

实用 GPS 测量数据 处理教程

武汉测绘科技大学 地球科学与测量工程学院

目录

第 0 章	概述	5
第 1 章	GPS 定位原理概述	6
第 1 节	GPS 的组成	6
第 2 节	GPS 信号	6
第 3 节	SPS 和 PPS	7
一、	SPS	7
二、	PPS	7
第 4 节	GPS 定位的常用观测值	8
第 5 节	GPS 定位的误差源	8
一、	与 GPS 卫星有关的因素	8
二、	与传播途径有关的因素	9
三、	与接收机有关的因素	9
四、	其它因素	9
第 6 节	GPS 定位方法	10
第 2 章	坐标系、基准和坐标系统	11
第 1 节	地球的形状	11
一、	地球的自然表面	11
二、	地球的质量和重力	11
三、	大地水准面	11
四、	参考椭球	11
五、	投影	11
第 2 节	坐标系统	11
一、	坐标系的分类	11
二、	基准	12
三、	坐标系变换与基准变换	13
四、	GPS 测量中常用的坐标系统	17
第 3 章	GPS 静态定位在测量中的应用	20
第 1 节	GPS 静态定位在测量中的应用	20
第 2 节	布设 GPS 基线向量网的工作步骤	20
一、	测前工作	20
二、	测量实施	21
三、	测后工作	22
第 4 章	技术设计	23
第 1 节	技术设计的作用	23
第 2 节	技术设计的内容	23
第 5 章	布网方法	26
第 1 节	GPS 基线向量网的等级	26
第 2 节	GPS 基线向量网的布网形式	26
一、	跟踪站式	27
二、	会战式	27
三、	多基准站式	27
四、	同步图形扩展式	28
五、	单基准站式	29
第 3 节	采用同步图形扩展的布网形式布设 GPS 基线向量网时的观测作业方式	29

一、	点连式	30
二、	边连式	30
三、	网连式	31
四、	混连式	31
第 4 节	布设 GPS 基线向量网时的设计指标	31
一、	效率指标	32
二、	可靠性指标	32
三、	精度指标	33
第 5 节	GPS 网的设计准则	33
一、	出发点	33
二、	GPS 网布网作业准则	33
第 6 章	GPS 基线解算	36
第 1 节	GPS 基线解算的基本原理	36
一、	观测值	36
二、	基线解算 (平差)	36
第 2 节	GPS 基线解算的分类	38
一、	单基线解算	38
二、	多基线解算	39
第 3 节	基线解算阶段的质量控制	39
一、	质量控制指标及其应用	39
二、	应用	41
第 4 节	影响 GPS 基线解算结果的几个因素及其应对方法	41
一、	影响 GPS 基线解算结果的几个因素	41
二、	影响 GPS 基线解算结果因素的判别及应对措施	42
第 5 节	GPS 基线解算的过程	47
第 7 章	GPS 基线向量网平差	49
第 1 节	GPS 网平差的分类	49
一、	三维平差和二维平差	49
二、	无约束平差、约束平差和联合平差	50
第 2 节	GPS 网平差原理	50
一、	三维无约束平差	50
二、	三维联合平差	52
三、	二维联合平差	52
第 3 节	GPS 网平差的过程	53
一、	提取基线向量, 构建 GPS 基线向量网	53
二、	三维无约束平差	53
三、	约束平差/联合平差	53
四、	质量分析与控制	53
第 4 节	GPS 网平差中起算数据的检验	54
一、	方差检验法	54
二、	符合路线法	54
三、	检查点法	54
第 8 章	GPS 高程	55
第 1 节	高程系统	55
一、	大地高系统	55
二、	正高系统	55
三、	正常高	55
四、	高程系统之间的转换关系	55
第 2 节	GPS 高程的方法	56
一、	等值线图法	56

二、	地球模型法.....	56
三、	高程拟合法.....	56
第 9 章	技术总结.....	59
第 1 节	技术总结的作用.....	59
第 2 节	技术总结的内容.....	59

第0章 概述

- 全球定位系统（Global Positioning System-GPS）作为新一代的卫星导航定位系统，经过二十多年的发展，已发展成为一种被广泛采用的系统，它的应用领域和应用前景已远远超出了该系统设计者当初的设想，目前，它在航空、航天、军事、交通、运输、资源勘探、通信、气象等几乎所有的领域中，都被作为一项非常重要的技术手段和方法，用来进行导航、定时、定位、地球物理参数测定和大气物理参数测定等。作为较早采用 GPS 技术的领域，在测量中，它最初主要用于高精度大地测量和控制测量，建立各种类型和等级的测量控制网；现在，它除了继续在这些领域发挥着重要作用外，还在测量领域的其它方面得到充分的应用，如用于各种类型的施工放样、测图、变形观测、航空摄影测量、海测和地理信息系统中地理数据的采集等。尤其是在各种类型的测量控制网的建立这一方面，GPS 定位技术已基本上取代了常规测量手段，成为了主要的技术手段。现在，在我国采用 GPS 技术布设了新的国家大地测量控制网，很多城市也都采用 GPS 技术建立了城市控制网。为了使大家能充分了解和掌握利用 GPS 定位技术建立控制网的基本原理和方法，本书将围绕着利用 GPS 定位技术布设控制网的全过程，介绍在布网过程中所涉及到的大量理论与技术问题，内容将包括从技术设计、外业观测、基线解算、直到网平差和提交成果进行验收等各个环节，具体有以下一些内容：
 - GPS 定位原理概述
在这一部分里，将简要介绍 GPS 系统和 GPS 定位的基本原理。如果读者已对此有较全面的了解，可以跳过此部分。
 - 坐标系、基准和坐标系统
介绍在采用 GPS 布设控制网时常用的坐标系统及各坐标系统间的转换关系。
 - GPS 静态定位在测量中的应用
介绍 GPS 静态定位在测量中的主要应用方式及作业步骤。
 - 技术设计
介绍在布设 GPS 网时，进行技术设计的作用、原则和内容。
 - 布网方法
介绍 GPS 网的类型和布网方法。
 - GPS 基线解算
介绍基线解算的原理、步骤、精化处理方法和质量控制方法。
 - GPS 基线向量网平差
介绍 GPS 网平差的类型、原理、步骤和质量控制方法。
 - GPS 高程
介绍采用 GPS 进行测定高程的方法。
 - 技术总结
介绍布设 GPS 网时，技术总结的作用和内容。

