

第五篇

GPS 全球定位系统技术 在测绘中的应用

第一章 概述

第一节 GPS 全球定位系统概述

二十世纪五十年代末,原苏联发射了人类的第一颗人造地球卫星,美国科学家在对其的跟踪研究中,发现了多普勒频移现象,并利用该原理促成了多普勒卫星导航定位系统 TRANSIT 的建成,在军事和民用方面取得了极大的成功,是导航定位史上的一次飞跃,我国也曾引进了多台多普勒接收机,应用于海岛联测、地球勘探等领域。但由于多普勒卫星轨道高度低、信号载波频率低,轨道精度难以提高,使得定位精度较低,难以满足大地测量或工程测量的要求,更不可能用于天文地球动力学研究。为了提高卫星定位的精度,美国从 1973 年开始筹建全球定位系统 GPS (Global Positioning System)。在经过了方案论证、系统试验阶段后,于 1989 年开始发射正式工作卫星,并于 1994 年全部建成并投入使用。GPS 系统的空间部分由 21 颗卫星组成,均匀分布在 6 个轨道面上,地面高度为 20000 余公里,轨道倾角为 55 度,扁心率约为 0,周期约为 12 小时,卫星向地面发射两个波段的载波信号,载波信号频率分别为 1575.442 兆赫兹 (L1 波段) 和 1227.6 兆赫兹 (L2 波段),卫星上安装了精度很高的原子钟,以确保频率的稳定性,在载波上调制有表示卫星位置的广播星历,用于测距的 C/A 码和 P 码,以及其它系统信息,能在全球范围内,向任意多用户提供高精度的、全天候的、连续的、实时的三维测速、三维定位和授时。

GPS 系统的控制部分由设在美国本土的 5 个监控站组成,这些站不间断地对 GPS 卫星进行观测,并将计算和预报的信息由注入站对卫星信息更新。

GPS 系统的用户是非常隐蔽的,它是一种单程系统,用户只接收而不必发射信号,因此用户的数量也是不受限制的。虽然 GPS 系统一开始是为军事目的而建立的,但很快在民用方面得到了极大的发展,各类 GPS 接收机和处理软件纷纷涌现出来。目前在中国市场上出现的接收机主要有 ROGUE、ASHTECH、TRIMBLE、IEICA、SOKKIA、TORCOF 等。能对两个频率进行观测的接收机称为双频接收机,只能对一个频率进行观测的接收机成为单频接收机,他们在精度和价格上均有较大区别。

对于测绘界的用户而言,GPS 已在测绘领域引起了革命性的变化,目前,范围上数公里至几千公里的控制网或形变监测网,精度上从百米至毫米级的定位,一般都将 GPS 作为首选手段,随着 RTK 技术的日趋成熟,GPS 已开始向分米乃至厘米级的放样、高

精度动态定位等领域渗透。

国际 GPS 大地测量和地球动力学服务 IGS 自 1992 年起,已在全球建立了多个数据存储及处理中心,和百余个常年观测的台站,我国也设立了上海佘山、武汉、西安、拉萨、台湾等多个常年观测台站,这些台站的观测数据每天通过 INTERNET 网传向美国的数据存储中心,IGS 还几乎实时地综合各数据处理中心的结果,并参予国际地球自转服务 IERS 的全球坐标参考系维护及地球自转参数的发布。使用者也可免费从因特网上取得观测数据及精密星历等产品。

GPS 系统的实时导航定位精度很高,美国在 1992 年起实行了所谓的 SA 政策,即降低广播星历中卫星位置的精度,降低星钟改正数的精度,对卫星基准频率加上高频的抖动(使伪距和相位的量测精度降低),后又实行了 A-S 政策,即将 P 码改变为 Y 码,即对精密伪距测量进一步限制,而美国军方和特许用户不受这些政策的影响,但美国为了获得更大的商业利益,这些政策终将被取消。

GPS 接收机可接收到可用于授时的准确至纳秒级的时间信息;用于预报未来几个月内卫星所处概略位置的预报星历;用于计算定位时所需卫星坐标的广播星历,精度为几米至几十米(各个卫星不同,随时变化);以及 GPS 系统信息,如卫星状况等。

GPS 接收机对码的量测就可得到卫星到接收机的距离,由于含有接收机卫星钟的误差及大气传播误差,故称为伪距。对 OA 码测得的伪距称为 UA 码伪距,精度约为 20 米左右,对 P 码测得的伪距称为 P 码伪距,精度约为 2 米左右。

GPS 接收机对收到的卫星信号,进行解码或采用其它技术,将调制在载波上的信息去掉后,就可以恢复载波。严格而言,载波相位应被称为载波拍频相位,它是收到的受多普勒频移影响的卫星信号载波相位与接收机本机振荡产生相号相位之差。一般在接收机钟确定的历元时刻量测,保持对卫星信号的跟踪,就可记录下相位的变化值,但开始观测时的接收机和卫星振荡器的相位初值是不知道的,起始历元的相位整数也是不知道的,即整周模糊度,只能在数据处理中作为参数解算。相位观测值的精度高至毫米,但前提是解出整周模糊度,因此只有在相对定位、并有一段连续观测值时才能使用相位观测值,而要达到优于米级的定位精度也只能采用相位观测值。

按定位方式,GPS 定位分为单点定位和相对定位(差分定位)。单点定位就是根据一台接收机的观测数据来确定接收机位置的方式,它只能采用伪距观测量,可用于车船等的概略导航定位。相对定位(差分定位)是根据两台以上接收机的观测数据来确定观测点之间的相对位置的方法,它既可采用伪距观测量也可采用相位观测量,大地测量或工程测量均应采用相位观测值进行相对定位。

在 GPS 观测量中包含了卫星和接收机的钟差、大气传播延迟、多路径效应等误差,在定位计算时还要受到卫星广播星历误差的影响,在进行相对定位时大部分公共误差被抵消或削弱,因此定位精度将大大提高,双频接收机可以根据两个频率的观测量抵消大气中电离层误差的主要部分,在精度要求高,接收机间距离较远的(大气有明显差别),应选用双频接收机。

在定位观测时,若接收机相对于地球表面运动,则称为动态定位,如用于车船等概

略导航定位的精度为 30 ~ 100 米的伪距单点定位, 或用于城市车辆导航定位的米级精度的伪距差分定位, 或用于测量放样等的厘米级的相位差分定位 (RTK), 实时差分定位需要数据链将两个或多个站的观测数据实时传输到一起计算。在定位观测时, 若接收机相对于地球表面静止, 则称为静态定位, 在进行控制网观测时, 一般均采用这种方式由几台接收机同时观测, 它能最大限度地发挥 GPS 的定位精度, 专用于这种目的的接收机被称为大地型接收机, 是接收机中性能最好的一类。目前, GPS 已经能够达到地壳形变观测的精度要求, IGS 的常年观测台站已经能构成毫米级的全球坐标框架。

第二节 GPS 系统的作用和影响

1973 年 12 月, 美国国防部批准它的陆海空三军联合研制一种新的军用卫星导航系统——NAVSTAR GPS, 我们称之为 GPS 卫星全球定位系统, 简称为 GPS 系统*。美国国防部还专门设立一个负责实施 GPS 计划的联合办公室, 它设在洛杉矶的空军航天处司令部内。该办公室的组成人员包括美国陆军、海军、海军陆战队、国防制图局、交通部、北大西洋公约组织和澳大利亚的代表。GPS 系统的全部投资为 300 亿美元, 计划分配在方案论证、工程研制和生产作业等三个研制阶段。工程研制阶段, 主要发射 GPS 试验性卫星, 检验 GPS 系统的基本性能, 为生产作业阶段发射 GPS 工作卫星作好全面的技术准备。1978 年 2 月 22 日, 第一颗 GPS 试验卫星的发射成功, 标志着工程研制阶段的开始, 1989 年 2 月 14 日, 第一颗 GPS 工作卫星的发射成功, 宣告 GPS 系统进入了生产作业阶段。表 5-1-1 列出了 GPS 试验卫星 (第一代) 和 GPS 工作卫星 (第二、三代) 的发展概况。按照目前的实施计划, 1993 年将发射第 24 颗 GPS 工作卫星, 从而建成由分布在 6 个轨道平面内的 (21+3) 颗 GPS 卫星组成的 GPS 工作星座。它和子午卫星星座的基本参数如表 5-1-2 所示。第三代 GPS 卫星 (BLOCK II R) 的外形如图 5-1-1 所示。图 5-1-2 表示两种星座的基本情况。

表 5-1-1 GPS 卫星的发射概况

名 称 代 别	卫星类型	卫星数量 (颗)	发射时间	用 途
第一代	BLOCK I	11	1978 ~ 1985	试验性
第二代	BLOCK II, BLOCK II A	28	1989 ~ 1994	正式工作
第三代	BLOCK II R	20	90 年代末	改进 GPS 系统

* 它的英文全称为 “Navigation by Satellite Timing And Ranging (NAVSTAR) Global Positioning System (GPS)”。由此可见, NAVSTAR 是五个英文单词的缩写, 直译为 “用卫星定时和测距进行导航”, 而不宜如某些中文书刊那样译作 “导航星”。为了简便, 我们采用的全称为 “GPS 卫星全球定位系统”。

表 5-1-2 GPS 卫星星座和子午卫星星座的基本参数

内 容 \ 名 称	TRANSIT	GPS
卫星数（颗）	6	21 + 3
轨道数（个）	6	6
卫星高度（公里）	1100	202000
运行周期（分钟）	107	720
载波频率（兆赫）	400 , 150	1575 , 1227

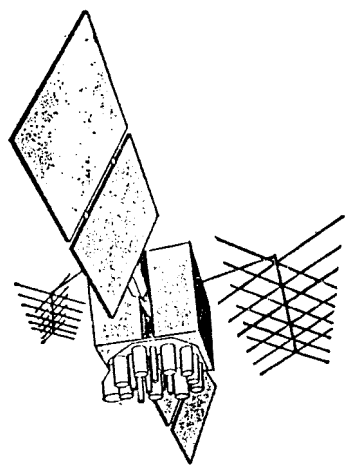


图 5-1-1 第三代 GPS 卫星

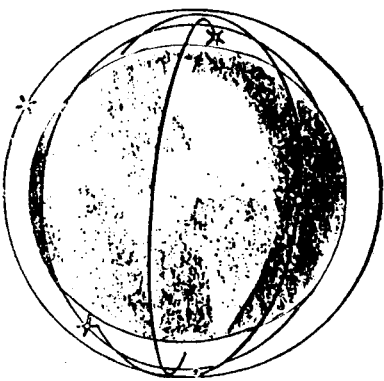


图 5-1-2 子午卫星（Transit）星座（拟于 1996 年 12 月停止使用）

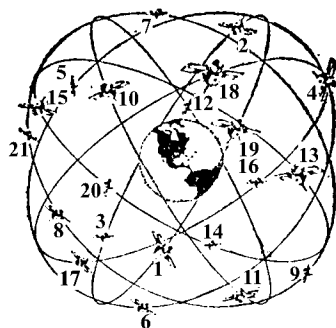


图 5-1-2 GPS 工作卫星星座 (拟于 1993 年建成)

在 GPS 系统设计之初,美国国防部的主要目的是使 GPS 系统能够在陆海空三个领域内提供实时、全天候和全球性的导航服务,并用于情报收集、核爆监测和应急通讯等一些军事目的。但是,对 GPS 试验卫星的应用开发表明,不仅 GPS 系统能够达到上述目的,而且用 GPS 卫星发送的导航定位信号(简称为 GPS 信号)能够进行厘米级甚至毫米级精度的静态定位,米级甚至亚米级精度的动态定位,亚米级甚至厘米级精度的速度测量和毫微秒级精度的时间测量。因此,GPS 系统展现了极其广泛的应用前景。

GPS 系统的广泛应用,不仅吸引着一些不同行业科学家们的热心研究和开发,而且激起了 GPS 信号接收机制造厂商们的激烈竞争。对于世界各国的广大用户而言,使用 GPS 信号的关键设备是能够接收、跟踪、变换和测量 GPS 信号的接收机,称之为 GPS 信号接收机。它已成为一些电子仪器厂家竞相生产的高技术电子产品。目前国际上约有 53 个厂家生产着 172 种用途广泛的 GPS 信号接收机,我国机械电子工业部第 20 研究所和深圳华达电子有限公司也研制成功了几种型号的导航接收机,步入了 GPS 信号接收机的制造行列。据报导,在 1991 年初春的海湾战争中,以美国为首的多国部队购买了 17000 台 GPS 信号接收机用于陆海空三军:其中 5000 台手持式 C/A 码商品接收机,8000 台轻小型接收机(亦叫助击器),4000 台军用接收机。他们使用后的结论是:GPS 是作战武器的效率倍增器,GPS 是赢得海湾战争胜利的重要技术条件之一。至于 GPS 信号接收机在民间的应用,则是一个难以用数字预测的广阔天地。有人预言,手表式的 GPS 信号接收机,将成为旅游者行进的忠实导游。由此可想而知,GPS 信号接收机将会何等广泛地应用于众多的行业。

早在 1983 年 3 月,在美国测绘学会第 43 届年会上,加拿大的 A.Chrzanowski 和 D.E.Wells 等几位学者便指出,GPS 系统的问世,将导致测绘行业一场深刻的技术革命。此后,又有几位学者提出了与之相似的见解。其根由何在?我们认为,可概括为下述几个方面。

一、用途广泛

近年来，对 GPS 卫星的应用开发表明，用 GPS 信号可以进行海空导航、车辆引行、导弹制导、精密定位、工程测量、动态观测、设备安装、时间传递、速度测量等。对于测绘行业而言，GPS 卫星定位技术已用于：①测量全球性的地球动态参数和全国性的大地测量控制网。例如，1991 年 1 月 22 日至 2 月 13 日开展的“地球自转和地球动力学国际首次 GPS 试验”，分布在世界各地的 124 测站参加了这次盛况空前的全球性地球动态参数测量试验，取得了令人兴奋的试验成果。②建立陆地海洋大地测量基准。例如，1990 年 3、4 月间，我国完成了南海 5 个岛礁 8 个点位和陆地上 4 个大地测量控制点之间的 GPS 联测，初步建立了陆地南海大地测量基准。这次 GPS 测量的站间距离远达 808687.519mm，这对于常规大地测量技术是无法实现的，只有依靠 GPS 卫星定位技术才能进行远达千余公里的海岛陆地联测定位，实现海洋国土的精确划界。③监测现代板块运动状态，捕获地震信息。④测定航空航天摄影瞬间的相机位置，甚至航片、卫片的姿态参数。例如，我国用 Trimble TANS 接收机的飞行试验表明，单点动态定位所测得的摄站坐标优于 10m。GPS 动态测量技术的进一步发展，将会导致无需地面大地测量控制点的大中小比例尺航测快速成图技术的兴起，将会导致地理信息系统、全球环境遥感监测和自然灾害遥感实时监测的技术革命。⑤进行工程建筑的设计、施工、验收和监测。例如，在斯坦福直线加速器的扩建工程中，采用 Macrometer V - 1000 GPS 信号接收机测量了 9 个工程控制点，经过联合平差的点位精度，水平位置达到了 $\pm 1.5\text{mm}$ 左右，高程精度约为 $\pm 2.5\text{mm}$ ，满足了扩建工程的急需。在欧洲、远东地区、澳大利亚、南美洲和整个北美洲的试验测量表明，GPS 卫星定位技术在工程测量中有着极其广阔的应用前景。

二、观测简便

怎样减少野外的作业时间和劳动强度，一直是测绘工作者苦心探索的重大课题，GPS 系统的问世，为解决这个问题开拓了广阔的途径。我们的实践表明，在用 Trimble 4000 SST 双频接收机进行定位测量时，测量员只要将天线单元准确地安设在测站上，接通电源，启动接收单元。在结束测量时，只需量测天线高度，关闭电源，收装接收机，便完成了野外数据采集任务。如果在一个测站上需要作较长时间的连续测量，还可实行无人值守的数据采集，而通过数据通讯方式，将所采集的 GPS 定位数据传递到数据处理中心，实现全自动化的 GPS 测量。

三、定位精度好

近年来，美国的试验表明，对于 3000km 以内的站间距离，GPS 相对定位数据经过

精细的处理，可达到 $\pm (5\text{mm} + 1 \times 10^{-8}D)$ 的距离 (D) 精度， $\pm 3\text{cm}$ 左右的三维位置精度。1990 年 5 月，我们用 Trimble 4000 SST 双频接收机测量了由 16 个点位构成的崇阳试验网，以检验 Trimble 4000 SST 的外部符合测量精度。试验结果表明，通过 GEOLAB 网平差的 GPS 点位与整体大地测量平差点位相比较，二维位置 (B, L) 的最大较差亦不过万分之三点七秒，最小较差为 $0.00000''$ ；正高的较差稍大一些，其最大值为 43.43mm ，其最小值为 1.9mm ，但未发现系统性的偏差。22 个 GPS 站间距离（平均长度为 1.9km ）与 ME-5000 光电测距边相比较，平均外部符合精度达到了三十一万分之一，且未发现系统偏差（如表 5-1-3 所示）。这充分说明，GPS 卫星定位测量能够得厘米级的点位精度。用 GPS 相对定位结果，还可推算出站间测线的方位角，其初步试验结果如表 5-1-4 所示。C/A 码的单点动态定位精度为 $\pm 40\text{m}$ 左右；P 码的单点动态定位精度约为 $\pm 20\text{m}$ ；C/A 码的差分动态定位精度在 $\pm 10\text{m}$ 以内；动态载波相位测量的定位精度可达到厘米级。对对动态用户而言，也可采用一定的精细测量方法，获得高精度的动态测量结果。国外学者预计，二十一世纪初叶，GPS 卫星定位精度可以达到毫米级，其详细情况如表 5-1-5 所示。由此可见，在未来的岁月，应用 GPS 卫星定位技术既可大为缩短数据采集时间，又可显著地提高定位精度。

表 5-1-3 GPS 测边和 ME-5000 光电测距的较差 (m)

边 名	长 度	ME-5000	GPS	较 差	外部符合精度
YS01—JC02	2256 +	0.1282	0.1256	+ 0.0026	1:80, 6000
YS01—GY03	2354 +	0.9192	0.9102	+ 0.0094	1:25, 0000
YS01—YJ04	2210 +	0.1426	0.1445	- 0.0019	1:116, 0000
YS01—ZX06	2041 +	0.8573	0.8561	+ 0.0012	1:170, 1000
YS01—JB08	1557 +	0.1078	0.1062	+ 0.0016	1:97, 3000
JC02—GY03	2522 +	0.9806	0.9694	+ 0.0112	1:22, 5000
JC02—YJ04	1957 +	0.6234	0.6149	+ 0.0085	1:23, 0000
GY03—YJ04	3918 +	0.7558	0.7298	+ 0.0260	1:15, 0000
GY03—DL05	1735 +	0.3587	0.3551	+ 0.0036	1:48, 2000
YJ04—DX09	2760 +	0.3766	0.3595	+ 0.0171	1:16, 1000
DL05—SX07	1591 +	0.9549	0.9595	- 0.0046	1:34, 6000
ZX06—JB08	1021 +	0.4072	0.3985	+ 0.0087	1:11, 7000
ZX06—ZB12	1450 +	0.0813	0.0811	+ 0.0002	1:725, 0000
ZX06—XW11	1281 +	0.6289	0.6311	- 0.0022	1:58, 0000
SX07—ZB12	1966 +	0.3952	0.3947	+ 0.0005	1:393.30000

边 名	长 度	ME－5000	GPS	较 差	外部符合精度
DY09—HE10	727 +	0.3099	0.3122	－0.0023	1:31，6000
DY09—FJ14	1641 +	0.8856	0.8933	－0.0077	1:21，3000
DY09—NS13	2362 +	0.7212	0.7291	－0.0079	1:29，9000
HE10—XW11	1269 +	0.2722	0.2657	+0.0065	1:19，5000
XW11—ZB12	1574 +	0.9217	0.9261	－0.0044	1:35，8000
ZB12—NS13	2240 +	0.1741	0.1728	－0.0013	1:172，3000
NS13—FJ14	1508 +	0.0716	0.0760	－0.0044	1:34，3000
说 明	1. ME－5000 光电测距仪的标称精度为±（0.2mm+0.2ppm） 2. GPS 测量采用 Trimble 4000SST 双频接收机				

表 5－1－4用 GPS 信号测定方位角的精度

方位角 精度 定位方式	1m	10m	100m	100m	2000m	5000m
静态差分	7″～2″	40″～10″	5″～2″	0.6″～0.3″		
动态差分			3.5′	21″	11″	5″

表 5－1－5GPS 卫星定位精度的预计

使用卫星	定位数据采集时间	定位精度	备 注
第一代卫星	10 分钟～数小时（1 分钟）	< 1ppm	圆括号中的数据表示
第二代卫星	15 分钟（1 分钟）	0.01ppm	差分动态定位
第三代卫星	几个毫秒	1mm	

四、经济效益高

1983 年 9 月至 1984 年 5 月，在联邦德国 Eifel 地区建立了一个由 35 个点位组成的Ⅰ等加密网。该网的实践表明，GPS 卫星定位技术比常规大地测量技术要节省 85% 的外业费用。详情如表 5－1－6 所示。根据统计，美国用常规大地测量技术建立一个Ⅰ等水平

