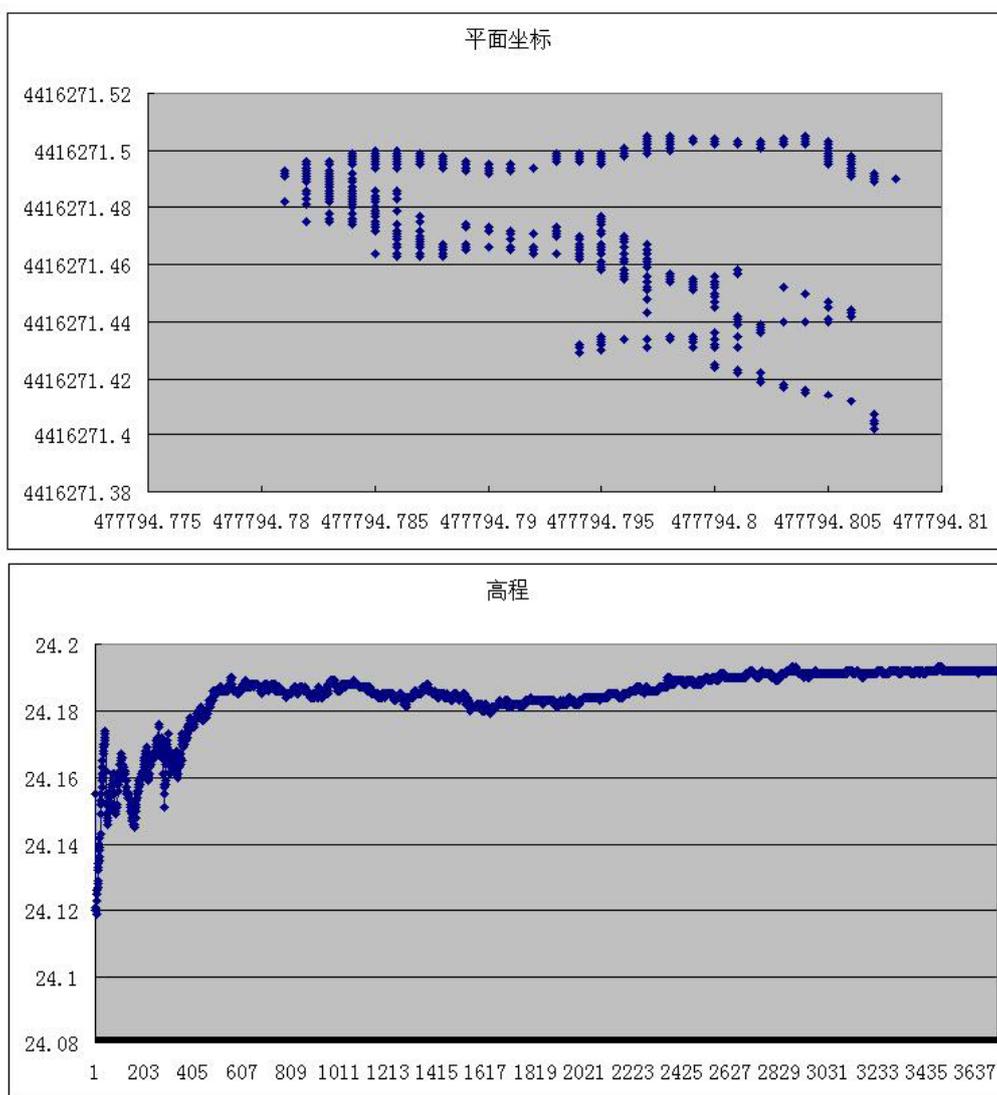


图 4.16 流动站数据情况

由图 4.16 可以看出，流动站使用移动基准站发送的差分改正信号计算出的位置相互最大差值东坐标小于 5cm，北坐标小于 11cm，高程小 10cm，收敛精度

要好于 OminiStar XP 本身的精度，这与厂家提供理论参考相符。

移动基准站测试也发现了一些问题，在 2008 年 4 月 23 日做移动基站测试过程中出现一次数据丢失情况。在后面的测试中又出现了相同的情况，说明仪器的运行还不足够稳定。

```
$GPGGA, 012750.00, 3953.77344528, N, 11644.41536171, E, 4, 10, 0.8, 24.187, M, -4.734, M, 0.0, 0000*6A
$GPGGA, 012751.00, 3953.77344527, N, 11644.41536172, E, 4, 10, 0.8, 24.187, M, -4.734, M, 0.0, 0000*67
$GPGGA, 012754.50, 3953.77382806, N, 11644.41589330, E, 1, 10, 0.8, 23.340, M, -4.734, M, , *46
$GPGGA, 012757.00, 3953.77344520, N, 11644.41536183, E, 4, 10, 0.8, 24.186, M, -4.734, M, 0.0, 0000*69
```