第1章 GPS 定位原理概述

第1节 GPS 的组成

GPS (Global Positioning System) 即全球定位系统, 是由美国建立的一个卫星导航定位系统, 利用该系统, 用户可以在全球范围内实现全天候、连续、实时的三维导航定位和测速; 另外, 利用该系统, 用户还能够进行高精度的时间传递和高精度的精密定位。

GPS 计划始于 1973 年, 已于 1994 年进入完全运行状态(FOC¹)。GPS 的整个系统由空间部分、地面控制部分和用户部分所组成:

■ 空间部分

GPS 的空间部分是由 24 颗 GPS 工作卫星所组成, 这些 GPS 工作卫星共同组成了 GPS 卫星星座, 其中 21 颗为可用于导航的卫星, 3 颗为活动的备用卫星²。这 24 颗卫星分布在 6 个倾角为 55°的轨道上绕地球运行。卫星的运行周期约为 12 恒星时。每颗 GPS 工作卫星都发出用于导航定位的信号。GPS 用户正是利用这些信号来进行工作的。

■ 控制部分

GPS 的控制部分由分布在全球的由若干个跟踪站所组成的监控系统所构成, 根据其作用的不同, 这些跟踪站又被分为主控站、监控站和注入站。主控站有一个, 位于美国克罗拉多 (Colorado) 的法尔孔 (Falcon) 空军基地, 它的作用是根据各监控站对 GPS 的观测数据, 计算出卫星的星历和卫星钟的改正参数等, 并将这些数据通过注入站注入到卫星中去; 同时, 它还对卫星进行控制, 向卫星发布指令, 当工作卫星出现故障时, 调度备用卫星, 替代失效的工作卫星工作; 另外, 主控站也具有监控站的功能。监控站有五个, 除了主控站外, 其它四个分别位于夏威夷 (Hawaii)、阿松森群岛 (Ascencion)、迭哥伽西亚 (Diego Garcia)、卡瓦加兰 (Kwajalein), 监控站的作用是接收卫星信号, 监测卫星的工作状态; 注入站有三个, 它们分别位于阿松森群岛 (Ascencion)、迭哥伽西亚 (Diego Garcia)、卡瓦加兰 (Kwajalein), 注入站的作用是将主控站计算出的卫星星历和卫星钟的改正数等注入到卫星中去。

■ 用户部分

GPS 的用户部分由 GPS 接收机、数据处理软件及相应的用户设备如计算机气象仪器等所组成。它的作用是接收 GPS 卫星所发出的信号, 利用这些信号进行导航定位等工作。

以上这三个部分共同组成了一个完整的 GPS 系统。

第2节 GPS 信号

GPS 卫星发射两种频率的载波信号, 即频率为 1575.42MHz 的 L_1 载波和频率为 1227.60MHz 的 L_2 载波, 它们的频率分别是基本频率 10.23MHz 的 154 倍和 120 倍, 它

¹ FOC – Full Operational Capability.

² 实际上这 3 颗备用卫星同样可用于导航定位。

们的波长分别为 19.03cm 和 24.42cm。在 L_1 和 L_2 上又分别调制着多种信号，这些信号主要有：

■ C/A 码

C/A 码又被称为粗捕获码，它被调制在 L_1 载波上，是 1MHz 的伪随机噪声码（PRN 码），其码长为 1023 位（周期为 1ms）。由于每颗卫星的 C/A 码都不一样，因此，我们经常用它们的 PRN 号来区分它们。C/A 码是普通用户用以测定测站到卫星间的距离的一种主要的信号。

■ P 码

P 码又被称为精码，它被调制在 L_1 和 L_2 载波上，是 10MHz 的伪随机噪声码，其周期为七天。在实施 AS 时，P 码与 W 码进行模二相加生成保密的 Y 码，此时，一般用户无法利用 P 码来进行导航定位。

■ Y 码

见 P 码。

■ 导航信息

导航信息被调制在 L_1 载波上，其信号频率为 50Hz，包含有 GPS 卫星的轨道参数、卫星钟改正数和其它一些系统参数。用户一般需要利用此导航信息来计算某一时刻 GPS 卫星在地球轨道上的位置，导航信息也被称为广播星历。

第3节 SPS 和 PPS

GPS 系统针对不同用户提供两种不同类型的服务。一种是标准定位服务 (SPS-Standard Positioning Service)，另一种是精密定位服务 (PPS-Precision Positioning Service)。这两种不同类型的服务分别由两种不同的子系统提供，标准定位服务由标准定位子系统 (SPS-Standard Positioning System) 提供，精密定位服务则由精密定位子系统 (PPS-Precision Positioning System) 提供。SPS 主要面向全世界的民用用户。PPS 主要面向美国及其盟国的军事部门以及民用的特许用户。

一、 SPS

SPS - Standard Positioning Service (标准定位服务) 是供普通民用用户使用的。世界上的任何民用用户都可以免费且不受限制地使用该类定位服务。绝大多数的 GPS 接收机都具有接收 SPS 信号的能力，美国国防部通过采用 SA 有意识地降低了 SPS 的定位精度。