控制点需要耗费近 7000 美元，用 GPS 卫星定位技术建立同等精度的一个控制点，仅需花费 2000 美元，节约了 71.43% 的费用。我国约有 5 万个 I、II 等三角点和导线点，若按美国的标准估算，GPS 卫星定位技术将使我国节省约 2500 万美元的开支。如此显著的经济效益，主要源于 GPS 卫星定位不要求站间通视，而不必建立费时费力费钱的觐标。GPS 信号在其他场合应用的经济效益，目前虽无统计，但估计是很高的。例如，弹道导弹的弹道测量，地面监测站一般只能测量它的主要动段，而用测量船测量它的被动段，如前苏联向太平洋发射试验性导弹时，派出了五、六艘测量船。如果弹道导弹装备上 GPS 信号接收机，就可以实现导弹位置的实时测量，这既可准确地控制导弹的弹着点，又可大幅度地减少监测费用。

表 5-1-6		外业费用比较	
名 称 \ 技 术		常规大地测量	GPS 卫星定位
费 用		10000 美元	1500 美元
外业用时		3 个月	1 个月
精 度		2 ~ 10ppm	1 ~ 2ppm

从现势可见，GPS 信号接收机将朝着高精度、多功能、超小型和集成式的方向迅速发展，GPS 也将随之而广泛地应用于众多的行业，甚至进入社会科学领域，促进人类文明的高度发展。

第三节 美国政府对 GPS 用户的限制性政策与用户的措施

一、当前美国对 GPS 用户的主要限制性政策

因为 GPS 定位技术，与美国的国防现代化发展密切相关，所以，为了保障美国的利益与安全，限制非经美国特许的用户利用 GPS 定位的精度，该系统除在设计方面，采取了许多保密性措施外，在系统运行中，还采取了或可能采取其他一些措施，来限制用户获取 GPS 观测量的精度。这些措施，目前主要包括：

（一）对不同的 GPS 用户提供不同的服务方式

GPS 卫星发射的无线电信号，含有两种精度不同的测距码，即所谓 P 码（也称精密码）和 C/A 码（也称粗码）。相应两种测距码，GPS 提供了两种定位服务方式，即精密

定位服务 (Precise Positioning Service – PPS) 和标准定位服务 (Standard Positioning Service – SPS)。

精密定位服务 (PPS), 可提供 L_1 和 L_2 载波上的 P 码, L_1 载波上的 C/A 码, 导航电文和消除 SA 影响的密匙。PPS 的主要对象, 是美国军事部门和其它经美国特许的用户。这类用户, 可利用 P 码获得精度较高的观测量, 且能通过卫星发射的两种频率信号量测距离, 以消除电离层折射的影响。利用 PPS 单点实时定位的精度可达 $5\text{m} \sim 10\text{m}$ 。

但是, P 码是不公开的保密码, 非经美国政府特许的广大用户难以利用。

标准定位服务 (SPS), 仅提供 L_1 载波上的 C/A 码和导航电文, 其主要服务对象是非经美国政府特许的广大用户。这类用户只能利用 C/A 码获得精度较低的观测量, 且只能采用调制在一种载波上的 C/A 码测量距离, 无法利用双频技术消除电离层折射的影响。其单点实时定位的精度, 约为 $20\text{m} \sim 40\text{m}$ 。

(二) 实施选择可用性 (SA) 政策

为了进一步降低标准定位服务 (SPS) 的定位精度, 以保障美国政府的利益与安全, 对 GPS 工作卫星发播的信号, 实行了 SA 政策, 以进行人为的干扰。这种干扰, 目前是通过所谓 ϵ (epsilon) 和 δ (delta) 两种技术实现的。

ϵ 技术是干扰卫星星历数据, 通过降低 GPS 卫星播发的轨道参数的精度, 来降低利用 C/A 码进行实时单点定位的精度; δ 技术是对 GPS 的基准信号, 人为的引入一个高频抖动信号, 以降低 C/A 码伪距观测量的精度。

目前, 在 SA 的影响下, 利用 SPS 的实时单点定位精度, 降为约 100m (水平) 和 150m (垂直)。而且, 这种影响是可变的, 在必要时, 美国政府将可能进一步降低利用 SPS 的定位精度。

SA 是针对非经美国政府特许的广大 GPS 用户, 采取的降低实时定位精度的措施, 而对能够利用精密定位服务 (PPS) 的用户, 则可以利用密匙自动地消除 SA 的影响。

(三) 精测距码的加密 (A-S) 措施

P 码的加密措施, 也叫“反电子欺骗”(A-S) 措施。当 P 码已被解密, 或在战时, 对方如果知道了特许用户接收机所接收卫星信号的频率和相位, 便可以发射适当频率的干扰信号, 诱使特许用户的接收机错锁信号, 产生错误的导航信息。为了防止这种电子欺骗, 进一步加密 P 码, 美国将在必要时引入机密码 W, 并通过 P 码与 W 码的模 2 相加, 将 P 码转换成 Y 码。由于 W 码是严格保密的, 所以非特许用户, 将无法继续应用 P 码进行精密定位和进行上述电子欺骗。

在上述措施的影响下, 目前不同用户利用 GPS 进行实时定位可能达到的精度 (平面), 大致如表 5-1-7 所列。

表 5-1-7 实时单点定位的精度（平面，m）^[212]

实 施 政 策 \ 服 务 方 式		SPS		PPS	
SA	A-S	C/A	P	C/A	P(Y)
关	关	40	10	40	10
开	关	100	95	40	10
开	开	100	——	40	10
关	开	40	——	40	10

二、非特许 GPS 用户对美国限制性政策的措施

美国政府对 GPS 用户所采取的限制性政策，世界各国的广大非特许用户都极为关注。为了摆脱或减弱上述限制性政策的影响，广大用户广泛地开展了许多意义重大的研究，开发与实验工作，并取得了有效的结果。当前采取的主要措施包括：

（一）建立独立的 GPS 卫星测轨系统

利用 GPS 卫星，建立独立的跟踪系统，以精密地测定卫星的轨道为用户提供服务，是克服上述美国限制性政策的一项有效措施。它对促进 GPS 的广泛应用具有重大意义。

所以，除美国一些民用部门外，加拿大、澳大利亚和欧洲的一些国家，都在实施建立区域性或全球性精密测轨系统的计划。其中值得注意的是，以美国为首，从 1986 年开始建立的国际合作 GPS 卫星跟踪网（CIGNET – Cooperative International GPS Satellite Tracking Network），其跟踪站的分布已扩展至欧、亚、非、美、大洋洲等五大洲，该跟踪网的测轨精度可达分米级。

此外，还应着重指出，为了精密地确定 GPS 卫星星历，地球自转参数，跟踪站的坐标和时钟与电离层信息，以满足地球动力学研究和电离层监测等项工作的需要，于 1993 年国际大地测量学协会（International Association of Geodesy – IAG），正式宣布成立了国际 GPS 地球动力学服务组织（International GPS Service for Geodynamics – IGS），并计划在全球范围内，建立一个高精度的 GPS 卫星跟踪网。该网拟定包括 30 ~ 40 个核心站和 150 ~ 200 个基准站。其中核心站连续跟踪 GPS 卫星，其观测数据主要用于计算卫星的精密星历，测定地球自转参数和监测地球参考系的文化；基准站则主要对 GPS 卫星进行周期性地重复观测，以精确地传递地球参考系的坐标和监测 IGS 网的基线向量变化。

在 IGS 正式宣布成立之前，IGS 网已于 1992 年进行了首次国际联合观测，并取得了重要的成果。该网所确定的 GPS 卫星星历的精度为分米级。

建立区域性测轨系统的措施，对我国利用和普及 GPS 定位技术，推进导航与测绘

科学技术的现代化，也具有重要的现实意义。

（二）建立独立的卫星定位系统

目前，一些国家和地区正在发展自己的卫星定位系统。尤其是前苏联正在建立的全
球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System—GLONASS）引起了世界各国的普遍兴
趣。GLONASS 计划包括 24 颗卫星（含 3 颗备用卫星），均匀分布在三个轨道面上（图 5
- 1 - 3），轨道面的倾角为 64.8° ，运行周期约为 11 小时 15 分，卫星信号采用了两种载
波，其频率分别为 1.6GHz 和 1.2GHz 。截止 1994 年 9 月 8 日，该系统已有 13 颗卫星可
供使用，原计划至 1995 年，GLONASS 星座的卫星数目将达到 24 颗。目前该系统导航的
精度，平面位置约为 100m，速度为 15cm/s ，时间为 $1\mu\text{s}$ 。

另外，欧洲空间局（European Space Agency—ESA）也曾规划和发展一种以民用为主
的卫星定位系统（简称 NAVSAT）。该系统计划包括 6 颗地球同步卫星和 12 颗高椭圆轨
道卫星。但由于经济上的原因，目前该计划的实施遇到了困难。

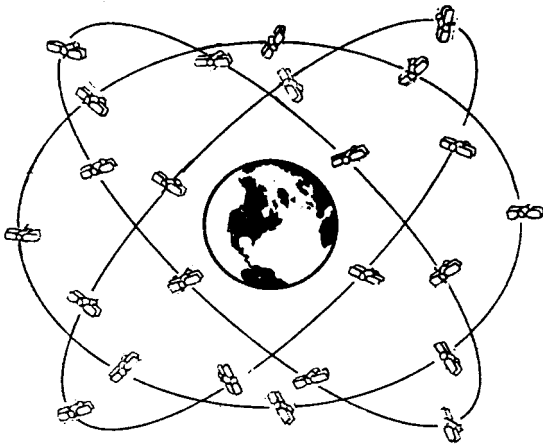


图 5 - 1 - 3 GLONASS 卫星星座

上述几种不同卫星定位系统的主要特征，如表 5 - 1 - 8 所列。建立独立的卫星定位
系统，尽管可以完全摆脱对美国 GPS 的依赖，但这是一项技术复杂，耗资巨大的工程，
对于经济和技术尚在发展中的国家来说，将是困难的。

（三）开发 GPS 与 GLONASS 兼容接收机

由于 GPS 和 GLONASS 在系统的构成，工作卫星的数目，工作频段及定位的原理等
方面，都是相类似的，所以，研究与开发能同时跟踪、观测两系统卫星信号的兼容接收
机，受到了世界各国的普遍重视。GPS/GLONASS 一体化的接收机，不仅增加了可观测
的卫星数目，改善了观测卫星的几何分布，而更重要的是，可以有效地减弱美国限制性
政策的影响（如实施 SA），提高导航的安全性，可靠性和精确性。

表 5-1-8 不同卫星定位系统的主要特征

卫星定位系统	星座卫星 数目（颗）	卫星平均 高度（km）	卫星运行 周期（min）	载波频率（MHz）	
				L ₁	L ₂
GPS（美国）	21 + 3	20200	718	1565 ~ 1586	1217 ~ 1238
GLONASS（前苏联）	21 + 3	19100	675	1603 ~ 1616	1246 ~ 1256
NAVSAT（欧洲空间局）	12 + 6	20178 *	720	1561 ~ 1569	1224 ~ 1232

* 高椭圆轨道卫星的平均高度。

（四）研究与开发差分 GPS 定位技术

差分 GPS（Differential GPS—DGPS），通常主要是指 GPS 用户，应用测距码进行实时相对定位的技术。由于在相邻两观测站上，SA 对同一 GPS 卫星观测值的影响，具有很强的相关性，因此，在一定范围内，采用这一定位技术可以明显地减弱 SA 等项误差的影响，显著地提高定位的精度。

差分 GPS 定位技术，是目前 GPS 用户，为消除或减弱 SA 等项误差影响的有效措施之一，因而受到广泛的重视。应用极其普遍。

另外，为克服美国对 GPS 用户的限制，进一步改善 GPS 接收机对卫星信号的跟踪技术，研究与完善 GPS 定位的工作模式和数据处理方法，并开发相应的软件，对发展与普及 GPS 定位技术，提高定位的精度、均具有重要的现实意义。

第二章 GPS 定位的基本原理与数据处理

按定位时 GPS 接收机所处的状态，可以将 GPS 定位分为静态定位和动态定位两类。所谓静态定位，指的是将接收机静置于测站上数分钟至 1h 或更长的时间进行观测，以确定一个点在 WGS-84 坐标系中的三维坐标（绝对定位），或两个点之间的相对位置（相对定位）。而动态测量则至少有一台接收机处于运动状态，测定的是各观测历元相应的运动中的点位（绝对定位或相对定位）。

利用接收到的测距码或载波相位均可进行静态定位。但由于载波的波长远小于测距码的波长，若接收机对码相位及载波相位的观测精度均取至 0.1 周（每 2π 弧度为一周），则 C/A 码及载波 L_1 所相应的距离误差分别约为 2.93m 和 1.9mm。因此，利用码相位的伪距测量只能用于单点绝对定位。而载波相位观测值则是目前 GPS 测量中精度最高的观测值，而且它的获得不受精码（P 码或 Y 码）保密的限制。利用载波相位进行单点定位可以达到比测距码伪距定位更高的精度。载波相位测量的最主要的应用是进行相对定位。将两台 GPS 接收机分别安置在两个不同的点上，同时观测卫星载波信号，利用载波相位的差分观测值，可以消除或削弱多种误差的影响，获得两点间高精度的 GPS 基线向量。

载波相位观测值就其原始意义来说，就是卫星的载波信号与接收机参考信号之间的相位差。在实用上，为了减弱卫星的轨道误差、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，常采用原始相位观测值的各种线性组合（即差分）作为观测值。

本章首先介绍 GPS 定位的基本观测值，然后讨论测距码伪距定位原理、载波相位观测值和各种差分观测值的数学模型，简述 GPS 定位数据处理过程。

第一节 GPS 定位的基本原理

一、基本原理

地面接收机可以在任何地点、任何时间、任何气象条件下进行连续观测，并且在时钟控制下，测定出卫星信号到达接收机的时间 Δt ，进而确定卫星与接收机之间距离 ρ 为

$$\rho = c \cdot \Delta t + \sum \delta_i \tag{5-2-1}$$

式中, c 为信号传播速度, $\sum \delta_i$ 为有关的改正数之和。

GPS 定位就是把卫星看成是“飞行”的控制点, 根据测量的星站距离, 进行空间距离后方交会, 确定地面接收机的位置。

如图 5-2-1 所示, A、B、C 为已知瞬时位置的卫星点, 接收机的位置坐标可由下式计算:

$$\begin{aligned}\rho_A^2 &= (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2 \\ \rho_B^2 &= (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 \\ \rho_C^2 &= (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2\end{aligned}\quad (5-2-2)$$

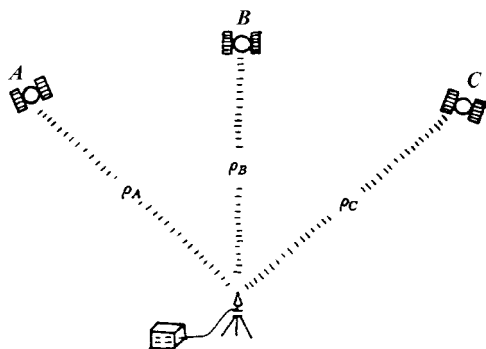


图 5-2-1 基本原理

其中 x_A, y_A, z_A 为 A 点的空间直角坐标;

x_B, y_B, z_B 为 B 点的空间直角坐标;

x_C, y_C, z_C 为 C 点的空间直角坐标;

x, y, z 为接收机的空间直角坐标。

二、码相位伪距测量

(一) 码相位伪距测量原理

码相位伪距测量是将伪码发生器产生的与卫星结构完全相同的码经过延时器延时 τ 后使得接收的测距码与本机复制码相关处理, 相关系数为 1 时, τ 就是卫星信号延迟传播时间 Δt 。将 Δt 乘以 c 即为卫星到接收机间距离 ρ_0 。

$$\rho = \Delta t \cdot c \quad (5-2-3)$$

由于卫星钟、接收机钟的误差及无线电信号经过电离层和对流层中的延迟。因此, 实际测出的距离 ρ 与卫星到接收机距离 R 有误差。一般称此量测出的距离 ρ 为伪距。通过对 C/A 码相位进行测量的为 C/A 码伪距, 对 P 码相位测量的为 P 码伪距。复制码与接收测距码相关精度为码元宽的 1%。由于 C/A 码码元波长 λ 为 293m。其测量精度为

2.9m；而 P 码码元波长 29.3m、测量精度为 0.29m，比 C/A 码测量精度高十倍。所以，有时也将 C/A 码称粗码，P 码称精码。

设接收机 K 在第 i 历元接收卫星信号的钟面时为 t_k^i ，与此相应的 GPS 标准时为 T_k^i ，则接收机钟差为

$$\delta t_k^i = t_k^i - T_k^i \quad (5-2-4)$$

若第 i 观测历元第 j 颗卫星信号发射的钟面时为 t_j^i ，相应的 GPS 标准时为 T_j^i ，则卫星钟钟差为

$$\delta t_j^i = t_j^i - T_j^i \quad (5-2-5)$$

利用卫星 j 导航电文所给出的钟差参数 a_0, a_1, a_2 可近似计算第 i 历元卫星钟钟差

$$\delta t_j^i = a_0 + a_1 (T_j^i - t_{0e}) + a_2 (T_j^i - t_{0e})^2 \quad (5-2-6)$$

$$T_j^i = t_j^i - \delta t_j^i \quad (5-2-7)$$

式中， t_{0e} 为第一数据块的参考时刻。实际计算中可以不利用上面两式进行迭代，而直接用 t_j^i 代替 5-2-6 式中的 T_j^i 。经过这样的钟差修正后，仍不能严格地修正到 GPS 标准时，各卫星钟之间的同步差可保持在 20ns (10^{-9}s) 以内。

(二) 伪距观测值的观测方程式及求解

若忽略大气折射的影响，并将卫星信号的发射时刻及接收时刻均化算到 GPS 标准时，则第 i 个观测历元，由第 j 颗卫星至测站 k 的几何传播距离 $\rho(k, j, i)$ 可表示为

$$\rho(k, j, i) = c(T_k^i - T_j^i) = c \cdot \tau_{kj}^i \quad (5-2-8)$$

在 5-2-8 式中， τ_{kj}^i 为相应的时间延迟。

顾及对流层和电离层所引起的测距码信号的附加时间延迟 $\Delta\tau_{\text{trop}}$ 及 $\Delta\tau_{\text{ion}}$ ，则正确的星站距应为

$$\rho(k, j, i) = c(\tau_{kj}^i - \Delta\tau_{\text{trop}} - \Delta\tau_{\text{ion}}) \quad (5-2-9)$$

由 (5-2-4) 式及 (5-2-5) 式，并由 τ_{kj}^i 的表示式，可得

$$\rho(k, j, i) = c(t_k^i - t_j^i) - c(\delta t_k^i - \delta t_j^i) - \delta\rho_{\text{trop}} - \delta\rho_{\text{ion}} \quad (5-2-10)$$

在上式中，右端的首项即为伪距观测值 $\rho'(k, j, i)$ ，而式子左端的卫地距含有观测站的位置信息，因此可将伪距观测值表示为

$$\rho'(k, j, i) = \rho(k, j, i) + c \cdot \delta t_k^i - c \cdot \delta t_j^i + \delta\rho_{\text{trop}} + \delta\rho_{\text{ion}} \quad (5-2-11)$$

在此，为简便起见，对于对流层、电离层折射修正项略去了表示测站、卫星、观测历元的上、下标。对流层折射对卫地距的修正项 $\delta\rho_{\text{trop}}$ 包括干、湿两分量，可按测站上实测的气象参数及至卫星的高度角，采用选定的对流层模型例如霍普菲尔德公式计算之。

对于电离层折射修正项采用现有的电离层修正模型，可将电离层影响减少 75% 左右。

卫星钟钟差 δt_j^i 可利用 (5-2-6) 式及 (5-2-7) 式求出，为确定式中所需的卫

星测距码信号的发射时刻 t_j^i ，只须由接收时刻 t_k^i 减去从相关处理所得的测距码信号延迟即可。事实上，从 GPS 卫星信号到接收机天线的传播时间很短，其值大致在下式的范围内变动：

$$\frac{a(1-e) - a_m}{c} < \tau' < \frac{a(1+e)}{c}$$

式中， a ， e 分别为卫星轨道的长半径及偏心率；而 a_m 为地球的平均半径，可知信号传播时间约为 $0.067 \sim 0.086\text{s}$ ，平均约为 0.077s 。

卫星钟钟差 δt_j^i 既然能够求出，于是一方面可以修正测距码的发射时刻，并由星历表得出其时的卫星三维坐标而作为已知值；另一方面也可求得 $c \cdot \delta t_j^i$ 。于是 (5-2-11) 式的后三项可移置于等号的左端，若令

$$\bar{\rho}(k, j, i) = \rho'(k, j, i) + c\delta t_j^i - \delta\rho_{\text{trop}} - \delta\rho_{\text{ion}} \quad (5-2-13)$$