红颜色标记的数据，为单机固定解数据，说明差分信号丢失，数据偏移 1 米左右。针对这个问题，分析原因做了以下几个方案的测试：

1) 改变差分信号输出频率

因为当输出频率为 10Hz 时，传输数据量较大，因此将基准站输出频率从 10Hz 改为 5Hz 发送。5Hz 是 Trimble 为了解决客户遇到的问题在新版本里增加的选项，但结果还有数据丢失现象。

2) 改变电台设置

基准站数据丢失还有一个可能原因是数据链电台传输问题，所以将电台空中传送速率从 19200 改为 9600。但测试中还有数据丢失现象。

移动基准站实验结论：

(1) 精度方面，当差分改正信号正常发送时，移动基准站方法的定位精度可以达到平面 10cm，高程 10cm。说明定位精度是可以满足物探测量的精度要求的。

(2) 移动基准站设备工作不够稳定。当卫星变换时基准站发生差分数据丢失情况，进而造成流动站定位结果错误。通过反复测试和大量的数据分析，产生的问题与移动基准站 (Trimble SPS551) 本身固化软件算法的缺陷有关，并已得到 Trimble 公司工程师测试证实。因此相关的测试和应用有待进一步进行。

4.3 施工质量控制

为了保证星站差分精密单点定位方法在生产应用中的精度和质量,根据测试实验结果,结合星站差分系统内部检查与外部检查的方法可以起到有效质量监控作用。

4.3.1 内部检查

大量的实测数据表明 OmniStar 星站差分精密单点定位服务具有很好的稳定性和定位精度,因此可以认为不同的历元定位结果之间进行相互检核是可靠的。从而在实际的生产中,可以通过在单一点上的多次观测,来保证定位成果的精度和正确。

依据这些理论我们设计了这样的操作办法:

- (1) 生产中接收机使用不大于 1HZ 的更新率,以保证有效的数据质量监控。
- (2) 记录每一次定位结果,单一点位上定位至少记录 5 个位置成果,位置成果间较差小于 10cm,取平均值作为最终结果。如果单一点位上的位置成果之间比较差值大于该限差,应该重新观测。
- (3) 在测区附近使用监测站。使用与流动站相同的设备,在施工地点(<10km)范围内设置监测站,实时监测卫星数据、DOP 值等。采用固定点观测、均值比较的方法,及时发现差分改正信号的错误。
- (4) 每天分析当天的监测站数据,以及各项卫星相关参数,选取重复观测检核点。复测结果应该小于 2 倍的中误差。

4.3.2 外部检查

除了 OmniStar 系统自身的检查以外,还应该采取独立的检查手段。因此,RTK 和相对静态作为已经成熟和广泛使用的 GPS 作业方法,是一个容易操作和可靠的检查手段。

主要有两个检查项目:

- (1) 施工前及施工中的已知点检查。在施工前,按照一定的密度设计、建立检查点,位置成果使用快速静态或静态方法取得。检查点为临时点,不要求长期保存,施工期内可用即可。每日施工前、施工中按一定的时间间隔在已知点上进行检查。限差按照标称中误差执行。
- (2) RTK 抽检。为避免出现由于卫星状况差或是信号干扰原因造成的系统误差,施工中使用 RTK 方法、按一定密度取样抽检。平面限差按 2 倍中误差(原因在于石油物探测量中物理点标志水平放置准确度要低于高程,因此放宽一倍),

高程按 1 倍中误差执行。

5 结论与展望

星站差分精密单点定位和在线 GPS 数据处理,属于目前最为高效的精密单机定位方法。本文详细地对在线 GPS 数据处理服务进行了介绍,经过大量的实验数据分析,对该方法的精度和可靠性进行了评估,并提出了切实可行的质量控制方法。论文得出了如下结论:

(1) 所介绍的几种在线 GPS 数据处理系统计算结果可靠性高,能够提供 cm 级的处理成果,相互之间具有很好的一致性。

(2) 利用 IGS 精密星历和精密轨道参数,并使用精密算法的在线 GPS 数据处理服务,在长距离的基线处理中,获得了很高计算精度,达到几个厘米的级别。采取合理的质量控制方法的情况下,对于石油物探的控制测量是一种可靠而高效的数据处理方法,可以简便的获得高精度的 ITRF 框架下的坐标。值得推广应用。

(3) 精密单点定位技术,无论是事后处理方式,还是 SBAS 的实时差分改正方式都取得了很好的实际定位精度。事后长时段的精密单点定位方式计算精度可以达到几个厘米的水平,接收近于静态相对处理方法的精度水平,可以应用于石油物探的起算点测量处理,完全满足相应的精度要求。