SPS 的估计精度为：

- 水平精度：100 m
- 垂直精度：156 m
- 时间精度：340 ns³

二、 PPS

PPS - Precision Positioning Service (精密定位服务) 是供经过美国政府授权的用户使用的。这类用户包括美国及其盟国的军事部门、某些美国政府部门、以及一些经过挑

³ ns：纳秒， 10^{-9} 秒。

选并通过美国政府特别批准的民用用户。使用 PPS 需要采用加密设备、密钥以及专用的接收机。

PPS 的估计精度为：

- 水平精度：22 m

垂直精度：27.7 m

时间精度：100 ns

第4节 GPS 定位的常用观测值

在 GPS 定位中，经常采用下列观测值中的一种或几种进行数据处理，以确定出待定点的坐标或待定点之间的基线向量：

- L1 载波相位观测值
- L2 载波相位观测值（半波或全波）
- 调制在 L1 上的 C/A 码伪距
- 调制在 L1 上的 P 码伪距
- 调制在 L2 上的 P 码伪距
- L1 上的多普勒频移
- L2 上的多普勒频移

实际上，在进行 GPS 定位时，除了大量地使用上面的观测值进行数据处理以外，还经常使用由上面的若干种观测值通过某些组合而形成的一些特殊观测值，如宽巷观测值（Wide-Lane）⁴、窄巷观测值（Narrow-Lane）⁵、消除电离层延迟的观测值（Ion-Free）⁶来进行数据处理。

第5节 GPS 定位的误差源

我们在利用 GPS 进行定位时，会受到各种各样因素的影响。影响 GPS 定位精度的因素可以依据其具体来源分为以下四大类：

- 与 GPS 卫星有关的因素
- 与传播途径有关的因素
- 与接收机有关的因素
- 其它因素

一、与 GPS 卫星有关的因素

- SA
SA 是 Selective Availability，意思是可选择的定位能力，SA 的目的是对不同的用户提供不同精度的定位服务。美国政府从其国家利益出发，通过降低广播星历精度（*e* 技术）、在 GPS 基准信号中加入高频抖动（*d* 技术）等方法，人为降低普通用户利用 GPS 进行导航定位时的精度。

卫星星历误差

⁴ L1-L2。

⁵ L1+L2。

⁶ 2.546L₁-1.984L₂。

在进行 GPS 定位时，是将 GPS 卫星当作动态的已知点，而计算在某时刻 GPS 卫星位置所需的卫星轨道参数是通过各种种类的星历⁷提供的，但不论采用哪种种类的星历，所计算出的卫星位置都会与其真实位置有所差异，这就是所谓的星历误差。

卫星钟差

卫星钟差是 GPS 卫星上所安装的原子钟的钟面时与 GPS 标准时间之间的误差。

卫星信号发射天线相位中心偏差

卫星信号发射天线相位中心偏差是 GPS 卫星上信号发射天线的标称相位中心与其真实相位中心之间的差异。

二、 与传播途径有关的因素

电离层延迟

由于地球周围的电离层对电磁波的折射效应，使得 GPS 信号的传播速度发生变化，这种变化称为电离层延迟。电磁波所受电离层折射的影响与电磁波的频率以及电磁波传播途径上电子总含量有关。

对流层延迟

由于地球周围的对流层对电磁波的折射效应，使得 GPS 信号的传播速度发生变化，这种变化称为对流层延迟。电磁波所受对流层折射的影响与电磁波传播途径上的温度、湿度和气压有关。

多路径效应

由于接收机周围环境的影响，使得接收机所接收到的卫星信号中还包含有各种反射和折射信号的影响，这就是所谓的多路径效应。

三、 与接收机有关的因素

接收机钟差

接收机钟差是 GPS 接收机所使用的钟的钟面时与 GPS 标准时之间的差异。

接收机天线相位中心偏差

接收机天线相位中心偏差是 GPS 接收机天线的标称相位中心与其真实的相位中心之间的差异。

接收机软件和硬件造成的误差

在进行 GPS 定位时，定位结果还会受到诸如处理与控制软件和硬件等的影响。

四、 其它因素

GPS 控制部分人为或计算机造成的影响

由于 GPS 控制部分的问题或用户在进行数据处理时引入的误差等。

数据处理软件的影响

数据处理软件的算法不完善对定位结果的影响。

⁷ 常用的星历有广播星历和精密星历两种。

第6节 GPS 定位方法

GPS 定位的方法是多种多样的，用户可以根据不同的用途采用不同的定位方法。GPS 定位方法可依据不同的分类标准，作如下划分：

■ 根据定位所采用的观测值

伪距定位

伪距定位所采用的观测值为 GPS 伪距观测值，所采用的伪距观测值既可以是 C/A 码伪距，也可以是 P 码伪距。伪距定位的优点是数据处理简单，对定位条件的要求低，不存在整周模糊度的问题，可以非常容易地实现实时定位；其缺点是观测值精度低，C/A 码伪距观测值的精度一般为 3 米，而 P 码伪距观测值的精度一般也在 30 个厘米左右，从而导致定位成果精度低，另外，若采用精度较高的 P 码伪距观测值，还存在 AS 的问题。

载波相位定位

载波相位定位所采用的观测值为 GPS 的载波相位观测值，即 L_1 、 L_2 或它们的某种线性组合。载波相位定位的优点是观测值的精度高，一般优于 2 个毫米；其缺点是数据处理过程复杂，存在整周模糊度的问题。

■ 根据定位的模式

绝对定位

绝对定位又称为单点定位，这是一种采用一台接收机进行定位的模式，它所确定的是接收机天线的绝对坐标。这种定位模式的特点是作业方式简单，可以单机作业。绝对定位一般用于导航和精度要求不高的应用中。