(5-2-11) 式成为

$$\bar{\rho}(k, j, i) = \rho(k, j, i) + c\delta t_k^i \quad (5-2-14)$$

在卫地距 $\rho(k, j, i)$ 中，因卫星坐标是已知的，仅含有天线相位中心的三个坐标未知数，另一个未知数则是接收机钟差，因此在同一观测历元，只须同时观测 4 颗卫星，即可获得 4 个观测方程式，解求出这 4 个未知数。实际解算时须利用站坐标的近似值将 (5-2-14) 式线性化，为简便起见，略去表示观测站及观测历元的标号，可得观测方程式

$$-l_k^i(t) \cdot \delta X - m_k^j(l) \cdot \delta Y - n_k^j(t) \cdot \delta Z - c\delta t - \rho_0^j + (\tilde{\rho}^j + \Delta h \cdot \sin\theta_j) = 0 \quad (5-2-15)$$

式中： $l_k^i(t)$ 、 $m_k^j(t)$ 、 $n_k^j(t)$ 分别为 $\rho(k, j, i)$ 对 X 、 Y 、 Z 的偏导数， ρ_0^j 为由测站近似坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 及卫星坐标 (X^j, Y^j, Z^j) 求得的星站距。

$$\rho_0^j = \sqrt{(X^j - X_0)^2 + (Y^j - Y_0)^2 + (Z^j - Z_0)^2} \quad (5-2-16)$$

Δh 为接收机天线中心至测站标石面高度（简称天线高）， θ_j 为 j 卫星的高度角，由 $\Delta h \cdot \sin\theta_j$ 修正项可将卫星至天线相位中心的观测距离改正为至测站标石中心的距离。

在 (5-2-15) 式中，含有 4 个未知参数，即测站近似坐标的改正数 $(\delta X, \delta Y, \delta Z)$ ，以及接收机钟差 δt 。因经修正后的卫星钟时刻仍含有偏差，因此，这里的接收机钟差 δt 并非相对于 GPS 标准时，而是相对于卫星钟而言的。若同时观测到 4 颗卫星信号，则由 4 个伪距观测式即可求解未知数向量 $(\delta X, \delta Y, \delta Z, C \cdot \delta t)$ 。

若令

$$A = \begin{bmatrix} l_0^{(1)} & m_0^{(1)} & n_0^{(1)} & -1 \\ l_0^{(2)} & m_0^{(2)} & n_0^{(2)} & -1 \\ l_0^{(3)} & m_0^{(3)} & n_0^{(3)} & -1 \\ l_0^{(4)} & m_0^{(4)} & n_0^{(4)} & -1 \end{bmatrix}, \quad l = \begin{bmatrix} \rho_0^{(1)} - \tilde{\rho}^{(1)} - \Delta h / \sin\theta_1 \\ \rho_0^{(2)} - \tilde{\rho}^{(2)} - \Delta h / \sin\theta_2 \\ \rho_0^{(3)} - \tilde{\rho}^{(3)} - \Delta h / \sin\theta_3 \\ \rho_0^{(4)} - \tilde{\rho}^{(4)} - \Delta h / \sin\theta_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}^T = (\delta X, \delta Y, \delta Z, C \cdot \delta t)^T$$

则有

$$Ax - l = 0$$

由上式可求得未知数向量 x 的唯一解

$$x = A^{-1}l \tag{5-2-18}$$

若同时观测的卫星数多于 4 个，则存在多余观测，随着观测值的个数超过未知数个数，(5-2-17) 式的右端不再为零向量，而是一列残差向量 $V^T = (v_1, v_2, \dots, v_j)^T$ ，由此而求得最小二乘解

$$x = (A^T A)^{-1} A^T l \tag{5-2-19}$$

其精度为

$$D_x = m_0^2 Q_x = m_0^2 \cdot (A^T A)^{-1} \tag{5-2-20}$$

m_0 为伪距测量中的误差，来自于星历误差、卫星钟误差、大气传播误差及本身量测误差。

若一开始所给出的测站在 WGS-84 坐标系中的近似值偏差过大，则因线性化后的观测方程式仅取了一次项，为避免略去的高次项对解算结果的影响，可利用解算出的站坐标作为近似值，迭代求解。

多数 GPS 接收机当选定历元的时间间隔，输入量测的天线高，及测站的近似坐标后（也有的接收机，如 Ashtech 型，可不输入测站坐标），即能在每个观测历元实时输出测站的三维直角坐标或其相应的大地经纬度及大地高。在实现 SA 政策以前，伪距测量中误差约为 10m，当所测卫星分布图形较好的（PDOP = 3），利用 C/A 码的一个历元的三维绝对定位精度约为 30 ~ 50m。但自从美国在 Block II 卫星上实施了 SA 以后，由于卫星星历精度的降低以及卫星钟存在着伪随机的频率抖动，以至等效伪距测量中误差可达 100 ~ 200m，于是测距码的伪距定位精度也就大大地降低了，目前，取消了 SA 政策，单点定位精度在 20m 左右。

利用各个观测历元的伪距观测量，只要始终保持能接收到 4 颗或 4 颗以上的卫星的信号，就能进行实时的、连续的导航定位。即使在观测过程中发生卫星信号的暂时失锁，只能收到少于 4 颗的卫星信号，在信号失锁的那段时间里，不能确定接收机的位置，但在失锁之前及之后各观测历元的单点定位值仍然是有效的、正确的。

三、载波相位观测

（一）载波相位观测值

在码相关型接收机中，当 GPS 接收机锁定卫星载波相位，就可以得到从卫星传到接收机经过延时的载波信号。如果将载波信号与接收机内产生的基准信号相比就可得到载波相位观测值。

若接收机内振荡器频率初相位与卫星发射载波初相位完全相同，卫星在 t_0 时刻发射信号，经过 Δt 后于 t_i 时刻被接收机接收，接收机通道锁定卫星信号， Δt 对应的相位

差为 ϕ_i^j ，又设卫星载波信号于历元 t_i 时刻的相位为 $\phi^j(t_i)$ ，接收机基准信号在 t_i 时刻相位为 $\phi_i(t_i)$ ，则有

$$\phi_j^i = \phi_i(t_i) - \phi^j(t_i) \quad (5-2-21)$$

卫星到接收机距离为

$$\rho = \lambda \phi_i^j = \lambda [\phi_i(t_i) - \phi^j(t_i)] \quad (5-2-22)$$

为了测定相位必须将两路信号进行整形，在鉴相器内以脉冲上沿进行测相就可以得到 $\Delta\phi(t_i)$ ，即为载波相位不足一个整周的相位值。卫星到接收机间的相位差为 N_0 个整周相位和不到一个整周相位之和，即

$$\phi_i^j = N_0 2\pi + \Delta\phi(t_i) \quad (5-2-23)$$

在鉴相器中，只能测出不足一个整周相位值。 N_0 测不出。因此，在载波相位测量中出现了个整周未知数 N_0 （也称为整周模糊度）。 N_0 需要通过其他途径求定，然后才能求得卫星到接收机的距离。

当接收机锁定卫星后，即可测定 t_i 时刻的载波相位观测值，接收机若继续跟踪卫星信号，就可以不断地测定 $\Delta\phi(t_k)$ ，并且利用整波计数器 $\text{Int}(\phi)$ 记录由 t_i 到 t_k 时间内的整周数变化。它的几何意义见图 5-2-2。

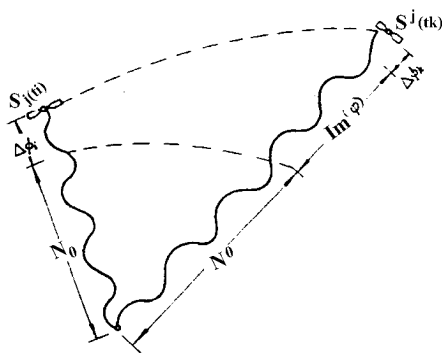


图 5-2-2 载波相位测量观测值

只要卫星 S^j 从 t_i 到 t_k 中间卫星信号没有失锁，则整周模糊度 N_0 就为常数， t_k 时刻卫星到接收机的相位差为

$$\phi_k^j = N_0 + \text{Int}(\varphi_k) + \Delta\varphi(t_k) \quad (5-2-24)$$

载波相位测量值为

$$\varphi^j(t_k) = \text{Int}(\varphi_k) + \Delta\varphi(t_k) \quad (5-2-25)$$

如果在跟踪卫星过程中，由于某种原因，如卫星信号被障碍物挡住而暂时中断、受无线电信号干扰造成信号失锁等，这样，计数器无法连续计数，因此，当信号重新被跟踪后，整周计数就不正确，但是不到一个整周的相位观测值仍然是正确的。这种现象称为跳周。跳周的出现和处理是载波相位测量中的重要问题，下面将要介绍跳周的判断和修

正。

由于载波频率高、波长短，因此，载波相位测量精度高。若测相精度为 $1\% f$ ，则 L_1 载波波长为 19cm ，其测距精度为 0.19mm ； L_2 载波波长为 24cm ，其测距精度为 0.24mm 。因此，利用载波相位观测值进行定位，精度要比码相位伪距测量定位精度高，只是要解决整周模糊度的解算和跳周修复问题。

(二) 载波相位整周模糊度和周跳问题

在连续进行载波相位观测过程中，如果卫星信号暂时受阻挡或计数器暂时故障，计数器无法连续计数而暂时中断，使得 $\text{Int}(\varphi)$ 将丢失某一量而变得不正确（此时瞬时量测值 $\Delta\varphi_k$ 仍是正确的）。这种现象叫做整周跳变，简称周跳。

由于卫星和接收机间的距离在不断变化，所以载波相位观测值 $\text{Int}(\varphi) + \Delta\varphi_k$ 也随时间在不断变化。这种变化应该是有规律的、平滑的，周跳将破坏这种规律性。根据这一特性就可以发现周跳并用多项式拟合来修正周跳。但这毕竟是麻烦的。最根本的办法还是从选择机型、选点、组织观测等各个环节加以注意，避免周跳的发生，因为周跳的出现与接收机质量及观测条件密切相关。

载波相位观测中尚存在着整周末知数 N_0 的确定问题。由于在连续跟踪的载波相位观测值中，均含有相同的 N_0 ，所以正确确定 N_0 是提高载波相位观测值精度的重要条件。另外，快速而正确地确定 N_0 ，又是提高 GPS 定位作业效率的重要环节。

解算整周末知数 N_0 的方法很多种。例如在进行载波相位测量的同时又进行了伪距测量，那么将伪距 $\tilde{\rho}$ 减去载波相位测量的实际观测值与波长的乘积 $\lambda \cdot \tilde{\varphi}$ ，即可求得 $\lambda \cdot N_0$ 。不过伪距测量精度较低，必须有较多的 $\lambda \cdot N_0$ 取平均值才能获得正确的 N_0 值。

近 10 年来采用了快速解算 N_0 的方法，需用时间较短，仅数分钟。它是根据数理统计中的参数估计和假设检验的原理，利用测站初次平差所提供的信息，即坐标向量和整周末知数向量以及相应的协因数阵和单位权方差，对空间信息的每一点进行比较判别，逐步排查“搜索”。对经过统计检验剩下的整数组合再重新进行平差计算，进行验前、验后检验。最后确定出最佳的整周末知数。目前在接收机及其定位软件中广泛使用了这一方法。

(三) 载波相位观测值的线性组合（差分法）

通过对载波相位观测值进行线性组合以形成新的虚拟观测值的方法。

1. 一次差（单差 Single - Difference—SD）

某一载波（例如 L_1 ）的两个相应原始相位观测值相减称为一次差，将所得的差值当作虚拟观测值并称为一次差（单差）观测值。假设，安置在基线端点的接收机 k_i ($i = 1, 2$)，对 GPS 卫星 s^j 和 s^k ，于历元 t_1 和 t_2 进行了同步观测，则可得以下独立的载波相位观测量： $\varphi_1^j(t_1) \lambda \varphi_1^j(t_2) \lambda \varphi_1^k(t_2) \lambda \varphi_1^k(t_1) \lambda \varphi_2^j(t_1) \lambda \varphi_2^j(t_2) \lambda \varphi_2^k(t_1) \lambda \varphi_2^k(t_2)$ 。若取符号 $\Delta\varphi_i^j(t) \nabla\varphi_i(t)$ 和 $\delta\varphi_i^j(t)$ ，分别表示不同接收机之间、卫星之间和不同观测

历元之间的观测量之差，求一次差一般有下列三种形式：

(1) 在接收机（测站）间求一次差：两个测站在同一观测历元 t_i 对同一卫星的同一载波进行相位测量，其相应观测值相减称为在接收机（测站）间求一次差。由于这两个载波相位观测值均受到 $(t_i - \Delta t)$ 时刻的卫星钟差的影响，故在站间单差观测值中可消除其影响。当然，由于两站至卫星的距离不同，故信号传播时间 Δt 也不严格相等，但其差异极小，在这么短时间内卫星钟差的变化一般可忽略。此外，卫星星历误差和大气延迟误差等也可大幅度削弱。其表达式为

$$\Delta\varphi^j(t) = \varphi_2^j(t) - \varphi_1^j(t) \quad (5-2-26)$$

(2) 在卫星间求一次差：在同一测站同一历元 t_i 对不同卫星的同一载波进行相位测量，将相应的原始观测值相减称为在卫星间求一次差。由于相应观测值中均受 t_i 时刻接收机钟差的影响，故在星际单差观测值中可消除其影响。其表达式为

$$\nabla\varphi^j(t) = \varphi_1^k(t) - \varphi_1^j(t) \quad (5-2-27)$$

(3) 在历元间求一次差：同一测站在两个不同历元对同一卫星的相同载波进行相位测量，其相位观测值相减称为在历元间求一次差。由于相同观测值中均含同样的整周未知数。其表示式为

$$\delta\varphi_1^j(t) = \varphi_1^j(t_2) - \varphi_1^j(t_1) \quad (5-2-28)$$

2. 二次差（双差 Double-Difference—DD）

在求一次差的基础上，再将两个相应的单差观测值相减，称为求二次差（双差），其差称为二次差（双差）观测值。求二次差时与求差的先后顺序无关，故也有三种形式：在卫星与接收机间求二次差，在卫星与观测历元间求二次差，在接收机与观测历元间求二次差。其中在卫星与接收机间求二次差被广为采用，其表达式为

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\varphi^k(t) &= \Delta\varphi^k(t) - \Delta\varphi^j(t) \\ &= [\varphi_2^k(t) - \varphi_1^k(t) - \varphi_2^j(t) + \varphi_1^j(t)] \end{aligned} \quad (5-2-29)$$

各接收机厂商所提供的数据处理软件几乎都采用了双差观测值。这是因为载波相观测方程中会出现观测瞬间卫星钟差及接收机钟差参数，且其数量特别庞大。由于接收机钟是否英钟，稳定性差，卫星钟中由于实施 SA 技术又人为地引入了钟频的快速抖动，因而用多项式拟合各历元的钟差效果并不好。如果将各历元的钟差均当作独立参数，那么未知数的个数将达数千个。过多的参数不但会影响解的稳定性，而且对计算机及外围设备也会提出很高的要求。双差观测值在求差过程中以将卫星钟差和接收机钟差消除，故未知数个数通常只有 10 个左右，用一般微机即可胜任数据处理工作，故被广泛采用。

3. 三次差（Triple-Difference—TD）

在求二次差的基础上再将两个相应的双差观测值相减，称为求三次差，其差称为三次差（三差）观测值。由于与求差的顺序无关，故求三次差只有一种形式，即在卫星、接收机与历元间求三次差。其表达式为

$$\delta\nabla\Delta\varphi^k(t) = \nabla\Delta\varphi^k(t_2) - \nabla\Delta\varphi^k(t_1)$$

$$\begin{aligned} &= [\varphi_2^k(t_2) - \varphi_1^k(t_2) - \varphi_2^j(t_2) + \varphi_1^j(t_2)] \\ &\quad - [\varphi_2^k(t_1) - \varphi_1^k(t_1) - \varphi_2^j(t_1) + \varphi_1^j(t_1)] \end{aligned} \quad (5-2-30)$$

由于在求三次差的过程中已将整周末知数消去，故方程中仅含坐标差未知数。

注意双差观测值是可以求整数（固定）解的，而三差解实际上是与实数（浮点）解对应的。因为在三差解中整周末知数已被消去并未解出，当然也无法固定为整数。而消去的整周末知数实际上是一组实数。所以在短基线解算中一般要求求双差固定解，而不希望求三差解。三差解一般用于中长基线，因为此时已难以求固定解了。

四、积分多普勒观测值

GPS 观测值有七种，即 C/A 码伪距； L_1 载波上 P 码伪距； L_2 载波上的 P_2 伪距； L_1 载波相位； L_2 载波相位， L_1 和 L_2 多普勒频移。但是，对于不同的接收机其测量值是不同的，如导航型接收机只有 C/A 码伪距和伪距变化率测量值；测地型单频接收机有 C/A 码伪距， L_1 载相位和多普勒频移。Ashtech Z—12 上述 7 种观测值全有。

为了统一 GPS 数据格式，以便不同类型的 GPS 接收机观测数据都可以互用。目前采用标准格式（RINEX）。各种接收机都可以将自己的文件格式转成 RINEX 格式。

五、不同类型 GPS 接收机联合作业

现在 GPS 接收机生产厂家有几十个，生产的 GPS 接收机又一般都有单频和双频之分，每种 GPS 接收机的原始测量数据记录格式及数据处理方法各不相同，但大多数接收机都可提供观测值的 RINEX 格式输出文本，RINEX 是一种与接收机无关的 GPS 数据标准交换格式，这样可使第三方接收机测量数据联合进行处理，为不同厂家、不同类型 GPS 接收机联合作业提供可能。现以 Leica 单、双频接收机和 Ashtech 单、双频接收机联合作业的有关问题进行讨论。

（1）单、双频接收机测量时，同步环、异步环的确定及闭合差处理。

单、双频接收机测量时，一般有下列规则：

基线解算：双频——双频 为双频
 单频——双频 为单频
 单频——单频 为单频

定义同步观测环为：三台及以上接收机同步观测（即同时对同一组卫星进行的观测）所获得的基线向量所构成的闭合环。虽然同为同步观测环，由于基线处理模式的不同，其环闭合差会有较大差别：理论上，采用同一处理数学模型的统一基准的多基线解产生的同步环闭合差，在有误差甚至粗差存在的前提下，同步环闭合差最小，应该为零。但在实际应用中，同步环中各条基线单独解算时，由于基线间不能做到完全严格的同步，一同步图形中各条基线处理时对应的起算点坐标不是从同一起算点导出的，而是各自端点 C/A 码伪距单点定位值，都可能产生较大的同步环闭合差。研究表明，若一

个等边形的三边同步环，各基线处理时采用各自端点 C/A 码伪距离位值作起算点，若起算点坐标分量误差为 $\pm 20\text{m}$ ，则可能引起基线各分量 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 的相对误差，三边形坐标分量闭合差则可达 $\pm \sqrt{3} \times 10^{-6}$ ，顾及同步环闭合差理论上应为零，对三、四等网，基线平均边长 $2 \sim 5\text{km}$ ，而由上述原因引起的同步基线相对误差的总量值在厘米级左右；

理论上，同一基线的不同数学模型解算是等价的。但在实际上，固定解、浮点解和三差分解之间互差可达几个厘米，因此，对于不同数学模型解算基线构成的同步三边形闭合差，实际上可按异步环要求进行。

相应地，对于单频、双频接收机、GPS 测量模式，GPS + GLONASS 测量模式联合作业时，对所谓一同步观测环，其基线解算的模式可为单频机解、双频机解、单星系统的解、双星系统的解，因此实际上可按异步环要求进行。

由独立基线组成的闭合环称为独立环或异步环，在有误差的前提下，异步环闭合差不可能为零，因此，它是 GPS 网质量检核的主要指标。

(2) Leica 接收机和 Ashtech 接收机联合作业。

不同厂家生产的 GPS 接收机联合作业时，流程如图 5-2-3。

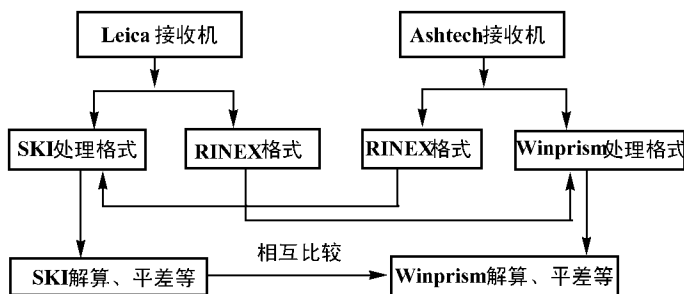


图 5-2-3 联合作业流程

现以 Leica 接收机、Ashtech 接收机联合作业后处理以 Ashtech 的 Winprism 软件处理为例作简要说明。

由于 Leica 接收机接收的数据一般按天存贮，每台仪器接收的数据传输到计算后由 11 个文件组成，基线数据处理时，按同步观测时间进行手工或自动解；而 Ashtech 接收机的接收数据传输至计算机后变成为三个文件，称为观测值 B—文件、星历 E—文件和测站信息的 S—文件，并以时段分别存储。因此利用 Leica 接收机的数据转化成的 RINEX 时，应按时段进行分离，并分别存储，转换为 Ashtech 数据格式后，要对每个时段，编辑一个与 B—文件、E—文件同名的 S—文件，输入仪器高等相关信息，然后才能到 Winprism 软件下进行后续处理。若后处理以 Leica 公司的 SKI 软件处理，过程类似，不再赘述。