(4) 星站差分实时单点定位方法的实验结果表明其误差优于其标称的水平 15cm,垂直 30cm 的精度指标,对于日常的石油物探测量来说,完全满足精度。通过采用均值比较的方法,验证了在长时间观测中,星站差分实时单点定位结果具有足够的稳定性和准确度。

(5) 星站差分静态单点定位结果均值与在线 GPS 数据处理系统采用静态相对定位方法的计算结果的差值在几个厘米的水平(优于 5cm)。这完全可以满足石油物探测量对起算点 WGS84 坐标的精度要求,可以作为起算坐标使用。而且相对于在线 GPS 数据处理方法,不需要网络支持。可以直接获得成果,速度更快。

最后,星站差分精密单点定位技术作为测量领域的前沿课题,涉及很多测量、微波、数学、计算机科学等多门学科,实践应用还需要作相当多的努力和大量的工作,还有许多的工作值得进一步研究。

参考文献

- [1] Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J], Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 5005-5017
- [2] 李征航, 张小红, 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M], 武汉: 武汉大学出版社, 2009. 10
- [3] 张小红, 多媒体讲稿-精密单点定位原理[ED/OL]: 百度文库, 2010
- [4] 张小红, 多媒体讲稿-精密单点定位软件及应用[ED/OL]: 百度文库, 2010
- [5] 韦建超, GPS 精密单点定位的数据处理研究[D], 湖南: 中南大学, 2007
- [6] IGS Products [ED/OL], <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, 2009
- [7] 易重海, 朱建军等, 一种改进的高采样率卫星钟差求解方法[J], 大地测量与地球动力学, 2010年12月, 第30卷第6期
- [8] Heroux P, Kouba J, Collins P, GPS Carrier-phase Point Positioning with Precise Orbit Products. The International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy[J], Geomatics and Navigation, Calgary, 2001
- [9] 李天文, GPS 原理及应用[M], 北京: 科学出版社, 2003, 92
- [10] 董鸿闻等, 地理空间定位基准及其应用[M], 北京: 测绘出版社, 2004. 10
- [11] Zuheir Altamimi, ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame[J], Journal of Geodesy, 2011, Volume 85, Number 8, 457-473
- [12] 李黎, 戴吾蛟等, AUSPOS 在线定位系统研究分析[J], 全球定位系统, 2008年第33卷第5期
- [13] John Dawson, Ramesh G. and John M., Complete - AUSPOS System Description[ED/OL], http://www-b.ga.gov.au/image_cache/GA5057.pdf, 2001
- [14] Complete - AUSPOS Online GPS Processing Report Sample[ED/OL], http://www.ga.gov.au/image_cache/GA5058.pdf, 2001
- [15] <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/about.jsp>, About OPUS[ED/OL]
- [16] <http://www.geod.nrcan.gc.ca/userguide/pdf/howtouse.pdf>,

On-Line Precise Point Positioning Project-How To Use Document[ED/OL]

[17] 刘经南, 陈俊勇等, 广域差分 GPS 原理和方法[M], 北京: 测绘出版社, 1998. 11

致 谢

本文是在黄劲松副教授的悉心指导下完成的，导师精湛的学术造诣，敏锐的学术洞察力，严谨的治学作风和精益求精的工作精神，无不给予我深深的影响，并将令我受益终生。值此论文完成之际，向导师致以深深的敬意，表达衷心的感谢。

感谢易昌华、畅毅、李秀山等专家老师的无私的指导帮助和热情的关怀。

感谢张继兴总经理、李永海副总工程师、肖远亮总经理在实验研究中，给予的无私指导和协助，他们不仅设备、人员上大力支持，在同他们讨论的过程中，得到了许多的有益的见解和建议，丰富了我实验方法理论，拓展了我的写作思路。

感谢东方地球物理公司测量服务中心领导和同事对我学习、工作、生活的关心和帮助，让我体会到集体的温暖。

感谢一起工作的东方地球物理公司利比亚项目经理部的领导、同事对于我工作和学习的支持和帮助。

感谢研究生办公室的张群英老师多年来的无私的帮助。

感谢所有孜孜不倦地传授给我知识、无私奉献的老师们！

感谢武汉大学测绘学院 09 级工程硕士班的全体同窗们，难忘与大家一起度过了美好的时光。

感谢武汉大学测绘学院研究生院和测绘学院的各位领导对我在测绘学院学习期间的关怀和帮助。

谨以此文献给含辛茹苦养育我的父母亲，也感谢妻子在背后始终如一的支持和奉献！

向所有给予我关心和帮助的领导、老师、同学和朋友们表示深深的谢意！