相对定位

相对定位又称为差分定位，这种定位模式采用两台以上的接收机，同时对一组相同的卫星进行观测，以确定接收机天线间的相互位置关系。

■ 根据获取定位结果的时间

实时定位

实时定位是根据接收机观测到的数据，实时地解算出接收机天线所在的位置。

非实时定位

非实时定位又称后处理定位，它是通过对接收机接收到的数据进行后处理以进行定位得方法。

■ 根据定位时接收机的运动状态

动态定位

所谓动态定位，就是在进行 GPS 定位时，认为接收机的天线在整个观测过程中的位置是变化的。也就是说，在数据处理时，将接收机天线的位置作为一个随时间的改变而改变的量。动态定位又分为 Kinematic 和 Dynamic 两类。

静态定位

所谓静态定位，就是在进行 GPS 定位时，认为接收机的天线在整个观测过程中的位置是保持不变的。也就是说，在数据处理时，将接收机天线的位置作为一个不随时间的改变而改变的量。在测量中，静态定位一般用于高精度的测量定位，其具体观测模式多台接收机在不同的测站上进行静止同步观测，时间由几分钟、几小时甚至数十小时不等。

第2章 坐标系、基准和坐标系统

测量的基本任务就是确定物体在空间中的位置、姿态及其运动轨迹。而对这些特征的描述都是建立在某一个特定的空间框架和时间框架之上的。所谓空间框架就是我们常说的坐标系，而时间框架就是我们常说的时间系统。

第1节 地球的形状

一、 地球的自然表面

所谓地球的自然表面就是指地球的物理表面。

二、 地球的质量和重力

三、 大地水准面

大地水准面

四、 参考椭球

五、 投影

第2节 坐标系统

一个完整的坐标系统是由坐标系和基准两方面要素所构成的。坐标系指的是描述空间位置的表达形式，而基准指的是为描述空间位置而定义的一系列点、线、面。在大地测量中的基准一般是指为确定点在空间中的位置，而采用的地球椭球或参考椭球的几何参数和物理参数，及其在空间的定位、定向方式，以及在描述空间位置时所采用的单位长度的定义。

一、 坐标系的分类

正如前面所提及的，所谓坐标系指的是描述空间位置的表达形式，即采用什么方法来表示空间位置。人们为了描述空间位置，采用了多种方法，从而也产生了不同的坐标系，如直角坐标系、极坐标系等。在测量中，常用的坐标系有以下几种：

- 空间直角坐标系

空间直角坐标系的坐标系原点位于参考椭球的中心，Z 轴指向参考椭球的北极，X

轴指向起始子午面与赤道的交点，Y轴位于赤道面上，且按右手系与X轴呈 90° 夹角。某点在空间中的坐标可用该点在此坐标系的各个坐标轴上的投影来表示。（见图1）

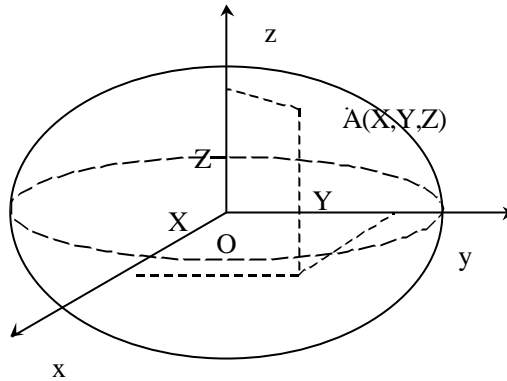


图1 空间直角坐标系

■ 空间大地坐标系

空间大地坐标系是采用大地经度（L）、大地纬度（B）和大地高（H）来描述空间位置的。纬度是空间的点与参考椭球面的法线与赤道面的夹角，经度是空间中的点与参考椭球的自转轴所在的面与参考椭球的起始子午面的夹角，大地高是空间点沿参考椭球的法线方向到参考椭球面的距离。

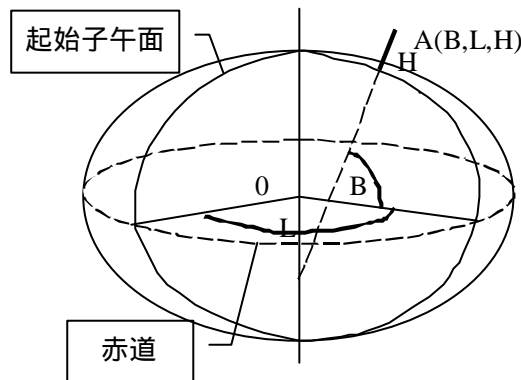


图2 空间大地坐标系

■ 平面直角坐标系

平面直角坐标系是利用投影变换，将空间坐标（空间直角坐标或空间大地坐标）通过某种数学变换映射到平面上，这种变换又称为投影变换。投影变换的方法有很多，如 UTM 投影、Lambuda 投影等，在我国采用的是高斯-克吕格投影，也称为高斯投影。

二、 基准

所谓基准是指为描述空间位置而定义的点、线、面，在大地测量中，基准是指用以描述地球形状的参考椭球的参数，如参考椭球的长短半轴，以及参考椭球在空间中的定位及定向，还有在描述这些位置时所采用的单位长度的定义。

三、 坐标系变换与基准变换

在 GPS 测量中，经常要进行坐标系变换与基准变换。所谓坐标系变换就是在不同的坐标表示形式间进行变换，基准变换是指在不同的参考基准间进行变换。

1. 坐标系的变换方法

■ 空间直角坐标系与空间大地坐标系间的转换

在相同的基准下，将空间大地坐标转换为空间直角坐标公式为：

$$X = (N + H) \cos B \cos L \quad (2-1)$$

$$Y = (N + H) \cos B \sin L \quad (2-2)$$

$$Z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \quad (2-3)$$
$$= \left[N \cdot \frac{a^2}{b^2} + H \right] \sin B$$