第二节 GPS 定位数据处理

卫星定位的数据处理，一般均可借助相应的数据处理软件自动完成。随着定位技术的不断发展，数据处理软件的功能和自动化程度不断增强和提高。

数据处理的基本流程如图 5-2-4 所示，包括数据的粗加工和预处理、基线向量计算和基线网平差计算，坐标系统转换或与地面网的联合平差。

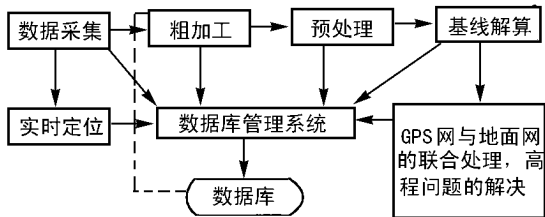


图 5-2-4

GPS 定位数据处理与常规测量数据处理相比较，有 2 个显著特点：

(1) 数据量大。若按每 15s 采集一组数据，一台接收机连续观测 1h 将有 240 组数据。每组数据都含有对若干个卫星 (≥ 4) 的伪距、载波相位观测值、卫星星历和气象数据等。GPS 定位时使用几台接收机同步观测，将会有上万个甚至更多的数据。

(2) 处理过程复杂。从采集到的原始数据到 GPS 定位成果，整个处理过程十分复杂，每一过程的数学模型和计算方法各不相同，每一过程都需要对不同的数据进行有序的组织、检验和分析，处理过程非常复杂。

一、粗加工和预处理

(一) 粗加工

GPS 接收机采集的数据记载在接收机的内存模块上。粗加工的第一项工作就是数据传输，即将数据从记录载体传输至计算机。数据传输的同时进行数据分流，将各类数据归放入不同的文件。为此传输至计算机的数据需要解译，提取出有用的信息，分别建立 4 种不同的数据文件：

1. 观测值文件

内含观测历元、C/A 码伪距、载波 (L_1 、 L_2) 相位、积分多普勒计数、信噪比等。这是容量最大的文件。

2. 星历参数文件

包括所有被测卫星的轨道位置信息，据此可以算出任一瞬间的卫星的在轨位置。

3. 电离层参数和 UTC 参数文件

用于改正观测值的电离层影响和将 GPS 时间修正为协调世界时（UTC）时间。

4. 测站信息文件

包括测站名、测站号、概略坐标、接收机号、天线号、天线高、观测的起止时间、记录的数据量、初步定位结果等。

（二）预处理

定位数据预处理在定位数据处理中占有较大比重，预处理所采用的模型、方法的优劣将直接影响定位成果的质量。预处理的主要目的在于净化观测值，提高其“精度”，将各类数据文件标准化，形成平差计算所需要的文件。预处理的主要内容是：

（1）对观测数据进行平滑滤波检验，剔除粗差，删除无效数据。

（2）统一数据文件格式。将各类接收机的数据记录格式、项目和采样间隔等，加工成彼此兼容的标准化文件，以便统一处理。

（3）GPS 卫星轨道方程的标准化。

由于不同的星历有不同的数据格式和卫星位置计算公式，且星历参数又依不同时间（每小时更新一次）各具独立性。这就为卫星位置计算、周跳的检测修正、观测值残差分析等带来许多不便或不确定性因素。为此，就需要建立一组标准化的轨道方程，用一个连续的、平滑的轨道来覆盖整个观测时段，以使用统一的格式提供观测时段内任一时刻任一卫星的空间位置。

一般采用时间为变元的多项式作为 GPS 卫星位置标准化表达式。多项式的阶数取 8 ~ 10 就足以保证米级甚至厘米级轨道拟合的数字精度。

（4）诊断整周跳变点，发现并修复整周跳变；确定整周未知数的初值。

诊断整周跳变常采用曲线拟合的方法，即根据几个相位观测值拟合一个 n 阶多项式，用此多项式预估下一个观测值并与实测值比较，从而发现并修正整周计数。

整周未知数可以采用伪距观测值 $\tilde{\rho}_i$ 与载波相位测量值 $\tilde{\varphi}_1$ 乘以波长 λ 相比较的方法确定出 $\lambda \cdot N_0$ 。整周未知数的初值用来作为平差时整周未知数近似值。

（5）对观测值进行各项改正，并使观测值文件标准化。

对观测值主要进行电离层折射改正和对流层折射改正。改正后的观测值文件必须标准化，包括记录格式标准化、记录类型标准化、记录项目标准化、采样密度标准化、数据单元标准化等。

观测值文件标准化以后，就可输入主处理程序进行平差计算。

二、基线向量解算

GPS 卫星定位在控制测量中均采用了相对定位技术，所确定的是控制点间相对位置

关系。这种相对位置关系是用 WGS - 84 世界大地坐标系的三维直角坐标 (Δx_{ij} , Δy_{ij} , Δz_{ij}) 来表示的, 我们称这种点间的相对位置量为基线向量。

求解基线向量一般均采用差分模型。其中在接收机和卫星间求二次差的模型是多数 GPS 基线向量处理软件中的必选模型。以站、星二次差分观测值作为解算时的观测量, 以测站间的基线向量为主要未知量建立误差方程, 组成并求解法方程, 这就是双差法的基线向量解算。

为了列立误差方程式, 必须将观测方程进行线性化, 并且引入 Δx_{ij} 、 Δy_{ij} 、 Δz_{ij} 这 3 个量作为未知数, 才能得到任一观测历元 t_l 测站 i 、 j 和卫星 p 、 q 的双差观测值的线性误差方程。

当 t_l 历元在测站 i 、 j 同步观测了 sv 个卫星则可列出 $sv-1$ 个误差方程, 相应要引入 $sv-1$ 个初始整周未知数, 即 t_l 历元共有 ($sv-1$) + 3 个未知数。若测站 i 、 j 对所有 sv 个卫星进行了 n 次连续观测, 则总共有 $m = n (sv-1)$ 个误差方程。

将所有误差方程写成矩阵形式

$$V = AX + L \tag{5-2-31}$$

式中 $V = (v_1 v_2 \dots v_m)^T$;

$$X = (\delta_x \delta_y \delta_z \delta_{N_1} \delta_{N_2} \dots \delta_{N_{sv-1}})^T ;$$

$$L = (w_1 w_2 \dots w_m)^T ;$$

A 为 $m \times [(sv-1) + 3]$ 阶的误差方程系数阵。

设各类双差观测值等权且彼此独立, 即权阵 P 为一单位阵, 于是可组成法方程

$$NX + B = 0 \tag{5-2-32}$$

式中 $N = A^T A$

$$B = A^T L$$

遂可解得

$$X = - N^{-1} B = - (A^T A)^{-1} (A^T L) \tag{5-2-33}$$

基线向量平差值为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{xj} &= \Delta x_{ij}^0 + \delta_{x_{ij}} \\ \Delta y_{ij} &= \Delta y_{ij}^0 + \delta_{y_{ij}} \\ \Delta z_{ij} &= \Delta z_{ij}^0 + \delta_{z_{ij}} \end{aligned} \right\}$$

同时亦得基线长度平差值和整周未知数平差值。

为了评定基线向量的精度, 可用常规方法计算单位权中误差 m_0 。并取协因数矩阵 N^{-1} 的相应对角元素 $Q_{x_i x_i}$, 按下式计算任一分量中误差

$$m_{x_i} = m_0 \sqrt{Q_{x_i x_i}} \tag{5-2-34}$$

三、GPS 网的平差计算

通过前述的基线向量解算, 已经得到了同步观测的基线向量。通常 GPS 定位网是

由多个异步网构成的，它们之间往往形成多个异步环闭合条件。所以基线网平差的目的，其一是将各观测时段所确定的基线向量视作观测值，以其方差阵之逆阵为权，进行平差计算，消除环闭合差；其二是建立网的基准（位置基准、方向和尺度基准），求出各 GPS 点在规定坐标系中的坐标值，并评定定位精度。

基线向量网平差可以分为以下 3 种类型。

（一）无约束平差

无约束平差属于经典自由网平差，是仅具有必要的起始数据的平差方法，它可以按间接平差的一般程序进行计算。

GPS 基线向量本身已经提供了方向基准信息和尺度基准信息（由向量坐标可以算出基线方位和基线长度），它们都属于 WGS-84 坐标系。因而无约束平差时只需引入位置基准信息，它不会引起观测值的变形和改正。引入位置基准信息的方法一般是取网中任一点的伪距定位坐标，作为所有 GPS 点坐标的起算数据。整个平差计算是在 WGS-84 坐标系中进行的。

无约束平差的重点在于考察 GPS 网本身的内部符合精度、考察基线向量之间有无明显的系统误差和粗差，同时也为 GPS 点提供大地高程数据，以便联合有关的正常高数据求出 GPS 点的正常高。

（二）约束平差

约束平差是以国家大地坐标系中某些点的坐标、边长和方位角为约束条件所进行的平差，其平差成果属于国家统一坐标系统。

为了将 GPS 基线向量网观测值与约束条件联系起来，应考虑 WGS-84 坐标系与国家大地坐标系之间的系统差，即平差时应设立 GPS 网与地面网之间的转换参数（详见第七章第六节），通过这些参数将 2 个具有不同基准的坐标系统化为一致。

约束平差实际就是附有条件式的相关间接平差。它可以在空间直角坐标系中进行，也可以在大地坐标系中进行。

（三）联合平差

联合平差就是将 GPS 基线向量观测值、结束数据、地面常规观测值（距离、方向、高差）等一并进行平差计算。

GPS 网平差既可以在三维空间直角坐标系（或三维大地坐标系）中进行三维平差，也可以在高斯投影平面（或椭球面上）进行二维平差。

第三章 GPS 在测绘工作中的应用技术

由于 GPS 是一种全天候、高精度的连续定位系统，并且具有定位速度快、费用低、方法灵活多样和操作简便等特点，所以它在测量学、导航学及其相关学科领域，获得了极其广泛的应用。

GPS 定位技术，在测量学中的主要应用范围包括：大地测量、地球动力学的研究，地区性测量控制网的联测，海洋测量，精密工程测量，工程变形监测和地籍测量等；在导航学中的应用主要包括：车辆、船只和飞机的精密导航、测速，以及运动目标的监控与管理等。除此，GPS 定位技术在运动载体的姿态测量，弹道导弹的制导，近地卫星的定轨，精密测时，以及气象学和大气物理学的研究等领域，也显示了广阔的应用前景。

这一高新技术出现以来，其应用之广泛，普及之迅速是前所未有的。例如，在测量工作方面，根据德国下萨赫森州，多年的统计资料表明，在该州的测绘工作中，利用 GPS 定位技术的比重，迅速增长。1986 年该州共布设测量控制点 1005 个，其中采用 GPS 测量技术观测的点，仅为 45 个，占全部工作量的 4.5%；而到 1988 年，采用 GPS 测量技术观测的工作量，所占比重已达 58.3%，到 1990 年，这一比重进一步提高到 98.6%。目前，经典的平面控制测量技术，几乎完全被 GPS 测量技术所代替。

第一节 GPS 定位技术在平面控制测量方面的应用

全球定位系统（GPS）在平面控制测量方面的应用，是目前 GPS 定位技术应用的一个重要领域。它的主要作用是：

- （1）建立和维持高精度三维地心坐标系；
- （2）不同大地控制网之间的联测和转换；
- （3）建立新的地面控制网（点）；
- （4）检核和改善已有地面网；
- （5）对已有的地面网进行加密；
- （6）研究与精化大地水准面。

上述各项应用，大都涉及到坐标系统的转换，或与已有经典地面网的联合处理问题。对此已在第九章作了详细阐述。这里将主要介绍一下关于 GPS 定位技术用于建立测量控制网（点）的一般情况。

由于 GPS 测量精度高，花费时间少，作业方法多样，所以，它能广泛地应用于各

种形式的控制测量工作。

在应用高精度 GPS 相对定位技术，建立短边（1km ~ 10km）加密控制网方面，已经获得了良好的结果，图 5-3-1 是用 GPS 测量技术，在德国汉诺威布设的一个 GPS 网实例。网中相邻点间距离为 2km ~ 4km。平差后与地面网相比较，点的坐标中误差如表 5-3-1 所列。其中 LIN 为固定点。

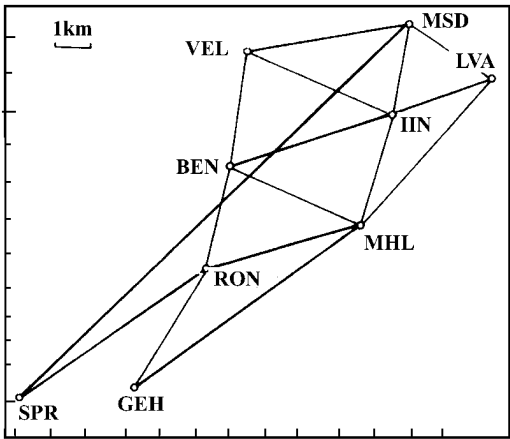


图 5-3-1 德国汉诺威 GPS 网（边长 2km—4km）^[278]

表 5-3-1 汉诺威 GPS 网平差后同地面网相比较的坐标中误差^[278]

观测站	坐标分量中误差		
	m_{φ} (m)	m_{λ} (m)	m_h (m)
LIN	0.000	0.000	0.000
MSD	0.002	0.002	0.005
VEL	0.003	0.002	0.007
BEN	0.003	0.002	0.007
RON	0.002	0.002	0.006
MHL	0.003	0.002	0.007
LVA	0.003	0.004	0.008
CEH	0.005	0.004	0.011
平均中误差	0.0026	0.0023	0.0064

图 5-3-2 是另一个边长为 100km ~ 250km 的 GPS 卫星网实例。该网位于德国下萨赫森（Niedersachsen）地区，采用 TI-4100 型 GPS 接收机观测，其平差后与地面网相比较，点位中误差如表 5-3-2 所列，其中 BRM 为固定点。

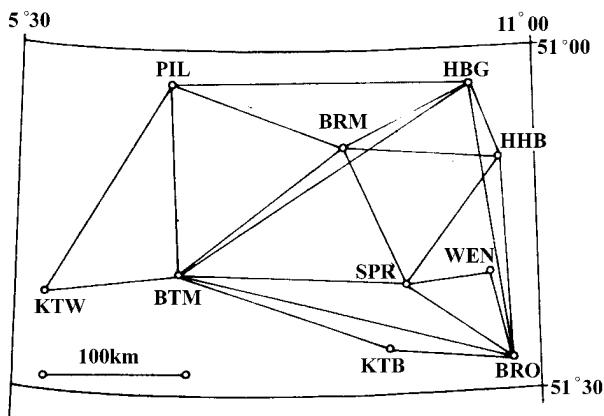


图 5-3-2 德国下萨赫森 GPS 网（边长 100km—250km）^[278]

表 5-3-2 下萨赫森 GPS 卫星网平差后同地面网相比较的坐标中误差^[278]

观 测 站	坐标分量中误差		
	m_{φ} (m)	m_{λ} (m)	m_h (m)
BRM	0.000	0.000	0.000
PIL	0.046	0.023	0.051
HBG	0.042	0.020	0.047
HHB	0.049	0.023	0.055
SPR	0.049	0.025	0.059
BTM	0.042	0.021	0.046
KTW	0.070	0.037	0.081
BRO	0.057	0.026	0.059
WEN	0.101	0.045	0.105
KTB	0.096	0.044	0.100
平均中误差	0.055	0.026	0.060

由表 5-3-1 和表 5-3-2 所列数据可见，对边长为 2km~4km 的 GPS 网，其与地面网相比较的点位平均中误差，平面位置为 0.0035m，高程为 0.0064m；而对边长为 100km~250km 的 GPS 网，其平面位置和高程的平均中误差，分别为 0.061m 和 0.060m。这就是说，无论是短边网或是中长边网，其精度都足以满足各种控制测量的要求。同时可见，由 GPS 测量所得大地高的精度，与平面坐标分量的精度为同一数量级。这样，GPS 测量便可为确定大地水准面的高程异常，或确定点的高程，提供精确的大地高程数据。

为了建立和传递高精度的三维地心坐标系统，在我国已成功地建立了高精度的 GPS 控制网（参见图 5-3-3）。该网共有 44 个点，从 1991 年 5 月至 1992 年 5 月，采用了 10 台 Mini-Mac 2816 型接收机，进行了外业观测。网中最短边 86km，最长边 1677 公里，平均边长约 800km。GPS 网经整体平差后，点位精度平均约为 1.5m，边长相对精度优于 10^{-7} 。

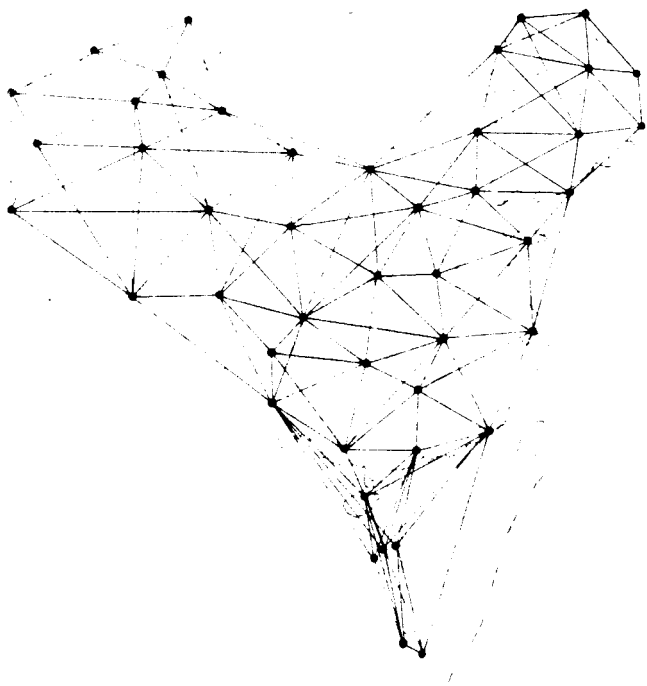


图 5-3-3 全国一级 GPS 网略图

随着 GPS 测量技术日益普及。我国在应用 GPS 定位技术，改善城市平面控制网方面，进行了广泛的实践。例如在海口、抚顺、沧州、北京、大连、济南等数十座城市，都成功地建立了高精度的 GPS 卫星网。实践结果表明，利用 GPS 定位技术建立的，边长为 5km ~ 15km 的城市平面控制网，其相对精度可达 $1 \sim 2 \times 10^{-6}$ ，足以满足现代城市测量、规划、建设和管理等多方面的要求。因而 GPS 测量技术，已成为改善或重建城市和矿区测量控制网的有效手段。

此外，由于高精度动态相对定位技术的发展，为 GPS 定位技术在航空摄影测量、航空与海洋物探等项工作中的应用，开辟了新的领域。这时利用机载 GPS 接收设备，既可引导载体按预定计划航行，又可以通过高精度动态相对定位法，直接测定航空摄影机或物探仪等传感器，在观测瞬间的位置，从而使所采集的数据，同时获得了重要的三维位置信息。

大家知道，在航空摄影测量中，为了航摄像片的定位和定向，通常，需首先采用经

典的大地测量方法，在测区建立地面控制网。这一方法不仅劳动强度大，而且周期长、费用高。由于 GPS 动态相对定位法，精度高、费用少、速度快，所以它将成为取代地面控制测量的一种简便而富有潜力的方法。

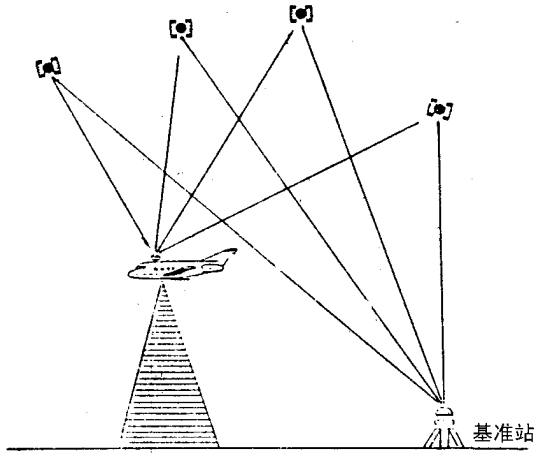


图 5-3-4 GPS 用于航空物探和航空摄影测量示意图

GPS 定位技术在航空摄影测量方面的应用，其定位精度，一般要求从 0.5m 至 25m 不等，视测图比例尺而定。当以测码伪距进行动态相对定位时，其精度主要取决于观测站与固定点之间的距离和码相位的测量误差，一般可达米级，而当采用动态确定整周未知数法（AROF 技术），以测相伪距进行动态实时相对定位时，其精度可达厘米级。