其中：

N 为卯酉圈⁸的半径，

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \quad (2-4)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (2-5)$$

a 为地球椭圆长半轴；

b 为地球椭圆的短半轴。

在相同的基准下，将空间直角坐标转换为空间大地坐标的公式为：

$$L = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2-6)$$

$$B = \arctan\left(\frac{Z(N + H)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)[N(1 - e^2) + H]}}\right) \quad (2-7)$$

$$H = \frac{Z}{\sin B} - N(1 - e^2) \quad (2-8)$$

在采用上式进行转换时，需要采用迭代的方法，先利用下式求出 B 的初值

$$E = \arctan\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) \quad (2-9)$$

然后，利用该初值在求定 H 、 N 的初值，再利用所求出的 H 和 N 的初值再次求定 B 值。

将空间直角坐标转换为空间大地坐标也可以采用如下的直接算法：

$$L = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2-10)$$

⁸ 卯酉圈：prime vertical。

$$B = \arctan\left(\frac{Z + e'^2 b \sin^3 q}{\sqrt{X^2 + Y^2} - e^2 a \cos^3 q}\right) \quad (2-11)$$

$$H = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N \quad (2-12)$$

其中：

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad (2-13)$$

$$q = \arctan\left(\frac{Z \cdot a}{\sqrt{X^2 + Y^2} \cdot b}\right) \quad (2-14)$$

■ 空间坐标系与平面直角坐标系间的转换

空间坐标系与平面直角坐标系间的转换采用的是投影变换的方法。在我国一般采用的是高斯投影。关于高斯投影，请参见有关文献。

高斯正算公式如下：

$$y = l(B) + \frac{t}{2} N \cos^2 B \ell^2 + \frac{t}{24} N \cos^4 B (5 - t^2 + 9h^2 + 4h^4) \ell^4 + \frac{t}{720} N \cos^6 B (61 - 58t^2 + t^4 + 270h^2 - 330t^2 h^2) \ell^6 \quad (2-15)$$

$$+ \frac{t}{40320} N \cos^8 B (1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6) \ell^8 + \dots$$

$$x = N \cos B \ell + \frac{1}{6} N \cos^3 B (1 - t^2 + h^2) \ell^3 + \frac{1}{120} N \cos^5 B (5 - 18t^2 + t^4 + 14h^2 - 58t^2 h^2) \ell^5 \quad (2-16)$$

$$+ \frac{1}{5040} N \cos^7 B (61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6) \ell^7 + \dots$$

其中：

$l(B)$ 为子午线弧长；

$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$ 为卯酉圈半径；

$t = \tan B$

$\ell = L - L_0$ 为经差；

L_0 为中央子午线经度。

$l(B)$ 为从赤道到投影点的椭球面弧长，可用下式计算：

$$l(B) = a [B + b \sin 2B + g \sin 4B + d \sin 6B + e \sin 8B + \dots] \quad (2-17)$$

其中：

$$\begin{aligned}
\mathbf{a} &= \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 + \dots\right) \\
\mathbf{b} &= -\frac{3}{2}n + \frac{9}{16}n^3 - \frac{3}{32}n^5 + \dots \\
\mathbf{g} &= \frac{15}{16}n^2 - \frac{15}{32}n^4 + \dots \\
\mathbf{d} &= -\frac{35}{48}n^3 + \frac{105}{256}n^5 - \dots \\
\mathbf{e} &= \frac{315}{512}n^4 + \dots
\end{aligned} \tag{2-18}$$

和：

$$n = \frac{a-b}{a+b} \tag{2-19}$$

高斯反算公式如下：

$$\begin{aligned}
B &= B_f + \frac{t_f}{2N_f^2}(-1 - \mathbf{h}_f^2)x^2 \\
&+ \frac{t_f}{24N_f^4}(5 + 3t_f^2 + 6\mathbf{h}_f^2 - 6t_f^2\mathbf{h}_f^2 - 3\mathbf{h}_f^4 - 9t_f^2\mathbf{h}_f^4)x^4 \\
&+ \frac{t_f}{720N_f^8}(-61 - 90t_f^2 - 45t_f^4 - 107\mathbf{h}_f^2 + 162t_f^2\mathbf{h}_f^2 + 45t_f^4\mathbf{h}_f^2)x^6 \\
&+ \frac{t_f}{40320N_f^8}(1385 + 3633t_f^2 + 4095t_f^4 + 1575t_f^6)x^8 + \dots
\end{aligned} \tag{2-20}$$

$$\begin{aligned}
L &= L_0 + \frac{1}{N_f \cos B_f}x + \frac{1}{6N_f^3 \cos B_f}(-1 - 2t_f^2 - \mathbf{h}_f^2)x^3 \\
&+ \frac{1}{120N_f^5 \cos B_f}(5 + 28t_f^2 + 24t_f^4 + 6\mathbf{h}_f^2 + 8t_f^2\mathbf{h}_f^2)x^5 \\
&+ \frac{1}{5040N_f^7 \cos B_f}(-61 - 662t_f^2 - 1320t_f^4 - 720t_f^6)x^7 + \dots
\end{aligned} \tag{2-21}$$

其中下标为 f 的项需要基于底点纬度 B_f 来计算，关于底点纬度的计算，可以采用下面的级数展开式计算：

$$B_f = \bar{y} + \bar{\mathbf{b}} \sin 2\bar{y} + \bar{\mathbf{g}} \sin 4\bar{y} + \bar{\mathbf{d}} \sin 6\bar{y} + \bar{\mathbf{e}} \sin 8\bar{y} + \dots \tag{2-22}$$

其中：

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \frac{a+b}{2} \left(1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4 + \dots \right) \\ \bar{b} &= \frac{3}{2}n - \frac{27}{32}n^3 + \frac{269}{512}n^5 + \dots \\ \bar{g} &= \frac{21}{16}n^2 - \frac{55}{32}n^4 + \dots \\ \bar{d} &= \frac{151}{96}n^3 - \frac{417}{128}n^5 + \dots \\ \bar{e} &= \frac{1097}{512}n^4 + \dots \end{aligned} \tag{2-23}$$