第二节 GPS 定位技术在高程测量方面的应用

GPS 测量成果在解决高程问题方面的应用，目前主要包括两个方面：

- (1) 综合利用水准测量和重力测量资料，确定大地水准面的高程；
- (2) 综合利用大地水准面资料确定点的高程。

一、高程系统概述

为了说明 GPS 测量成果 在高程测量方面的应用，这里首先回顾一下关于高程系统的基本概念。通常我们应用的高程系统，主要有大地高程系统、正常高系统和正高系统。

(一) 大地高程系统

大地高程系统，是以椭球面为基准面的高程系统。大地高的定义是，由地面点沿通

过该点的椭球面法线，到椭球面的距离，通常以 H 表示。

因为椭球面在地球内部的位置，决定于椭球体的定位参数 $\Delta X_0 = (\Delta X_0 \Delta Y_0 \Delta Z_0)^T$ 和定向参数 $\omega = (\omega_X \ \omega_Y \ \omega_Z)^T$ ，所以当椭球的定位与定向不同时，相应的大地高程系统也是不同的。如果以 δH 表示不同大地高程系统的高程差，则有关系式

$$\begin{aligned} \delta H = & (\cos B \cos L \quad \cos B \sin L \quad \sin B) \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} \\ & + \left(-\frac{1}{2} N e^2 \sin 2B \sin L \quad \frac{1}{2} N e^2 \sin 2B \cos L \quad 0 \right) \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} \quad (5-3-1) \end{aligned}$$

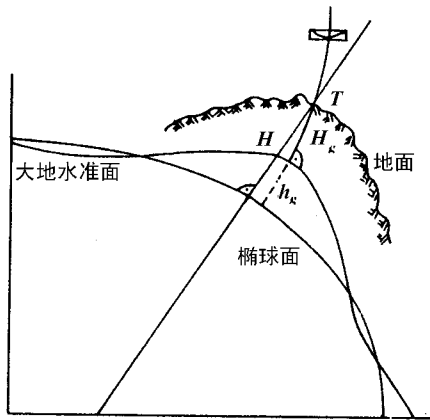


图 5-3-5 高程系统图示

大地高是一个几何量，它不具有物理上的意义。利用 GPS 定位技术，可以直接测定观测站在 WGS-84 中的大地高程。

这一高程系统，在工程技术上虽然没有广泛的应用，但是它在与水准测量资料、重力测量资料相结合，来研究大地水准面的形状方面，或在结合高程异常资料，来确定点的正常高方面，都有重要意义。

(二) 正高系统

以大地水准面为基准面的高程系统，称为正高系统。由地面点，并沿该点的铅垂线至大地水准面的距离，称为正高，通常以 H_g 表示。

大地水准面，是一族重力等位面（或水准面）中的一个，习惯上以它代表地球的实际形状。由于水准面之间的不平行性，所以，过一点并与水准面相垂直的铅垂线，实际上是一条曲线。正高的定义一般表示为

$$H_g = \frac{1}{g_m} \int_0^{H_g} g dH \quad (5-3-2)$$

其中， g_m 为由地面点沿垂线，至大地水准面的平均重力加速度。由于 g_m 无法直接测定，而只能在对地球内部的质量分布，作某种假设的情况下推算，所以严格说来，正高是不能精密确定的。

因为正高是以大地水准面为基准面，具有重要的物理意义，所以它在水利建设、管道和隧道建设等精密工程技术方面，有着广泛的应用。

若以 h_g 表示大地水准面与椭球面之间的差距，则正高与大地高之间的关系，按图 5-3-5 可得

$$H = H_g + h_g \tag{5-3-3}$$

(三) 正常高系统

由于正高实际上是无法严格确定的，所以，为了实用上的方便，根据前苏联大地测量学者莫洛金斯基 (М. С. Мологeнский) 的理论，建立了正常高系统，其定义为

$$H_r = \frac{1}{\gamma_m} \int_{\gamma_m}^{H_r} g dH \tag{5-3-4}$$

其中， γ_m 为由地面点沿垂线，至似大地水准面之间的平均正常重力值，其计算公式如下：

$$\gamma_m = \gamma - 0.3086 \left(\frac{H_r}{2} \right) \tag{5-3-5}$$

式中， γ 为地球椭球面上的正常重力，其关系式已知为

$$\gamma = \gamma_e (1 + \beta_1 \sin^2 \varphi - \beta_2 \sin^2 2\varphi) \tag{5-3-6}$$

其中， γ_e ——椭球赤道上的正常重力值；

$$\beta_1 = -f + \frac{5}{2} \overline{m} - \frac{17}{14} \overline{m} f + \frac{15}{4} \overline{m}^2 ;$$

$$\beta_2 = \frac{1}{4} \left(f \beta_1 + \frac{1}{2} f^2 \right) ;$$

$$\overline{m} = \frac{w^2 a^3}{GM} (1 - f) ;$$

a ——椭球长半径；

f ——椭球极扁率；

w ——地球自转速度；

φ ——地面点的天文纬度。

我国目前采用的是 1901 ~ 1909 年的赫尔默特公式，其参数值为

$$\gamma_e = 978.030$$

$$\beta_1 = 0.005302$$

$$\beta_2 = 0.000007$$

可见，正常重力的平均值 γ_m ，是可以无需任何假设而精密计算的，因而正常高可以精密地确定。

与正常高相应的基准面，通常称之为似大地水准面。因此，也可以说正常高系统，

是以似大地水准面为基准面的高程系统。该系统对工程技术方面的应用来说,同样具有极其重要的物理意义。

任意一点的大地水准面,与似大地水准面之间的差值,由(5-3-2)和(5-3-4)式可得

$$H_{\gamma} - H_g = \frac{g_m - \gamma_m}{g_m} H_{\gamma} \quad (5-3-7)$$

其中, $(g_m - \gamma_m)$ 为重力异常。在高山区重力异常值较大,两基准面之间的高程差,最大可达数米;在平原地区仅为数厘米;而在海洋面上两者相重合。

似大地水准面与椭球面之间的高程差,一般称为高程异常。正常高与大地高之间的转换关系,与(5-3-3)式类似地可得

$$H = H_{\gamma} + \zeta \quad (5-3-8)$$

其中, ζ 为似大地水准面的高程异常。

正常高系统为我国通用的高程系统,在以下有关高程系统的叙述中,如无特别说明,均指正常高系统。

二、研究大地水准面高程的传统方法

大地测量学的重要任务之一,是研究地球的形状和大小。而这一任务,通常可通过确定大地水准面的差距,或似大地水准面的高程异常来实现。

因为研究地球的形状和大小,不仅具有深远的科学意义,而且对测绘工程技术,也有着重要的实用意义。所以,确定大地水准面的差距或高程异常,始终是大地测量学和物理大地测量学的一项迫切任务,从而引起广泛的兴趣和关注。

现代测绘科学研究表明,就整体而言,大地水准面(或称大地体)的形状,大体如图3-12所示。大地水准面是一个不规则的曲面,其高程变化的频谱,大体可分为短波、中波和长波。短波波长一般 $< 100\text{km}$, 中波波长约为 $100\text{km} \sim 1000\text{km}$, 而长波则描述了波长 $> 1000\text{km}$ 的大地水准面特性。

为了说明 GPS 测量在高程测定方面的应用,现在简要地介绍一下,传统上研究大地水准面形状的主要方法及其特点。

(一) 天文大地水准与天文重力水准

假设,椭球面上相邻近的两点 T_1 和 T_n , 其间的距离为 δS , 而方位角为 A ; 同时假设, T_1 点的垂线偏差,在子午圈与卯酉圈上的分量分别为 ζ 和 η , 由此引起似大地水准面的高程增量为 $\delta\zeta$, 则有

$$\delta\zeta = -\theta \delta S - \frac{g - \gamma}{\gamma_m} dH \quad (5-3-9)$$

其中

$$\theta = \xi \cos A + \eta \sin A$$

$$\xi = \varphi - B$$

$$\eta = (\lambda - L) \cos \varphi$$

式中, φ 、 λ 为 T_1 点的天文纬度和经度。

在 (5-3-9) 式中, 最后一项为正常高改正项, 只有在高山区才显得重要。这时, 如果沿路线 $T_1 T_n$ 的垂线偏差均为已知, 则其间的高程异常差, 积分可得

$$\zeta_n - \zeta_1 = - \int_1^n \theta ds - E_{1n} \quad (5-3-10)$$

$$E_{1n} = \int_1^n \frac{g - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} dH + \frac{\gamma_{m1} - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} H_{\gamma_1} - \frac{\gamma_{mn} - \gamma_0^{45}}{\gamma_0^{45}} H_{\gamma_n}$$

其中, γ_0^{45} 为纬度 $\varphi = 45^\circ$ 处椭球面上的正常重力值; γ_{m1} 、 γ_{mn} 分别为 T_1 和 T_n 点, 沿垂线至似大地水准面之间的正常重力平均值。

用该法确定高程异常的精度, 主要决定于天文观测的精度和天文点的密度。根据前苏联的实测资料分析, 天文水准的精度, 可按以下经验公式估算:

$$m_\zeta = \frac{m_0}{\rho} 10^3 \sqrt{S \cdot L_a} \quad (5-3-11)$$

其中, m_ζ ——天文水准的中误差 (m);

m_0 ——天文点间垂线偏差平均值的代表性误差;

S ——天文点的间距 (km);

L_a ——天文水准路线长度 (km)。

当取 $m_0 = \pm 1''.7$, $S = 100\text{km}$, $L_a = 4000\text{km}$ 时, 则有 $m_\zeta = \pm 5.3\text{m}$; 而当取 $S = 36\text{km}$, $m_0 = \pm 1''.0$ 时, 则在同样路线长度情况下, 可得 $m_\zeta = \pm 1.9\text{m}$ 。可见, 加密天文点, 对提高天文水准的精度, 具有决定性的意义。但是, 由于天文观测的费用较高, 天文点的间距一般较远, 例如在我国, 天文点的间距平均约在 100km 左右。这样对于其间垂线偏差的变化情况, 就必须作出某种假设, 以便进行内插。考虑到垂线偏差的变化, 与地形的状况密切相关 (尤其在山区), 所以较精确地模型化是比较困难的。由于天文观测点分布稀疏, 可靠地内插垂线偏差也比较困难, 这样一来, 严重地限制了天文大地水准的精度和应用。为此, 莫洛金斯基运用了, 与垂线偏差的变化密切相关的重力异常资料, 建立了确定高程异常的天文重力水准法。

天文重力水准法, 是综合应用天文大地测量资料和重力测量资料, 来研究似大地水准面高程的方法。这里, 重力测量资料, 主要用来顾及相邻天文点之间, 天文大地垂线偏差的非线性变化。这一方法内插垂线偏差的精度, 一般约为 $\pm 0''.5 \sim 1''$ 。在重力测量资料比较充分的地区, 当天文点的间距小于 100km 时, 该法所确定的高程异常差的精度, 可达分米级, 甚至厘米级。

例如, 当天文点的距离平均为 100km, 并在其周围半径约为 50km 的范围内, 具有必要的重力测量资料时, 天文重力水准的精度可按下式估算:

$$m_\zeta = \mu_\zeta \sqrt{L_a} \quad (5-3-12)$$

式中, μ_ζ 为天文重力水准每公里路线的中误差, 在所述情况下, $\mu_\zeta \approx \pm 3\text{cm}/\sqrt{\text{km}}$

我国曾采用天文重力水准法，确定了我国的高程异常。在我国大陆部分，高程异常的变化情况，大体如图 5-3-6 所示。其中高程异常的精度，在地势平坦地区，估计约为 $\pm 1\text{m}$ ，而在高山地区，其精度估计仅为数米。

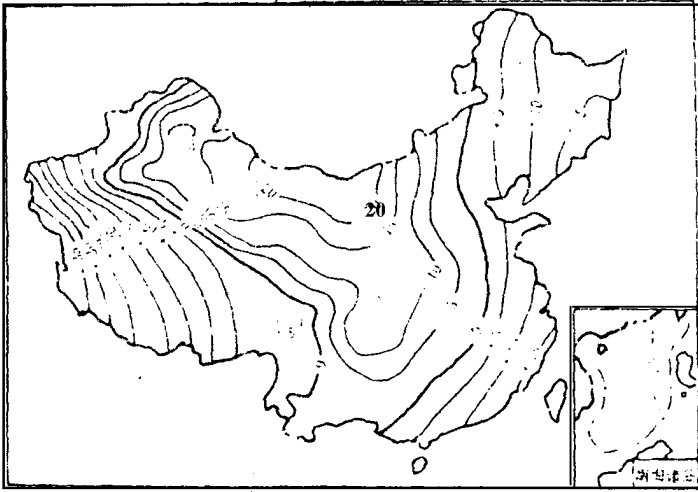


图 5-3-6 我国大地水准面略图 (1980 大地基准), 单位为米

(二) 重力场模型法

随着现代科学技术的发展，综合利用卫星观测资料和重力测量资料，以球谐级数建立地球重力场模型和高程异常模型的方法，得到了广泛地应用。

假设，一点的球面坐标为 (Φ, Λ, R) ，则以截断球谐级数表示的大地水准面高为

$$\zeta = \frac{GM}{R\gamma} \sum_{n=2}^n \left(\frac{a_m}{R} \right) \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin\Phi) (C_{nm} \cos m\Lambda + S_{nm} \sin m\Lambda) \quad (5-3-13)$$

其中， a_m ——地球平均半径；

GM ——引力常数与地球质量的乘积；

γ ——计算点的正常重力；

$P_{nm}(\sin\Phi)$ 为 n 次 m 阶勒让德函数；

C_{nm} 、 S_{nm} 为球谐系数。

很明显，要获得较高的分辨率，以上球谐函数的级数展开式，必须取至足够的项数。目前包含 180×180 阶次的重力场模型，和相应的大地水准面高程模型已得到应用。而含至 360×360 阶次的重力场模型也已建立。由包含 180 阶次的重力场模型，导出的全球大地水准面，其分辨率约相当于 100km 的半波长，高程异常的估算精度，约为 $\pm 1\text{m} \sim 2\text{m}$ 。

以球谐系数表示大地水准面的模型，其主要优点在于：

(1) 适用于全球。只要给出待求点的地理位置，便可在计算机上计算相应的大地水

准面高程：

(2) 所确定的大地水准面高程，属于地心参考系统，易于和 GPS 测量基准相联系。这种模型化的主要缺点，是随着展开式阶次的提高，球谐系数的数量将迅速增加。例如，当取 36×36 阶次时，球谐系数约为 1360 个；而当取 180×180 阶次时，球谐系数约为 32760 个。

(三) 斯托克斯重力大地水准面模型法

早在 1849 年，斯托克斯 (G.G.Stokes) 曾提出一种利用地面重力观测资料，推算大地水准面高程的实用方法。这一方法，曾在重力资料比较丰富，而缺乏天文大地观测资料的地区得到应用。它的基本数学形式如下：

$$\zeta = \frac{a_m}{4\pi\gamma_m} \iint_{\sigma} S(\psi) \Delta d\sigma \tag{5-3-14}$$

- 其中， $d\sigma$ ——地表的面元素；
- ψ ——计算点的地心向径和面元素 $d\sigma$ 的夹角；
- a_m ——地球平均半径；
- γ_m ——平均正常重力值；
- Δg ——与面元 $d\sigma$ 有关的重力异常；
- $S(\psi)$ 称为斯托克斯函数。

在理论上，(5-3-14) 式要求对整个地球表面进行积分，所以，大地水准面上，任何地点的重力异常值均须已知。可是，实际上许多国家在其领域的边远地区、高山地区以及广阔的海洋地区，均缺少必要的重力资料，这便给上式的实际应用造成困难。

理论分析表明，远离计算点地区的重力异常，对 (5-3-14) 式的影响，随 ψ 角的增大而迅速减小，所以为了实用上的方便，该式的积分范围，一般仅限于 ψ 角为 $1.5^\circ \sim 30^\circ$ 的地区。除此以外地区（或称远区）的重力异常，对大地水准面高程的影响，可以借助重力场球谐函数模型加以估算。

由此，根据上述方法所确定的大地水准面高，其误差主要取决于计算区域内重力点的密度和精度，以及估算远区重力异常影响的模型误差。

目前，一些国家利用丰富的重力测量资料，确定的大地水准面高程，其精度可达分米级。但是，一般来说，由于地面重力资料分布不匀，加之往往缺少足够精确的重力数据，所以，这一方法在实用上，有时尚难以达到预期的精度。

三、确定正常高的 GPS 高程法

为了与传统的解决高程问题的方法相区别，在以下叙述中，我们把综合利用 GPS 测量资料 and 大地水准面资料，确定观测站高程的方法，称为 GPS 高程法。

由 (5-3-8) 式可知，当点的大地高 H ，由 GPS 测量已经确定，而相应的高程异常，也已由前述方法求得时，则计算点的正常高，便可按下式确定：

$$H_{\gamma} = H - \zeta \quad (5-3-15)$$

对于任意两点间的正常高差，按上式可得

$$\Delta H_{\gamma i j} = \Delta H_{ij} - \Delta \zeta_{ij} \quad (5-3-16)$$

这里，两点之间的高程异常差，原则上可以根据已有的高程异常等值线图内插求得，或利用大地水准面高程的球谐函数展开式（5-3-13）计算而得。如果已知某一起始点的正常高 $H_{\gamma 0}$ ，则任一计算点 k 的正常高，可按式推算：

$$H_{\gamma k} = H_{\gamma 0} + \sum_{i=0}^{k-1} \Delta H_{\gamma(i+1)} \quad (5-3-17)$$

可见，由此所计算的正常高的精度，主要决定于大地高程差和高程异常差的精度；其中大地高程差，可利用 GPS 定位技术精确地测定，而高程异常差的精度，与其计算方法及其所利用的资料密切相关。当利用天文水准的高程异常图，内插并计算其高程差时，其精度将受到天文观测精度和天文点分布密度的限制。应用天文重力水准，将会弥补因天文点间隔过大，对所求高程异常精度的不利影响，但它要求具有一定密度和精度的重力资料，这在高山区往往也是比较困难的。当重力测量资料充分时，预计用这种方法，可使内插高程异常差的精度，达到分米级或优于分米级。

另外，应强调指出，用天文大地水准和天文重力水准所确定的高程异常，一般是属于非地心参考系统，因此，当采用（5-3-16）式推算正常高差时，应注意使其与大地高差的参考系相一致。

当利用地球重力场模型（5-3-13），计算似大地水准面的高差时，其精度主要取决于，模型对似大地水准面短波的分辨能力。即使采用 180×180 阶次的球谐函数模型，一般也只能分辨，半波长约为 100km 的大地水准面的特征。用这一方法计算的高程异常差，其精度目前尚难以与大地高程差的精度相匹配。

当用重力测量方法，推求基线端点间的高程异常差时，只要重力测量资料的质量可靠，且密度充分，将可使高程异常差的精度，达到分米甚至厘米级，这样，便可以同样的精度，按（5-3-17）式确定点的正常高。不过，考虑到我国地域广阔，地势复杂，重力资料分布不匀，采用这一方法达到上述精度，目前还是困难的。

由上述可见，利用 GPS 大地高程资料，精密确定点的正常高，其关键在于获取精密的高程异常资料。而 GPS 测量资料与水准测量资料相结合，为精密确定区域性似大地水准面的高程，开辟了重要的新途径。

（四）确定高程异常的 GPS 水准法

这里，我们把综合利用 GPS 测量和水准测量资料，确定高程异常的方法，称为 GPS 水准法。

这一方法的深入研究与实践，使大地水准面的精密确定，产生了突破性的进展，从而引起了用户的广泛重视。

利用 GPS 测量直接给出的大地高程数据，结合精密水准测量资料，按（5-3-8）式便可以确定计算点的高程异常，其精度主要决定于 GPS 测量的精度。这一方法的优

点是，概念明了，计算简单，精度高。不过，为描述大地水准面变化的细节，它需要布设均匀的、密度充分的 GPS 观测点，并且在这些点上，需要同时具有精密的水准测量资料。这些要求在实际工作中有时会遇到困难。但是可以预期，随着 GPS 定位技术的发展和普及，布设足够密度和精度的 GPS 观测站，将变得容易实现。另外我们相信，GPS 测量和水准测量资料，与重力测量资料（或地形资料）相结合，来精密确定大地水准面的高程，将是一种富有潜力的方法。

由于 GPS 相对定位，可以确定高精度的三维基线向量，所以利用相对定位结果，可能获得高精度的大地水准面高程差的资料。如果我们将（5-3-8）式应用于任意 i、j 两点，并取其差值，则可得

$$\Delta\zeta_{ij} = \Delta H_{ij} - \Delta H_{yij} \tag{5-3-18}$$

其中，两点之间的正常高差 ΔH_{yij} ，可通过水准测量精密地确定，大地高差 ΔH_{ij} ，可由 GPS 高精度相对定位法确定。实践表明，目前在 $< 100\text{km}$ 的基线上，利用 GPS 相对定位技术，确定大地高差的精度，可达基线长度的 $1 - 2\text{ppm}$ （例如， 20km 的基线约为 $2\text{cm} \sim 4\text{cm}$ ）。由此，确定基线两端点大地水准面的高程差，其精度也应与此相当。

如果以 ζ_0 表示基准点的大地水准面高程，则根据上述已知的高程异常差，便可推算任一计算点的大地水准面高程，其一般形式为：

$$\zeta_k = \zeta_0 + \sum_{i=0}^{k-1} \Delta\zeta_{(i+1)} \tag{5-3-19}$$

因为，高程异常是以椭球面为基准的似大地水准面高程，所以，其数值既与所取椭球参数有关，也与椭球在地球内部的定位与定向有关。

若仍取以下符号，表达两参考系之间的相互关系

$\Delta X_0 = (\Delta X_0 \ \Delta Y_0 \ \Delta Z_0)^T$ 为相对位置参数向量；

$\omega = (\omega_X \ \omega_Y \ \omega_Z)^T$ 为相对定向参数向量；

m ——相对尺度参数；

Δa ——椭球长半轴之差；

Δf ——椭球极扁率之差，

则由此引起两系统的高程异常差 $\delta\zeta$ 为

$$\begin{aligned} \delta\zeta = & \cos B \cos L \Delta X_0 + \cos B \sin L \Delta Y_0 + \sin B \Delta Z_0 - \frac{1}{2} N e^2 \sin^2 B \sin L \omega_x \\ & + \frac{1}{2} N e^2 \sin^2 B \cos L \omega_y + N (1 - e^2 \sin^2 B) m - (1 - e^2 \sin^2 B)^{\frac{1}{2}} \Delta a \\ & + N \sin^2 B (1 - e^2)^{\frac{1}{2}} \Delta f \end{aligned} \tag{5-3-20}$$

这种差异，在不同系统的高程异常资料相比较时，应加以考虑。

在一个区域性的测区内，我们可以根据地形情况，选取一些分布适宜，密度充分的 GPS 观测点，并进行水准联测，以精确获得这些点的高程异常。为了叙述的方便，在以下我们称这些点为已知高程异常点。

为了描述区域性高程异常的变化规律，并方便用户使用，目前普遍采用的方法，主要有等值线图示法和解析法。

(一) 等值线图示法

这种方法，首先要根据上述各已知点的高程异常值，绘出测区高程异常的等值线图，然后利用内插方法确定未知点的高程异常。在地形比较平坦的地区，由此内插高程异常的精度，可达厘米级。

当水准测量资料充分时，这一方法所求高程异常的精度，主要取决于 GPS 观测点的分布与密度，以及大地高的测定精度。当区域较大，GPS 点的分布较为稀疏时，应综合利用重力测量资料（或地形资料），以顾及 GPS 点间高程异常的非线性变化。

图示法的主要优点是，高程异常变化的趋势直观，使用方便。其缺点是，高程异常值将受到等值线图绘制精度和内插误差的影响。

图 5-3-7 是我国沧州地区的高程异常图，其中略去了坐标公里线，仅供读者参考。

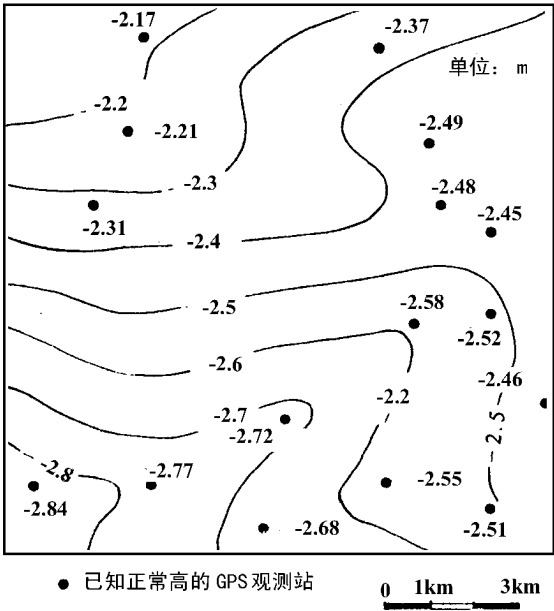


图 5-3-7 沧州地区似大地水准面高程等值线图

(二) 解析法

所谓解析法，即采用某种规律的数学面，来拟合测区的似大地水准面。当这一描述测区似大地水准面高程的数学模型建立后，根据网点的位置参数，便可计算测区内任一点的高程异常值。显然，这时计算高程异常的精度，主要决定于所采用的数学面与测区似大地水准面的拟合程度。所以，确定高程异常的解析法，其主要任务在于，建立既能与测区似大地水准面最佳拟合，又便于应用的数学模型。

假设, x 、 y 为任一点的平面坐标, 则其高程异常, 可一般地表示为

$$\zeta = f(x, y) \quad (5-3-21)$$

在高程异常已知的点上，则可写出

$$\zeta_i = f(x_i, y_i) = H_i - H_{\gamma_i} \quad (5-3-22)$$

这里, $f(x, y)$ 为与测区似大地水准面相拟合的数学面。根据测区的实际情况, $f(x, y)$ 可取以下几种常用形式:

平面拟合： $f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y$

$$\text{二次曲面拟合: } f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (5-3-23)$$

$$\text{二次曲面拟合: } f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3$$

其中, a_i ($i=0, 1, \dots, 9$) 为拟合面的系数。

可见,建立拟合似大地水准面数学模型的工作,主要在于根据测区实际情况,选择适宜的拟合面,并根据已知点的高程异常,用最小二乘拟合法确定拟合面的系数。现以二次拟合面为例,说明如下。

在已知高程异常的点上，根据(5-3-22)和(5-3-23)式，可写出误差方程组的一般形式

$$V = A_X + L \quad (5-3-24)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}$$

$$L = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n]^T$$

n 为已知高程常数的点数。

由此，通过最小二乘法求解系数阵

$$\mathbf{x} = - (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}) \quad (5-3-25)$$

其中, P 为已知高程异常的权阵。

实践表明,在地势较为平坦的地区,当已知高程异常的点,密度适当,分布比较均匀时,该法计算高程异常的精度,可达厘米级。

在山区，大地水准面的起伏较大，按上述方法建立的模型，其模型误差往往较大，据以计算的高程异常的精度，将难以达到代替三、四等水准测量的要求。在这种情况下，一般可采用以下方法加以改善。

(1) 根据测区地形情况，适当增加已知高程异常点的密度，并改善其分布；

(2) 综合利用测区的重力测量资料，改善模型对高程异常的分辨率；

(3) 考虑到高程异常与测区地形的密切相关性，在模型中可引入地形影响的改正期，以提高确定高程异常的精度。

由以上叙述可见，在具有精密水准测量资料时，利用 GPS 测量成果，可以精密地确定大地水准面的高程；而反之，当详细掌握了有关大地水准面高程资料时，利用 GPS 测量成果，便可确定点的高程。随着 GPS 定位技术的发展和普及，尤其对于城市和矿山等区域性的测量工作来说，GPS 测量成果在上述两方面的应用，都有广阔的前景。

第三节 GPS 定位技术在地球动力学研究方面的应用

一、地球动力学概述

地球动力学是由地球物理学、大地构造学、大地测量学和天体测量学等学科，相渗透而形成的一门新的学科。地球动力学的基本任务，是应用上述各学科方法来研究地球的动力学现象及其机理。它的内容主要涉及到地球的自转和极移，地球重力场及其变化，地球的潮汐现象以及地壳运动等。

精密 GPS 定位技术的发展，为地球动力学的定量研究，提供了极其重要的新手段，从而具有划时代的意义。尤其在地壳运动的监测方面，高精度的 GPS 相对定位方法，表现了巨大的潜力。这里，我们将主要以地壳运动的监测为例，来简要地介绍一下，GPS 定位技术目前在这一领域的应用情况及其深远意义。

在大地构造学中，关于全球大陆和海洋的分布现状是如何形成的，它的过去和现在有什么不同，今后的变化趋势及其机理是什么？一直是最活跃的研究领域之一，它的研究成果，与经济建设和人民生活息息相关。

早在 1912 年，德国科学家魏格纳（A. Wegener），根据地壳均衡理论和大西洋两岸的海岸轮廓、地壳、岩石、古生物群的对应性和相应性，以及古气候等资料，提出了大陆漂移的学说。认为在石炭纪前（约 3 亿年前），全球只有一个大陆（称为泛大陆）和一个大洋（泛大洋）。自中生代开始（约 2.3 亿年前），泛大陆逐渐破裂分离，产生漂移，形成了现在的海陆分布（见图 5-3-8）。

从 20 世纪 50 年代以来，由于古地磁学、海底地貌学、海洋地质学、地球物理学以及深海探测技术的迅速发展，不仅为大陆漂移学说提供了新的强有力的证据，而且进一

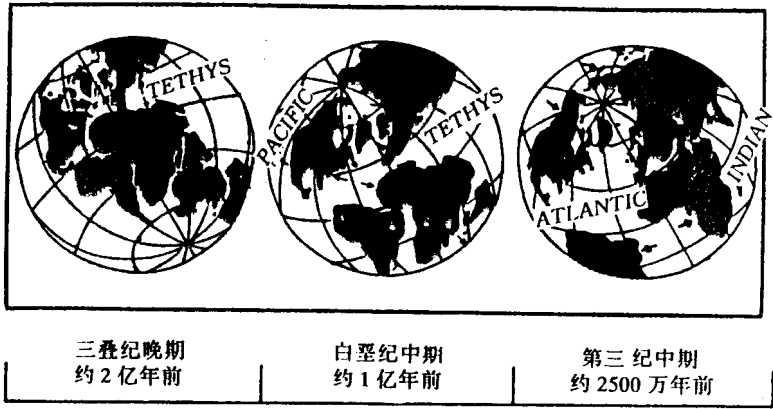


图 5-3-8 泛大陆分裂与漂移过程示意图^[282]

步发展为海底扩张说，对大陆漂移的动力机制，作出了更有力的解释。海底扩张说认为，大陆硅铝层作为岩石圈的一部分，在地幔对流的作用下，在软流圈之上产生“被动”地飘移*。

在海底扩张学说的基础上，1968 年摩根（Morgan，w.J.）和勒比雄（Le Pichon，X.），发展了一种崭新的大地构造理论，即板块构造说。板块构造说认为，位于软流圈之上的岩石圈，被一些构造活动带分割成许多既不连续，又不相互嵌接的球面块体。每一块体厚约 20~150km，呈板状，故称为岩石圈板块（简称板块）。由于对流层的对流作用，各板块均在不停地运动，边生成、边移动、边消逝。在板块运动过程中，板块之间产生相对的滑动和俯冲，因此，板块边缘是地球表面最活跃的地带，大多数地震、火山都分布在这里。板块的相互作用，即板块的运动，是形成地表各种构造活动和变形的根本原因。

根据勒比雄的观点，全球可划分为六大板块，即太平洋板块、欧亚板块、印度洋

* 根据大地构造学，地球内部的主要分层如下表所列。

地 球 内 部 的 主 要 分 层			深 度（km）
地 壳	岩石圈	地壳	0 ~ 33
		上地幔	33 ~ 410
地 幔	软流圈	过渡带	410 ~ 1000
	中间圈	下地幔	1000 ~ 2900
地 核	地 核	外 核	2900 ~ 4980
		过渡层	4980 ~ 5120
		内 核	5120 ~ 6370

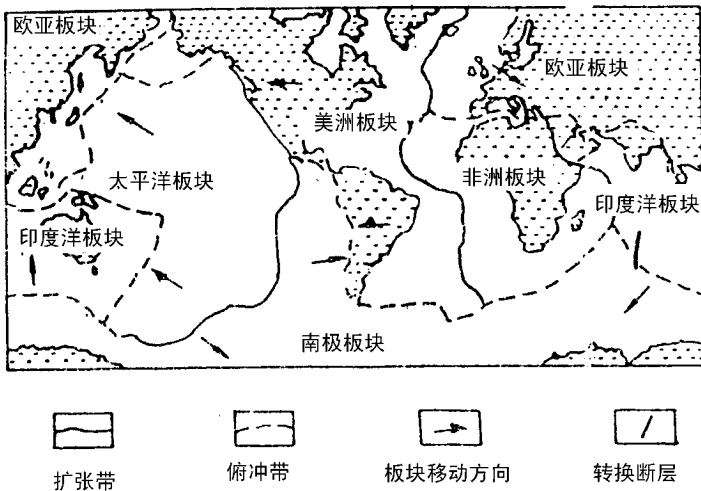


图 5-3-9 岩石圈板块的现代位置和推断的移动方向

(大洋洲) 板块、非洲板块、美洲板块和南极洲板块，其中除太平洋板块全为海洋外，其余板块均含有陆地和大洋。后来美国人麦肯齐 (D.P. McKenzie) 等人，又将美洲板块细分为南、北美洲板块、可可板块、加勒比板块、纳森板块和斯可等板块；欧亚板块又分为菲律宾板块、阿拉伯板块、中国板块、伊朗板块和土耳其板块等。我国位于欧亚板块，邻接太平洋板块和印度洋板块。

板块的生成、演变和区分是复杂的，但是，随着科学技术的迅速发展，人们对它的认识，将不断地深入和完善。研究板块的运动及其动力学机理，对发展大地构造学的理论，掌握板块运动的规律以及对地震等自然灾害的预测，都有着极其深远的意义。

二、GPS 对研究板块运动的意义

空间大地测量学的发展，为精确地研究板块运动的规律，开辟了重要的新途径。高精度的 GPS 卫星定位技术，已经日益普遍地应用于板块运动的监测，并已取得了良好的结果。现有观测数据的分析表明，欧亚板块与太平洋板块间的相互运动速度约 $1\text{cm}/\text{年}$ ，北美板块与太平洋板块间的相对运动速度约为 $5\text{cm}/\text{年}$ ，而北美板块内部的变形不超过 $1\text{cm}/\text{年}$ 。

由于板块间相对运动的速率很小，要精确地分辨有关板块运动的信息，要求相对定位精度应小于 10^{-7} (0.1ppm)。这对经典大地测量技术来说，是难以达到的。目前，研究全球板块运动的主要设备，是甚长基线干涉测量系统 (VLBI) 和卫星激光测距系统 (SLR)。VLBI 的特点是基线长、精度同。实践表明，对于几千公里长的基线，其定位精度可达数厘米，即相对精度约达 10^{-8} ；而利用 SLR 也可以达到相似的精度。但是，这两种定位技术的共同缺点，是设备较为复杂，投资巨大，只能在少数的基准站使用，用于全球性板块运动的研究。根据经验，一般大的形变均接近于板块的边缘，典型的板块

边界宽约为 30 ~ 300km。所以，就地区性板块运动的研究工作而言，尤其当观测站数较多时，GPS 测量技术具有显著的优越性。

一般来说，在采用精密星历和适当的观测方案，以及严格的数据处理技术时，目前，长距离 GPS 定位的相对精度，亦可达 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ ，也就是说，对 1000km 长的基线，相应的精度为 10cm ~ 1cm。考虑到板块运动的速率，每年只有数厘米，数值微小，所以只有在板块构造活动的地区（例如断层带周围），布设 GPS 监测网，并以适当的时间间隔进行重复观测，才有可能较为明显地检测出板块间的相对运动信息。GPS 监测网点必须选在地质构造稳固的地区，并远离活动断裂带或挤压破碎带。监测网的图形，一般应选择三角形或大地四边形，以充分保障网的强度和可靠性。

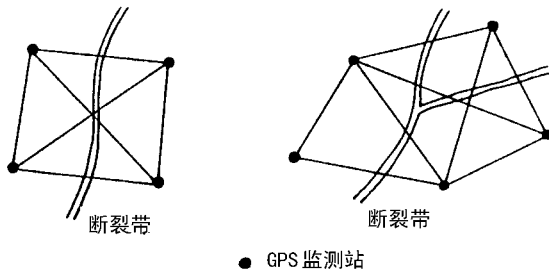


图 5-3-10 地区性板块运动监测网布设示意图

在高精度的 GPS 测量中，影响定位精度的因素主要包括：

- (1) 卫星轨道精度；
- (2) 接收机振荡器的稳定度；
- (3) 对流层折射的修正精度；
- (4) 数据的后处理技术；
- (5) 起始点坐标的精度。

为了使基线达到 10^{-7} 的相对精度，卫星轨道误差必须小于 $\pm 2\text{m}$ 。因此，这时须采用后处理的精密星历，并采用轨道改进法处理观测数据；或者同时在坐标精确已知的参考站上（例如 VLBI 站或 SLR 站）进行观测，以便推算在观测期间的轨道改正。

为了提高接收机振荡器的稳定度，可以采用高稳定度的外接频率标准（如铯钟、铷钟等），而为了减弱对流层折射的残差，可以考虑采用水质辐射计，以提高估算对流层改正的精度。

为了分析 GPS 长基线相对定位的精度，早在 1985 年，美国喷气推进实验室（JPL-Jet Propulsion Laboratory），曾组织了一次高精度的长基线观测试验。在美国境内共设有十个观测站（见图 5-3-11），其中六个测站与永久性的 VLBI 站重合，还有一个测站（Mammoth Lakes）也由流动的甚长基线干涉仪观测过。所有观测站均用 TI-4100 双频 GPS 接收机进行了观测。在 Mojave 和 Big Pine 两站上，还用 SERIES—X 接收机进行了观测。另外，在 Westford、Richmond 和 Ft Davis 三个站上，用双频接收机 Macrometer II 观测过。在观测中，接收机使用了各种不同的频率标准，如氢脉泽钟、铯原子钟和铷原子钟。为

了提高对流层折射改正的精度，在 Mojave、Hat Creek 和 Big Pine 三个站上使用了水汽辐射计。另外，在数据处理中，还同时利用多个测站的观测资料，对卫星的轨道进行了改正。观测资料的分析表明，GPS 测量的结果和 VLBI 测量的结果相比，其符合精度约为 10^{-7} 。随后的类似实验进一步表明，对长达 1000km 的基线，GPS 相对定位精度亦可达约 10^{-8} 。这显示了 GPS 定位技术，在长基线相对定位中的潜力。

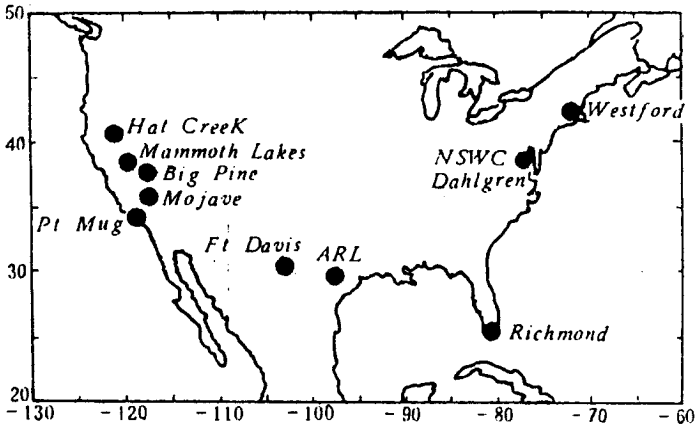


图 5-3-11 1985 年美国 GPS 长基线试验观测站

由于高精度的 GPS 定位技术，可以精确提供有关板块运动的四维信息（空间和时间），而且其设备简单，作业方便，所以，它不仅在监测区域性板块运动和板块内的地壳变形方面，具有广阔的应用前景，而且在监测全球性的板块运动方面，也可与其它空间定位技术相媲美。

目前，高精度 GPS 定位技术，在监测板块运动方面的应用，发展极为迅速，并取得了重要成果。例如，为了监测北美洲板块和太平洋板块的相对运动，1985 年著名的圣安德烈斯断层两侧，沿加利福尼亚湾布设了一个三角形监测网（图 5-3-12），其边长分别为， $T_0T_1 = 650\text{km}$ ， $T_0T_2 = 350\text{km}$ ， $T_1T_2 = 450\text{km}$ 。

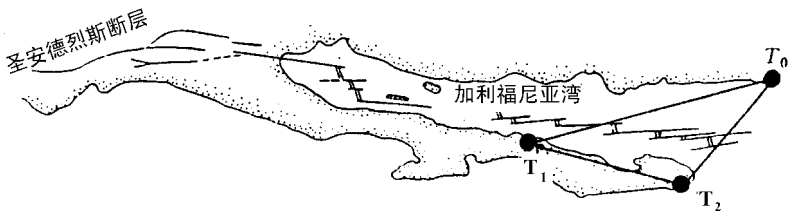


图 5-3-12 加利福尼亚湾板块运动监测图

根据 1985 年和 1989 年的观测结果，求得两大板块的相互运动速度如表 5-3-3 所列。

表 5-3-3

板块运动速度和方位

基 线	T_0T_2	T_0T_1	T_1T_2
运动速度 (mm/年)	47 ± 6	44 ± 8	4 ± 9
运动方位 (°)	北西 57	北西 53	——

根据 VLBI 的观测结果已知，上述太平洋板块相对北美洲板块的运动向量，长度约为 50mm/年，方向为北西 40°；而根据代梅特（C·Demeter）等人，于 1990 年提出的现代板块运动全球模型（称为 NUVEL-1）计算的结果，相应为 49mm/年，北西 38°。可见，在观测精度范围内三个结果是一致的。这充分说明，利用高精度的 GPS 定位技术，监测地球板块运动的精确性与适用性。可望，随着 GPS 接收设备和数据处理技术的不断发展和完善，GPS 定位技术，将为地球动力学的各个研究领域，作出划时代的新贡献。