且：

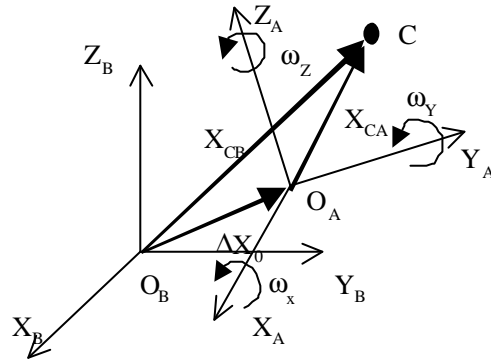
$$\bar{y} = \frac{y}{a} \tag{2-24}$$

2. 坐标系统的转换方法

不同坐标系统的转换本质上是不同基准间的转换，不同基准间的转换方法有很多，其中，最为常用的有布尔沙模型，又称为七参数转换法。

七参数转换法是：

设两空间直角坐标系间有七个转换参数 3 个平移参数、3 个旋转参数和 1 个尺度参数。



若：

$(X_A \ Y_A \ Z_A)^T$ 为某点在空间直角坐标系 A 的坐标；

$(X_B \ Y_B \ Z_B)^T$ 为该点在空间直角坐标系 B 的坐标；

$(\Delta X_0 \ \Delta Y_0 \ \Delta Z_0)^T$ 为空间直角坐标系 A 转换到空间直角坐标系 B 的平移参数；

$(w_x \ w_y \ w_z)$ 为空间直角坐标系 A 转换到空间直角坐标系 B 的旋转参数；

m 为空间直角坐标系 A 转换到空间直角坐标系 B 的尺度参数。

则由空间直角坐标系 A 到空间直角坐标系 B 的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} + (1+m)R(\mathbf{w}) \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}$$

其中：

$$\begin{aligned}
R(\mathbf{w}_X) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos w_x & \sin w_x \\ 0 & -\sin w_x & \cos w_x \end{pmatrix} \\
R(\mathbf{w}_Y) &= \begin{pmatrix} \cos w_Y & 0 & -\sin w_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin w_Y & 0 & \cos w_Y \end{pmatrix} \\
R(\mathbf{w}_Z) &= \begin{pmatrix} \cos w_Z & \sin w_Z & 0 \\ -\sin w_Z & \cos w_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{2-25}$$

一般 w_X 、 w_Y 和 w_Z 均为小角度，将 $\cos w$ 和 $\sin w$ 分别展开成泰勒级数，仅保留一阶项，则有：

$$\cos w \approx 1 \tag{2-26}$$

$$\sin w \approx w \tag{2-27}$$

则有：

$$R(\mathbf{w}) = R(\mathbf{w}_Z) \cdot R(\mathbf{w}_Y) \cdot R(\mathbf{w}_X) = \begin{bmatrix} 1 & w_Z & -w_Y \\ -w_Z & 1 & w_X \\ w_Y & -w_X & 1 \end{bmatrix} \tag{2-28}$$

也可将转换公式表示为：

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} w_X \\ w_Y \\ w_Z \\ m \end{bmatrix} \tag{2-29}$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -Z_A & Y_A & X_A \\ Z_A & 0 & -X_A & Y_A \\ -Y_A & X_A & 0 & Z_A \end{bmatrix} \tag{2-30}$$

四、GPS 测量中常用的坐标系统

1. WGS-84

WGS-84 坐标系是目前 GPS 所采用的坐标系统，GPS 所发布的星历参数就是基于此坐标系统的。

WGS-84 坐标系统的全称是 World Geodical System-84 (世界大地坐标系-84)，它是一个地心地固坐标系统。WGS-84 坐标系统由美国国防部制图局建立，于 1987 年取代了当时 GPS 所采用的坐标系统 WGS-72 坐标系统而成为 GPS 所使用的坐标系统。

WGS-84 坐标系的坐标原点位于地球的质心，Z 轴指向 BIH1984.0 定义的协议地球极方向，X 轴指向 BIH1984.0 的起始子午面和赤道的交点，Y 轴与 X 轴和 Z 轴构成右手系。

WGS-84 系所采用椭球参数为：

$$a = 6378137m$$

$$f = 1/298.257223563$$

$$\overline{C}_{20} = -484.16685 \times 10^{-6}$$

$$w = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot s^{-1}$$

$$GM = 398600.5 \text{ km}^3 \cdot s^{-2}$$

2. 1954 年北京坐标系

1954 年北京坐标系是我国目前广泛采用的大地测量坐标系。该坐标系源自于原苏联采用过的 1942 年普尔科夫坐标系。

建国前，我国没有统一的大地坐标系统，建国初期，在苏联专家的建议下，我国根据当时的具体情况，建立起了全国统一的 1954 年北京坐标系。该坐标系采用的参考椭球是克拉索夫斯基椭球，该椭球的参数为：

$$a = 6378245m$$

$$f = 1/298.3$$

遗憾的是，该椭球并未依据当时我国的天文观测资料进行重新定位，而是由前苏联西伯利亚地区的一等锁，经我国的东北地区传算过来的，该坐标系的高程异常是以前苏联 1955 年大地水准面重新平差的结果为起算值，按我国天文水准路线推算出来的，而高程又是以 1956 年青岛验潮站的黄海平均海面为基准。

1954 年北京坐标系建立后，全国天文大地网尚未布测完毕，因此，在全国分期布设该网的同时，相应地进行了分区的天文大地网局部平差，以满足经济和国防建设的需要。局部平差是按逐级控制的原则，先分区平差一等锁系，然后以一等锁环为起算值，平差环内的二等三角锁，平差时网区的连接部仅作了近似处理，如有的仅取两区的平差值，当某些一等锁环内的二等网太大，在当时的计算条件下无法处理时，也进行了分区平差，连接部仍采用近似处理的方法。