第四节 GPS 定位技术在海洋测绘方面的应用

世界上海域辽阔，资源丰富。海洋开发工程，已成为沿海各国经济建设的一项重要任务。海洋测绘，作为海上一切经济和科学活动，以及军事活动的基础，日益受到广泛的重视。现代海洋测绘是综合大地测量学、海洋科学、电子技术和空间技术，而发展起来的一门边缘学科，其主要内容包括

- （1）海洋资源与地球物理勘探；
- （2）海洋大地测量；
- （3）水深测量；
- （4）海底与海面地形测量；
- （5）海洋划界；
- （6）各种海洋工程测量等。

海洋测绘工作，涉及面广，内容丰富，为 GPS 定位技术的应用，开辟了更为广阔的领域。下边我们仅就海洋资源勘探和海洋大地测量工作，概要地介绍一下 GPS 定位技术的应用情况和潜力。

一、在海洋资源勘探方面的应用

海洋资源的勘探和开发，已引起各沿海国的广泛重视。尤其大陆架石油的勘探与开发，目前已成为各沿海国家的重点工程。

海洋资源与地球物理勘探，包括海洋重力测量、海洋磁力测量和海底地形测量等，而这些测量工作，均以精密的定位为基础。容易理解，资源勘探中的任何一个观测量，如果缺少具有一定精度的位置信息，将失去意义。为此，GPS 实时动态定位技术，提供

了理想的定位手段。

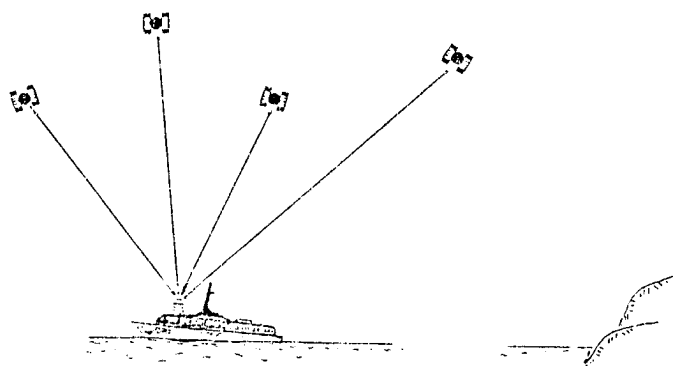


图 5-3-13 海上 GPS 绝对定位（单点定位）

当采用一台 GPS 接收机进行单点定位（绝对定位）时，其实时定位的精度，随应用的测距码不同而异。目前，采用 P 码单点定位的精度为 $5\text{m} \sim 10\text{m}$ ；C/A 码为 $20\text{m} \sim 40\text{m}$ ，在 SA 的影响下，将下降为 $100\text{m} \sim 150\text{m}$ 。

对于多数海洋定位工作，上述精度是可以满足要求的。但是，如果要求定位的精度较高，则可采用差分 GPS 定位方法（DGPS）。这时可在海岸或岛屿上，选择一稳固的观测站，作为相对定位的基准站。而当要求实时定位时，还应在运动的观测站与基准站之间，建立实时数据传输系统。实践表明，以 C/A 码伪距观测量为根据的动态相对定位，可以有效地减弱 SA 的影响，其精度可达米级。

在海洋资源普查、详查和开发的各个阶段，GPS 均可提供可靠的导航和测量服务，以保障船只准确地按预定的计划航行，同时准确地测定采样点的位置。尤其在海洋石油资源的开发中，当钻井平台根据设计图定位时，或当钻井平台中途停站并迁移，而过后再复位时，往往要求定位的精度较高，对此，以测相伪距为观测量的高精度 GPS 相对定位技术，将是一种经济和可靠的方法，其精度可达厘米级。

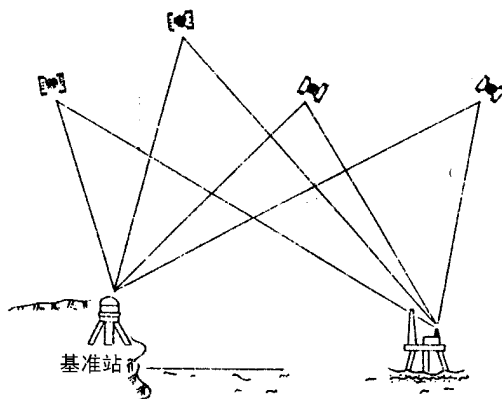


图 5-3-14 GPS 监测海上勘探平台沉降示意图

二、在海洋大地测量方面的应用

海洋大地测量工作主要包括

- (1) 海洋大地测量控制网（或点）的建立；
- (2) 海洋大地水准面的测定；
- (3) 海岛联测；
- (4) 海洋重力测量等。

其中，建立海洋大地测量控制网，为海底和海面地形测绘、海洋资源开发、海洋工程建设、海洋划界和海底地壳运动的监测等服务，是经典海洋大地测量的一项基本任务。

海洋大地控制网，是由分布在岛屿、暗礁上的控制点和海底的控制点所组成。经典的海洋大地测量方法，由于受点间距离、通视条件以及动态的海洋作业环境等限制，建立规模较大，精度较高的海洋大地控制网，是甚为复杂和困难的。

由于 GPS 测量所具有的特点，使其成为当前建立海洋大地控制网（或点），以及进行海洋大地控制网与陆地大地网联测的有效方法。

对于岛、礁上的控制点，可以直接应用第七章所介绍的精密 GPS 相对定位法，确定其在统一参考系中的坐标。而对于海底控制点的测定则较为复杂，其与陆上控制点的定位方法完全不同。

海底控制点，需埋设固定标志并安置水声应答器，以便测定海底控制点与海上测量船之间的距离。应用 GPS 定位技术测定海底控制点的位置，一般包含了以海上测量船（或水面浮标）为中介的两个同步测量过程，即利用测量船上的用户 GPS 接收机，同步观测四颗以上的 GPS 卫星，以确定测量船（中介点）的瞬时位置，同时应用海底水声应答器，同步测定中介点至海底控制点的瞬时距离，以确定水下控制点的位置。为此，测量船的接收机对 GPS 卫星的观测，与测量船利用水声应答器的观测必须同步（见图 5-3-15）。

假设， $P_i(t)$ 是测量船（即中介点）的瞬时位置， T_0 为设在海岸或岛礁上的基准点， T_k 为水下控制点。这里，中介点 $P_i(t)$ 于观测历元 t 的瞬时位置，可以通过 GPS 动态相对定位技术精密确定。如果测量船的接收机，在同步观测 GPS 卫星定位的同时，亦利用海底水声应答器，同步测定了中介点 $P_i(t)$ 至海底控制点 T_k 之间的距离 $D_{ik}(t)$ ，则由此可得基本观测方程如下：

$$D_{ik}(t) = \{ [X_i(t) - X_k]^2 + [Y_i(t) - Y_k]^2 + [Z_i(t) - Z_k]^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (5-3-26)$$

其中， $[X_i(t), Y_i(t), Z_i(t)]$ 为中介点在协议地球坐标系中的瞬时坐标，为已知量； (X_k, Y_k, Z_k) 为海底控制点在同一坐标系中的坐标，为待定量。

容易理解，这时为确定海底控制点的位置，在理论上，至少需要沿船于三个不同位置的同步观测结果，并且要求中介点的三个位置，与海底控制点构成良好的图形。

以上是综合利用全球卫星定位系统和海底水声应答器，测定水下大地控制点的基本

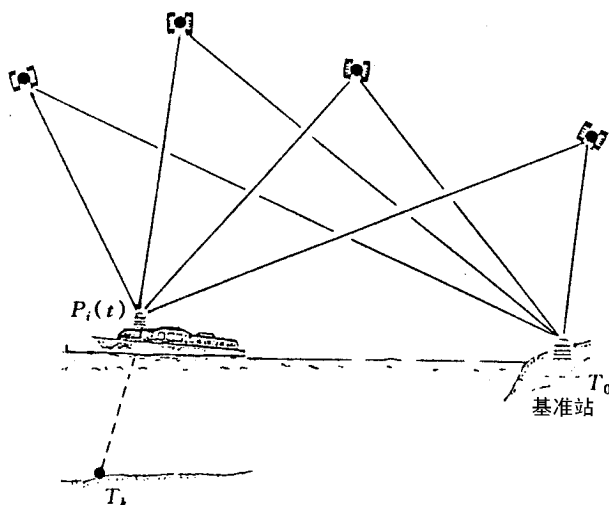


图 5-3-15 GPS 在测定海底控制点中的应用示意图

思想。在实际工作中，无论是观测方案的设计，或数据处理方法，都将复杂得多，对此这里就不详述了，有兴趣的读者可参阅有关文献。

第五节 GPS 定位技术在精密工程测量和工程变形监测方面的应用

一、在精密工程测量中的应用

工程测量，通常是指与工程勘察设计、施工、验收与设备安装有关的应用性测量工作。工程测量的范围极广，以至这里难以详细列出，GPS 测量技术可能应用的工程测量种类。

根据 GPS 测量精度高、速度快、作业简便等特点，它除广泛地用于一般工程测量外，在下列各类工程建设中，将有着重要的作用。

- (1) 桥梁工程；
- (2) 隧道与管道工程；
- (3) 海峡贯通与联接工程；
- (4) 精密设备安装工程等。

下边，我们通过两个精密工程的典型情况，来说明一下 GPS 测量的广泛用途。

例 1 在直线加速器控制测量中的应用

1984 年 8 月，Geo/Hydro 公司曾用 Macrometre V-1000 型 GPS 接收机，在美国斯坦

福直线加速器（Stanford Linear Collider – SLC）工程中，承担了精密控制测量工作，该控制网的布设如图 5-3-16 所示。

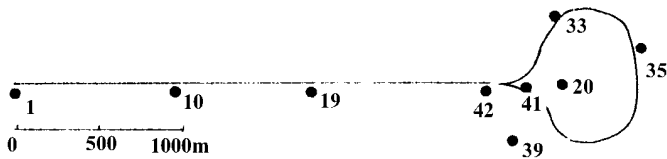


图 5-3-16 GPS 测量在斯坦福加速器控制工程中的应用

直线加速器安置在直线部分，粒子要在直径约为 1km 的环形通道上相撞。为了大环形通道内安装上千块磁铁，必须布设一个高精度的控制网，其点位误差要求不大于 $\pm 2\text{mm}$ 。由于该网布设范围仅约 4km，在 GPS 相对定位中，卫星轨道误差的影响不大，电离层和对流层的影响也基本可以消除，定位的精度将主要受相位观测误差、天线相位中心偏差和多路径效应的影响。该公司用所述 GPS 接收机，在九个测站上（直线部分四个站，其余位于环形部分）进行了精密的 GPS 测量，观测数据经综合处理后得出，控制点的水平位置精度约为 1mm ~ 2mm，高程的精度约为 2mm ~ 3mm，基本上满足了上述加速器设备安装的要求。

例 2 在隧道贯通控制测量中的应用

隧道的贯通测量，是铁路、公路隧道和海底隧道工程，以及城市地铁等地下工程的重要任务。隧道贯通测量的基本要求是，在隧道两端的开挖面处（有时还有中间开挖面），通过联测建立起始的基准方向，以控制隧道开挖的方向，保证隧道的准确贯通。经典的测量方法，由于要求控制点之间必须通视，致使测量工作变得甚为复杂。在此，GPS 测量的特点具有特别重要的意义。

目前，在上述各种隧道工程控制测量中，GPS 精密定位技术的应用已甚为广泛，并且充分地显示了这一高新技术的高精度与高效益。

下边，我们简单地介绍一下，在横跨英法海峡的欧洲海底隧道工程中，GPS 定位技术的应用情况。

为了适应社会政治、经济和文化交流与发展的需要，在英法海峡建造一条海底隧道，以便把英法两国联结起来，几个世纪以来，一直是欧洲人梦寐以求的希望。这项工程于 1987 年动工，历时约五年，终于 1991 年贯通，并于 1994 年 5 月开始运营。

英法隧道，也叫欧洲隧道，位于英国的多佛尔以西，和法国的加亚西南，全长约 50km。隧道的最深处位于海底以下约 40m。整个隧道工程划分为四个施工段，每个施工段要开挖三条管道。在如此浩大的海底隧道工程中，要保证各施工段开挖的管道均能准确的贯通，这对隧道工程的控制测量，提出了严格的要求。

为此，在隧道的初步设计阶段，曾用经典方法在两岸各布设了一个平面测量控制网，经平差后，其相对误差达 4×10^{-6} ，也就是说，对约 50km 长的隧道，其横向与纵向中误差可达约 20cm。

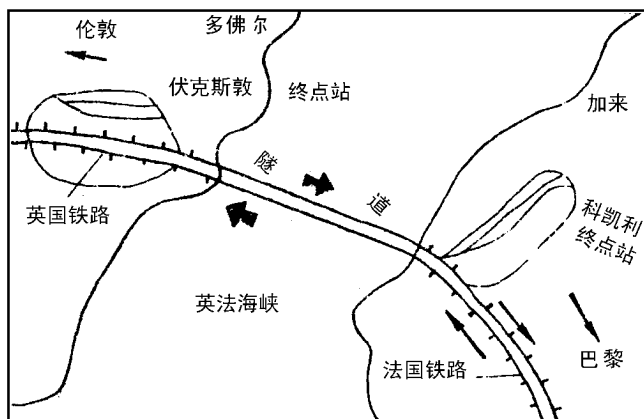


图 5-3-17 “欧洲隧道”位置

为了改善隧道控制测量的精度，于 1987 年，在两岸使用 TI 4100GPS 接收机，同时观测了三个控制点（图 5-3-18），并将观测结果与经典网进行了联合平差，结果使控制网的相对精度提高到 1×10^{-6} 。由此，上述隧道的纵向与横向中误差约降为 5cm，显著地改善了控制网的精度，从而保障了隧道的准确贯通。在此，GPS 精密定位技术，在欧洲隧道这一世界性的伟大工程中，作出了具有深远意义的贡献。

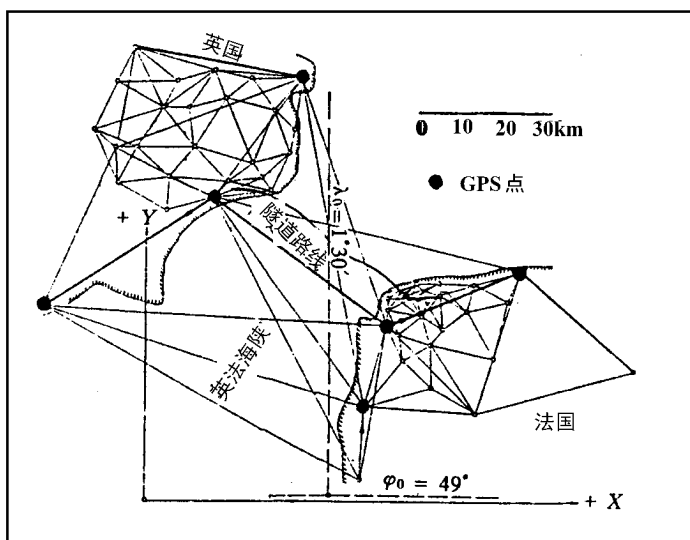


图 5-3-18 “欧洲隧道”的平面控制网

二、在工程变形监测方面的应用

工程变形，一般包括建筑物的位移，和由于人为原因而造成的建筑物或地壳的形变。由于 GPS 测量具有高精度的三维定位能力，所以它是监测各种工程变形的极为有效的手段。

工程形变的种类繁多，其主要类型包括

- (1) 大坝的变形；
- (2) 陆地建筑物的变形和沉陷；
- (3) 海上建筑物的沉陷；
- (4) 资源开采区的地面沉降等。

这里仅就以下三方面的应用情况作一说明。

(一) 大坝变形的监测

水库或水电站的大坝，由于水负荷的重压，可能引起水坝的变形。所以，为了安全方面的原因，需要对大坝的变形进行连续而精密地监测。这对水利和电力部门来说，是一项经常性的重要任务。

GPS 精密定位技术与经典测量方法相比，不仅可以满足大坝变形监测工作的精度要求 ($1.0\text{ppm} \sim 0.1\text{ppm}$)，而且更有助于实现监测工作的自动化。例如，为了监测大坝的形变，可在远离坝体的适当位置，选择一基准站，并在形变区选择若干监测点。在基准站与监测点上，分别安置 GPS 接收机，进行连续地自动观测，并采用适当的数据传输技术，实时地将监测数据自动地传送到数据处理中心，以进行处理、分析和显示。

(二) 地面沉陷的监测

由于地下资源的开采而引起地面沉陷的现象甚为普遍。例如，由于地下煤炭、石油和天然气的开采，引起了许多矿区的地面沉降；在城市，由于过量的抽取地下水资源，也使许多城市的地面，产生了显著的沉陷现象。

地下资源开发区地面的沉陷现象，与工业生产、经济建设以及人民的生活密切相关。所以，对上述沉降现象进行监测，以提供有关地面沉陷的数据，掌握其变化的规律和拟定相应的措施，是矿区建设和城市建设的一项意义深远的迫切任务。在这一应用领域，GPS 测量技术也是经济而有效的。因为 GPS 测量不要求相互通视，且速度快，作业灵活，所以它与传统的水准测量方法相比，将显著地提高作业效率，降低劳动强度。

另外顺便指出，为了监测地面的垂直位移，在此可以直接利用大地高程系统，而无需将 GPS 测量的大地高程，进行系统的转换。这样一来，不仅简化了计算工作，同时对保障观测结果的精度不受损失，也具有一定的意义。

(三) 海上勘探平台沉陷的监测

在海上，由于石油和天然气的开采，可能引起海底地壳的沉降，从而引起勘探平台

的下沉。根据北海油田的经验，典型的沉降速度每年可达 $10\text{cm} \sim 15\text{cm}$ 。因此，随时监测海上勘探平台的水平和垂直位移情况，对于保障安全生产显然是极为重要的。随着我国海上资源勘探工作的发展，这项工作日益引起人们的关注。

用经典的大地测量方法监测海上平台位移，一般是极其困难的。而 GPS 测量技术由于其操作简单、快速，监测点之间不但不需通视，且距离一般也不受限制，所以它为海上勘探平台的监测工作，开辟了重要途径。

利用 GPS 高精度相对定位法，对海上平台进行监测，应定期地重复观测。重复观测周期的长短，视相对定位的精度和平台可能的沉降量而定（例如每月一次或每半年一次）。由于平台位移监测的精度要求很高，所以在实际工作中，要注意削弱多路径效应等项系统性误差的影响，同时在数据处理中，要设法（例如采用轨道改进法）减弱卫星轨道误差的影响。

第六节 GPS 定位技术在导航方面的应用

一、概述

大家知道，GPS 定位技术，主要是为满足运动目标实时三维精密导航的要求，而发展起来的。GPS 导航技术的出现，是航空、航海史上导航技术的重大突破。目前它在海上、空中和陆地运动目标的导航、监控和管理等方面的应用已极其广泛。

1994 年 9 月，美国已成功地利用 GPS 导航技术，进行了飞机进场与着陆的实验。实验结果表明，GPS 导航比传统的导航技术，更为精确、灵活和廉价。它将可能使飞机在能见度近为零的情况下，安全的起飞和着陆。

GPS 导航，既可以实时地提供运动载体的精确位置，并可在数字化航行图和地图上显示，也可以选择载体航行的最佳路线，从而可能大大地缩短航行时间，节约燃料，降低运营成本。

在 1991 年初的海湾战争中，GPS 导航技术，无论对进攻武器装备的精密导航和制导，还是对后勤保障，都发挥了至关重要的作用，充分显示了这一高新技术的巨大威力和潜力。GPS 导航技术，将是未来军事装备的不可缺少的重要部分，成为保障现代战争胜利的关键技术之一。

GPS 定位技术在导航方面的应用，其特点是必需满足实时与动态的要求。因此，目前 GPS 导航技术，一般大都以测码伪距为观测量，并根据用户对导航的精度要求，采用单点定位或相对定位原理，为用户实时提供导航信息。

大家知道，经典的导航学和测量学，是两个独立的学科。但是，由于 GPS 定位技术的兴起，使现代的导航学和测量学融为一体。这里，简要地介绍一下，GPS 定位技术在导航方面的应用现状与前景，对于测量工作者来说，也是甚为有益的。

二、实时动态单点定位的导航系统

这种导航系统，通常用户只需一台 GPS 接收机，以测码伪距为观测量，根据单点定位的原理，确定载体相应观测历元的瞬时位置。这时，可能提供的导航信息主要包括，相应观测历元载体的大地坐标，航行方位，路程和航速，以及距目的地的里程和最佳航行路线等。并可能在数字化航行图上，实时地显示载体的运行位置。

这种导航系统的精度，根据采用的测距码不同而异。

实时动态单点定位的导航系统，设备和数据处理都比较简单，其广泛应用于各类导航工作。另外，在运动载体的姿态测量，航天飞机的导航，近地卫星的定轨和测时等方面，也都有着广阔地应用前景。

如果将上述运动载体的瞬时位置及其他有关信息，进一步通过无线电传输系统，发送给监控与管理中心，并在以数字化地图为背景的屏幕上，实时地加以显示（如图 5-3-19），那么，便可构成一简单的运动目标监控与管理系统和报警系统。