由于当时条件的限制，1954 年北京坐标系存在着很多缺点，主要表现在以下几个方面：

1. 克拉索夫斯基椭球参数同现代精确的椭球参数的差异较大，并且不包含表示地球物理特性的参数，因而给理论和实际工作带来了许多不便。
2. 椭球定向不十分明确，椭球的短半轴既不指向国际通用的 CIO 极，也不指向目前我国使用的 JYD 极。参考椭球面与我国大地水准面呈西高东低的系统性倾斜，东部高程异常达 60 余米，最大达 67 米。
3. 该坐标系统的大地点坐标是经过局部分区平差得到的，因此，全国的天文大地控制点实际上不能形成一个整体，区与区之间有较大的隙距，如在有的接合部中，同一点在不同区的坐标值相差 1-2 米，不同分区的尺度差异也很大，而且坐标传递是从东北到西北和西南，后一区是以前一区的最弱部作为坐标起算点，因而一等锁具有明显的坐标积累误差。

3. 1980 年西安大地坐标系

1978 年，我国决定重新对全国天文大地网施行整体平差，并且建立新的国家大地坐

标系统，整体平差在新大地坐标系统中进行，这个坐标系统就是 1980 年西安大地坐标系统。1980 年西安大地坐标系统所采用的地球椭球参数的四个几何和物理参数采用了 IAG 1975 年的推荐值，它们是

$$a = 6378140m$$

$$GM = 3.986005 \times 10^{14} m^3 \cdot s^{-2}$$

$$J_2 = 1.08263 \times 10^{-3}$$

$$\omega = 7.292115 \times 10^{-5} rad \cdot s^{-1}$$

根据上面所给的参数，可算出 1980 年西安大地坐标系所采用的参考椭球的扁率为：

$$f = 1/298.257$$

椭球的短轴平行于地球的自转轴（由地球质心指向 1968.0 JYD 地极原点方向），起始子午面平行于格林尼治平均天文子午面，椭球面同似大地水准面在我国境内符合最好，高程系统以 1956 年黄海平均海面为高程起算基准。

第3章 GPS 静态定位在测量中的应用

目前，GPS 静态定位在测量中被广泛地用于大地测量、工程测量、地籍测量、物探测量及各种类型的变形监测等，在以上这些应用中，其主要还是用于建立各种级别、不同用途的控制网。

第1节 GPS 静态定位在测量中的应用

GPS 静态定位在测量中主要用于测定各种用途的控制点。其中，较为常见的方面是利用 GPS 建立各种类型和等级的控制网，在这些方面，GPS 技术已基本上取代了常规的测量方法，成为了主要手段。较之于常规方法，GPS 在布设控制网方面具有以下一些特点：

- 测量精度高
GPS 观测的精度要明显高于一般的常规测量手段，GPS 基线向量的相对精度一般在 $10^{-5} \sim 10^{-9}$ 之间，这是普通测量方法很难达到的。
- 选点灵活、不需要造标、费用低
GPS 测量，不要求测站间相互通视，不需要建造觇标，作业成本低，大大降低了布网费用。
- 全天候作业
在任何时间、任何气候条件下，均可以进行 GPS 观测，大大方便了测量作业，有利于按时、高效地完成控制网的布设。
- 观测时间短
采用 GPS 布设一般等级的控制网时，在每个测站上的观测时间一般在 1~2 个小时左右，采用快速静态定位的方法，观测时间更短。
- 观测、处理自动化
采用 GPS 布设控制网，观测工程 and 数据处理过程均是高度自动化的。

第2节 布设 GPS 基线向量网的工作步骤

布设 GPS 基线向量网主要分测前、测中和测后三个阶段进行。

一、测前工作

- 项目的提出
一项 GPS 测量工程项目，往往是由工程发包方、上级主管部门或其他单位或部门提出，由 GPS 测量队伍具体实施。对于一项 GPS 测量工程项目，一般有如下一些要求：
 - 测区位置及其范围
测区的地理位置、范围，控制网的控制面积。
 - 用途和精度等级
控制网将用于何种目的，其精度要求是多少，要求达到何种等级。

点位分布及点的数量

控制网的点位分布、点的数量及密度要求，是否有对点位分布有特殊要求的区域。

提交成果的内容

用户需要提交哪些成果，所提交的坐标成果分别属于哪些坐标系，所提交的高程成果分别属于哪些高程系统，除了提交最终的结果外，是否还需要提交原始数据或中间数据等。

时限要求

对提交成果的时限要求，即何时是提交成果的最后期限。

投资经费。

对工程的经费投入数量。

■ 技术设计

负责 GPS 测量的单位在获得了测量任务后，需要根据项目要求和相关技术规范进行测量工程的技术设计。关于技术设计的具体内容将在第 4 章中作详细介绍。

■ 测绘资料的搜集与整理

在开始进行外业测量之前，现有测绘资料的搜集与整理也是一项极其重要的工作。需要收集整理的资料主要包括测区及周边地区可利用的已知点的相关资料（点之记、坐标等）和测区的地形图等。

■ 仪器的检验

对将用于测量的各种仪器包括 GPS 接收机及相关设备、气象仪器等进行检验，以确保它们能够正常工作。

■ 踏勘、选点埋石

在完成技术设计和测绘资料的搜集与整理后，需要根据技术设计的要求对测区进行踏勘，并进行选点埋石工作。

二、 测量实施

■ 实地了解测区情况

由于在很多情况下，选点埋石和测量是分别由两个不同的队伍或两批不同的人员完成的，因此，当负责 GPS 测量作业的队伍到达测区后，需要先对测区的情况作一个详细的了解。主要需要了解的内容包括点位情况（点的位置、上点的难度等）、测区内经济发展状况、民风民俗、交通状况、测量人员生活安排等。这些对于今后测量工作的开展是非常重要的。