这时，运动目标（例如车辆、船只和飞机等）除应设有 GPS 卫星信号接收设备外，还设有数据传输与通信设备，以便将运动目标的实时位置和其它有关信息，传输给管理中心和接收管理中心的指令。监控与管理中心主要应设有数据的接收与通信设备，和具有地图数据库的计算机系统，以接收运动目标的瞬时位置和其他有关信息，并实时地处理和显示，以及传输管理中心的指令。

这一复合导航系统，目前已广泛地应用于公安系统、银行系统以及公共交通和旅游等系统的车辆、船只的监控与管理，以及发生意外时的报警与救援等项工作。

这一系统的有效监控范围，主要决定于数据传输和通信系统的性能。实际应用时，可根据用户的不同要求，选择适宜的数据传输与通讯方式和设备。

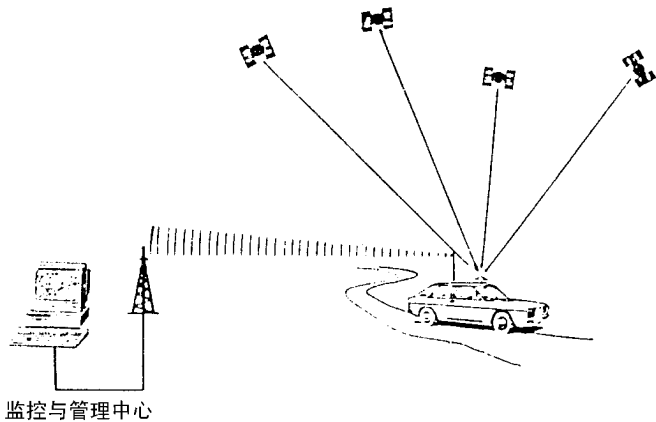


图 5-3-19 运动目标监控系统示意图

三、差分 GPS (DGPS) 导航系统

对于应用 C/A 码进行导航的用户来说, 当前其实时单点定位的精度, 约为 20m ~ 40m, 而在美国 SA 政策的影响下, 单点定位的精度, 将下降为 100m ~ 150m。为了减弱 GPS 星历误差, 卫星信号的传播误差以及 SA 的影响, 提高定位的精度, 近年来差分 GPS (DGPS) 定位技术的开发与应用, 得到了普遍的重视和迅速地发展。

差分 GPS 导航系统, 主要由基准站的 GPS 接收设备, 数据处理与传输设备和用户 GPS 接收机组成 (图 5-3-20)。

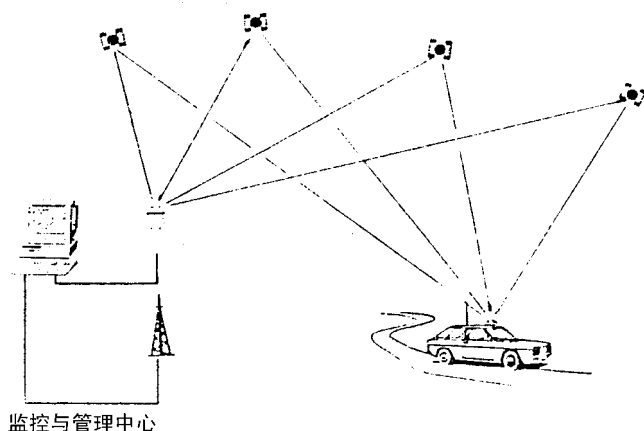


图 5-3-20 运动目标监控与管理系统示意图

前已指出, 差分 GPS 导航的基本思想, 是在监控与管理中心增设一台 GPS 接收机, 并将其安设在坐标已知的基准站上, 对所有可见卫星进行连续地观测。这样, 根据某一历元的码观测量, 可得基准站至所测 GPS 卫星的相应伪距值。与此同时, 根据基准站的已知坐标和所测卫星的已知瞬时位置, 也可计算基准站至所测 GPS 卫星的距离, 取该距离的计算值, 与上述观测的相应伪距值之差, 作为伪距修正量传输给运动目标, 用以修正运动目标同步观测的相应伪距值, 并根据修正后的伪距值, 实时计算运动目标的瞬时位置。

显然, 上述伪距修正量, 包含了星历误差、接收机钟差、大气传播误差和 SA 的综合影响, 这种影响的变化和运动目标与基准站的距离和修正量的龄期密切相关。

所谓修正量的龄期, 即当伪距误差不超过某一允许值时, 修正量的有效使用时期。例如, 根据试验, 当要求伪距误差保持在 1m 以内时, 伪距修正量的龄期应不超过 20 秒, 也就是说, 修正量的更新率, 应不超过 20 秒。

随着运动目标与基准站之间距离的增加, 星历误差与大气传播误差的影响将显著地增大。根据经验, GPS 定位精度的下降速率, 约为 1 厘米/公里。因此, 对于一个基准

站而言，其有效作用范围（或称覆盖范围），将主要决定于以下因素：

- （1）DGPS 导航的精度要求；
- （2）数据传输系统的功能。

在差分 GPS 导航系统中，基准站提供的修正量，其形式主要有

- （1）伪距修正量；
- （2）坐标修正量。

其中，以伪距修正量较为灵活，应用普遍。

这种单个基准站的精密导航系统，在其覆盖范围内，将可应用于飞机进场与着陆，船只进港，以及各种运动目标的精密监控与管理。

为了扩大导航系统的覆盖范围，在较大的区域内实现精密导航，可以布设多个基准站，以构成基准站网。由此所构成的区域性差分 GPS 导航系统，在一些文献中简称为 LADGPS（Local Area DGPS）。这时，基准站网提供伪距修正量的方式，主要有以下两种：

其一，各基准站均以标准化的格式发射各自的修正量信息，而用户接收机根据接收到的各基准站的修正量，取其加权平均值，作为用户的伪距修正量。其中，修正量的权，可根据用户接收与基准站的相对位置来确定。这种方式，由于应用了多个高速的差分 GPS 数据流，所以要求多倍的通信带宽，效率较低。

其二，根据各基准站的分布，预先在网中构成以用户站与基准站相对位置为函数的，修正量的加权平均值模型，并将其统一发射给用户。这种方式不需要增加通信带宽，是一种较为有效的方法。

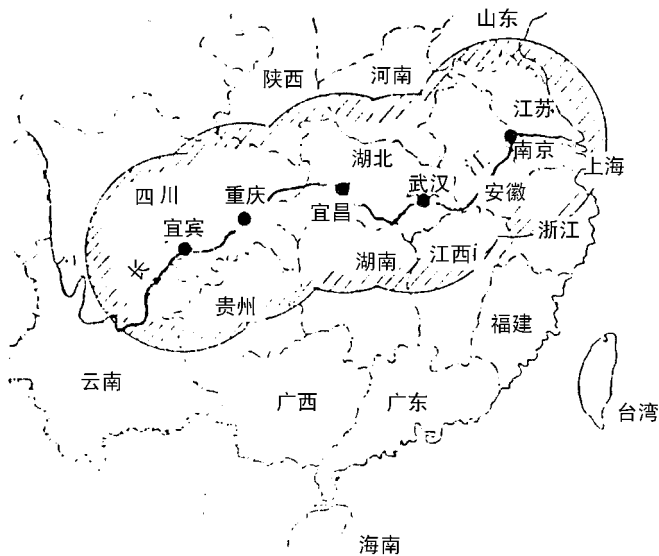


图 5-3-21 长江流域多基准站导航网的一个设计方案

多基准站导航系统的导航精度，主要决定于基准站的密度（或各基准站的覆盖范

围), 和所提供的修正量的精度。目前, 一般可达米级。在该系统的覆盖范围内, 可广泛地应用于空中、海上、陆地和内河航运等运动目标的精密导航工作。

例如, 随着国民经济的发展, 我国长江航道上的船只日益拥挤, 为了确保航运的安全, 从宜宾至长江口 2800 余公里的航道上, 可在南京、武汉、宜昌、重庆、宜宾等地设置五个基准站。在该基准站网的覆盖范围内 (图 5-3-21), 如采用中波数据链, 其导航精度将优于 10m。

四、广域差分 GPS 导航系统

前已指出, 上述单基准站的 GPS 导航系统 (DGPS), 其精度随运动目标与基准站之间距离的增加而降低。实践表明, 当所述距离超过 100km 时, 其所提供的修正量的精度, 便难以满足飞机进场和船只进港的要求。而多基准站的导航系统 (LADGPS), 虽然在其覆盖范围内, 定位精度比较均匀, 但应保障基准站的分布均匀, 密度充分。因此, 在广大区域内, 为了提高导航的精度, 目前已成功地发展了一种广域差分 GPS (Wide Area Differential GPS——WADGPS) 精密导航系统。该系统主要由监测站、主站、数据链和用户设备组成 (图 5-3-22)。

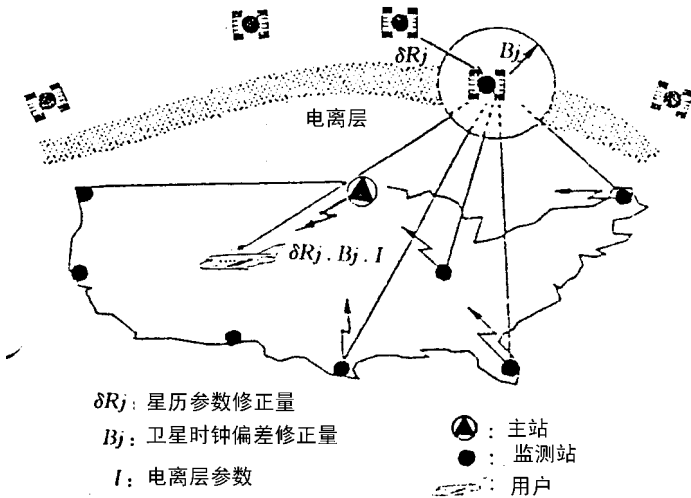


图 5-3-22 广域差分 GPS 原理示意图

(1) 监测站, 一般设有一台铯钟, 和一台能跟踪所有可见卫星 (< 12 颗) 的双频 GPS 接收机。各监测站的 GPS 观测量, 均通过数据链实时地发射到主站。监测站的数量一般应不少于 4 个。

(2) 主站, 根据各监测站的 GPS 观测量, 以及各监测站的已知坐标, 计算 GPS 卫星星历的修正量, 时钟修正量, 及电离层的时延参数。并将这些修正量和参数, 通过适

当的传输方式，实时地发送给用户。

(3) 用户设备，主要包括用户 GPS 接收机和数据链的用户端，以便在接收 GPS 卫星信号的同时，接收主站发射的上述修正量和电离层的时延参数信息，并据以修正其所观测 GPS 卫星的相应参数和电离层的时间延迟。

(4) 数据链，通常应根据实际情况，可选用通信卫星、无线电台等数据传输系统。其中以卫星传输最为有效，但目前其费用较高。

广域差分 GPS 网，一般应与 GPS 跟踪网相结合。大家知道，差分 GPS (DGPS)，提供给用户的信息，一般是一组伪距修正量，而广域差分 GPS (WADGPS)，提供给用户的修正量，是每颗可见 GPS 卫星星历的修正量，时钟偏差修正量和电离层时延参数。这时 WADGPS 与 DGPS 和 LADGPS 的基本区别。在 WADGPS 网覆盖的区域内，修正量的精度是比较均匀的，目前其水平定位精度可达 1m，高程精度约为 1.5m。

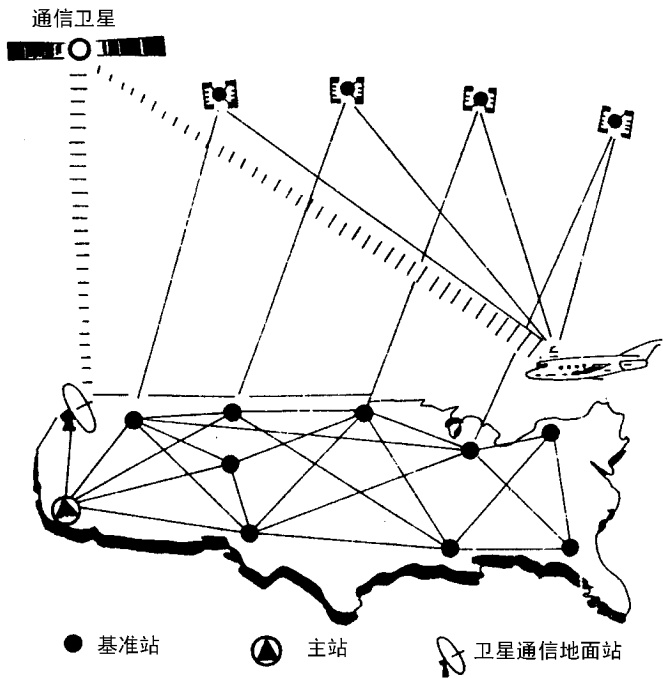


图 5-3-23 广域增强系统 (WAAS) 示意图

与一般 DGPS 相比，WADGPS 的主要优点是：

- (1) 修正量的精度与用户和基准站（监测站）之间的距离无关；
- (2) 在 WADGPS 覆盖范围内，用户的导航精度，除边沿地区外分布比较均匀；
- (3) 监测站的数量，较 LADGPS 基准站的数量大为减少。例如，在美国领域内，为实现米级的导航精度，LADGPS 需要建立约 500 个基准站，而 WADGPS 只需建立约 15 个监测站。

WADGPS 的主要缺点是，建立和维持一个 WADGPS 精密导航系统，耗资大，数据处

理的理论 and 软件也较为复杂。

这里顺便指出,近年来,美国联邦航空局 (FAA) 在 WADGPS 的基础上,正在开发一种 GPS 标准定位服务 (SPS) 的广域增强系统 (Wide Area Augmentation System——WAAS),其目的是改善 GPS 标准定位服务的精确性,可靠性和连续性,以便实现直至飞机进场的各飞行阶段的导航服务。

GPS 定位技术在导航方面的应用,是一个内容极为丰富,范围十分广阔的领域,特别当其与数据传输与通信技术相结合时,充分地显示了这一导航技术的巨大潜力和广泛的应用前景。

第七节 与 GPS 定位技术组合的导航与测量系统

目前, GPS 定位技术的发展,不仅在于其硬件与软件的开发与完善,新应用领域的开拓,而且在于与其他新技术相结合,构成性能可靠,功能强大的专用复合系统,以满足导航与测量工作高精度、高效益和高度自动化的要求。

为此,现就当前人们普遍关注的若干组合系统的功能与特点,简要介绍如下:

一、全球定位系统 (GPS) 与惯性导航系统 (Inertial Navigation System——INS) 的组合导航系统

大家知道,惯性导航系统 (INS),可实时提供导航信息,但其导航的误差,随着时间的延长而积累,将严重地影响导航的精度。而 GPS/INS 组合导航系统,一方面,通过 GPS 定位技术所获得的高精度位置与速度信息,对 INS 可进行精确的较准,以保障惯性导航信息的精度;另一方面,INS 的信息将有助于发现和消除在 GPS 载波相位观测中,可能出现的整周变跳,以及在高动态环境下, GPS 接收机对卫星信号的快速捕获和跟踪。由此, GPS/INS 组合系统,兼顾了两系统的优点,改善了两者的不足。GPS 和 INS 相互辅助,提高了导航的准确性、可靠性和安全性,因而引起了导航界的广泛重视。

二、GPS/GLONASS 兼容接收机的研究与开发

为了充分利用不同卫星定位系统的卫星信息资源,提高卫星定位的精确性、可靠性与安全性, GPS 与 GLONASS 接收设备一体化的研究与开发工作,一直受到普遍重视。

GPS 与 GLONASS 组合导航系统的主要特点在于:

(1) 用户同时可见的卫星数目约增加一倍,因而可以明显改善观测卫星的几何配置,提高定位的精度 (参见图 5-3-24 和图 5-3-25)。

(2) 利用两个独立的卫星定位系统,可大为提高导航的可靠性与安全性;

(3) 由于可见卫星数目增加,可能在一些卫星被遮挡的情况下,进行正常的导航和

测量。这对城市 GPS 测量和建立城市运动目标的监控与管理系統，尤为重要。

(4) 可有效地削弱美、俄两国对各自定位系统的可能限制，保障用户利用导航系统的安全与可靠。

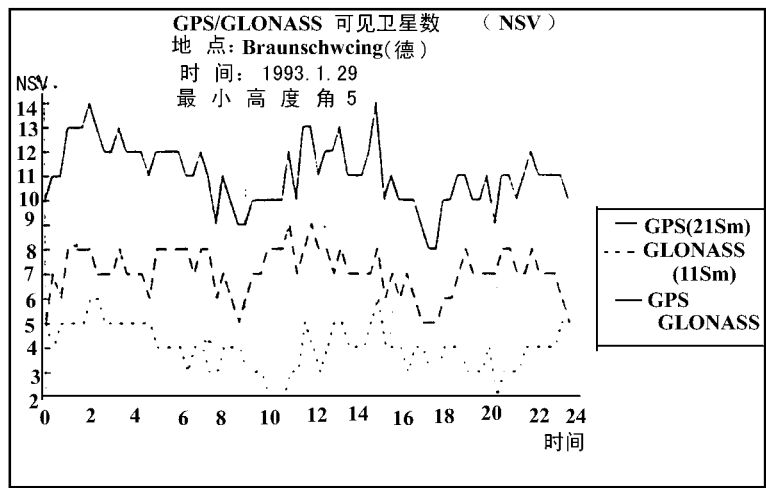


图 5-3-24 GPS/GLONASS 卫星可见性图

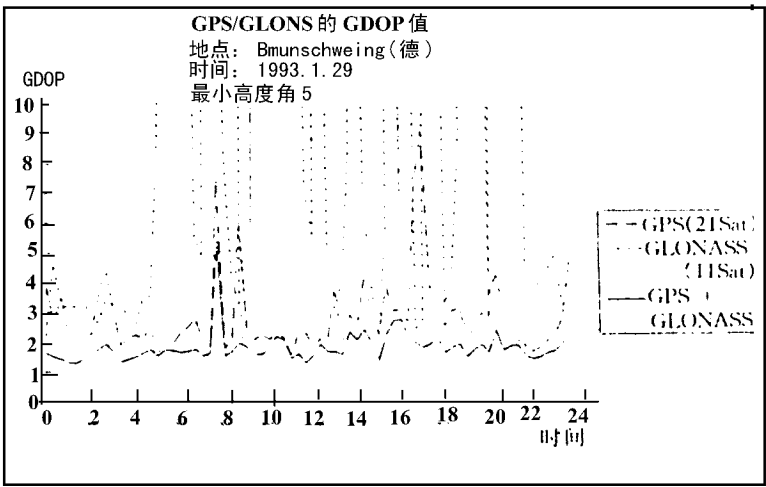


图 5-3-25 GPS/GLONASS 星座的 GDOP

目前，GPS/GLONASS 一体化的接收设备，已初步开发成功。随着兼容接收机硬件软件的不断完善，它为全球卫星定位系统在导航与测量领域的应用，展现了更为广阔的前景。

三、GPS 与数据传输系统组合的导航与测量系统

这一组合系统，不仅将进一步扩大 GPS 定位技术的功能和应用范围，并可为 GPS 定位技术的应用，提供进一步开发的平台。在导航方面，它可进一步与电子地图技术相结合，实现对运动目标的实时监控与管理，同时可实现实时差分 GPS 定位，以提高导航的精度；在测量方面，由此构成的实时差分测量系统（RTDGPS），可能实时地提供厘米级的定位结果。同时对实时检核观测成果的质量，保障定位结果的可靠性，提高测量工作效率，都具有重要意义。

四、GPS 定位技术与地图数据库技术相结合

这一组合系统，可利用电子地图直观和显示快速的特点，实时地在电子地图上显示运动目标的位置、速度和方位。它在军事和民用导航，以及对运动目标的监控与管理方面，都有重要的应用。

五、GPS 与不同传感系统组合

GPS 定位技术与不同的传感设备相结合，可构成多种性能可靠，多功能和高效益的专用组合系统。例如，GPS 与自动化测深系统相结合，将使导航与水深测量，达到高度的一体化和自动化，为水库、湖泊、河道和近海水域的断面测量，水底地形测量和水域的淤泥测量等，提供一种精确高效的新手段；GPS 定位技术与航空物探、航空摄影技术相结合，用以精密确定采样点的瞬时位置等。

另外，应当指出，为了在全球范围提高导航的安全性，可靠性和精确性，近年来，在利用现有卫星导航系统和数据链技术的基础上，美国正在开发一种全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System——GNSS）即 GPS/GLONASS/INMARSAT 组合导航系统，其中，INMARSAT 是国际海事卫星组织的简称。该组织通过所属的通信卫星，可提供全球移动通信服务。国际海事卫星组织，计划利用其第三代卫星 INMARSAT—III 转发 GPS/GLONASS 导航信息，为全球各地的用户提供导航服务。这样，于任何时间、地点，用户均可通过该系统的终端，实时地获得所需导航信息。国际民航组织（ICAO）也拟采用这一组合系统，作为其第一代全球卫星导航系统。这一组合导航系统的开发，受到广大用户的普遍关注，它显示了现代化精密导航技术发展的一个趋势。