■ 卫星状况预报

根据测区的地理位置，以及最新的卫星星历，对卫星状况进行预报，作为选择合适的观测时间段的依据。所需预报的卫星状况有卫星的可见性、可供观测的卫星星座、随时间变化的 PDOP 值、随时间变化的 RDOP 值等。对于个别有较多或较大障碍物的测站，需要评估障碍物对 GPS 观测可能产生的不良影响。

■ 确定作业方案

根据卫星状况、测量作业的进展情况、以及测区的实际情况，确定出具体的作业方案，以作业指令的形式下达给各个作业小组，根据情况，作业指令可逐天下达，也可一次下达多天的指令。作业方案的内容包括作业小组的分组情况，GPS 观测的时间段以及测站等。

- **外业观测**

各 GPS 观测小组在得到作业指挥员所下达的作业指令后，应严格按照作业指令的要求进行外业观测。在进行外业观测时，外业观测人员除了严格按照作业规范、作业指令进行操作外，还要根据一些特殊情况，灵活地采取应对措施。在外业中常见的情况有不能按时开机、仪器故障和电源故障等。
- **数据传输与转储**

在一段外业观测结束后，应及时地将观测数据传输到计算机中，并根据要求进行备份，在数据传输时需要对照外业观测记录手簿，检查所输入的记录是否正确。数据传输与转储应根据条件，及时进行。
- **基线处理与质量评估**

对所获得的外业数据及时地进行处理，解算出基线向量，并对解算结果进行质量评估。作业指挥员需要根据基线解算情况作下一步 GPS 观测作业的安排。
- **重复确定作业方案、外业观测、数据传输与转储与基线处理与质量评估四步，直至完成所有 GPS 观测工作。**

三、 测后工作

- **结果分析（网平差处理与质量评估）**

对外业观测所得到的基线向量进行质量检验，并对由合格的基线向量所构建成的 GPS 基线向量网进行平差解算，得出网中各点的坐标成果。如果需要利用 GPS 测定网中各点的正高或正常高，还需要进行高程拟合。
- **技术总结**

根据整个 GPS 网的布设及数据处理情况，进行全面的技术总结。
- **成果验收**

第4章 技术设计

第1节 技术设计的作用

在布设 GPS 网时，技术设计是非常重要的。这是因为技术设计提供了布设 GPS 网的技术准则，在布设 GPS 网时所遇到的所有技术问题，都需要从技术设计中寻找答案。因此，在进行每一项 GPS 工程时，都必须首先进行技术设计。

第2节 技术设计的内容

一个完整的技术设计，主要应包含如下内容：

项目来源

介绍项目的来源、性质。即项目由何单位、部门下达、发包，属于何种性质的项目。

测区概况

介绍测区的地理位置、气候、人文、经济发展状况、交通条件、通讯条件等。这可为今后工程施测工作的开展提供必要的信息。如在施测时作业时间、交通工具的安排，电力设备使用，通讯设备的使用。

工程概况

介绍工程的目的、作用、要求、GPS 网等级（精度）、完成时间、有无特殊要求等在进行技术设计、实际作业和数据处理中所必须要了解的信息。

技术依据

介绍工程所依据的测量规范、工程规范、行业标准及相关的技术要求等。

现有测绘成果

介绍测区内及与测区相关地区的现有测绘成果的情况。如已知点、测区地形图等。

施测方案

介绍测量采用的仪器设备的种类、采取的布网方法等。

作业要求

规定选点埋石要求、外业观测时的具体操作规程、技术要求等，包括仪器参数的设置（如采样率、截止高度角等）、对中精度、整平精度、天线高的量测方法及精度要求等。

观测质量控制

介绍外业观测的质量要求，包括质量控制方法及各项限差要求等。如数据删除率、RMS 值、RATIO 值、同步环闭合差、异步环闭合差、相邻点相对中误差、点位中误差等。

数据处理方案

详细的数据处理方案，包括基线解算和网平差处理所采用的软件和处理方法等内容。

对于基线解算的数据处理方案，应包含如下内容：基线解算软件、参与解算的

观测值、解算时所使用的卫星星历类型等。

对于网平差的数据处理方案，应包含如下内容：网平差处理软件、网平差类型、网平差时的坐标系、基准及投影、起算数据的选取等。

提交成果要求

规定提交成果的类型及形式。

第5章 布网方法

第1节 GPS 基线向量网的等级

根据我国 1992 年所颁布的全球定位系统测量规范, GPS 基线向量网被分成了 A、B、C、D、E 五个级别。下图是我国全球定位系统测量规范中有关 GPS 网等级的有关内容。GPS 网的精度指标, 通常是以网中相邻点之间的距离误差来表示的, 其具体形式为:

$$s = \sqrt{a^2 + (b \times D)^2}$$

其中,

s : 网中相邻点间的距离中误差(mm);

a : 固定误差(mm);

b : 比例误差(ppm⁹);

D : 相邻点间的距离(km)。

对于不同等级的 GPS 网, 有下列的精度要求:

测量分类	固定误差 a (mm)	比例误差 b (ppm)	相邻点距离(km)
A	5	0.1	100~2000
B	8	1	15~250
C	10	5	5~40
D	10	10	2~15
E	10	20	1~10

A 级网一般为区域或国家框架网、区域动力学网; B 级网为国家大地控制网或地方框架网; C 级网为地方控制网和工程控制网; D 级网为工程控制网; E 级网为测图网。

美国联邦大地测量分管委员会 (Federal Geodetic Control Subcommittee-FGCS) 在 1988 年公布的 GPS 相对定位的精度标准中有一个 AA 级的等级, 此等级的网一般为全球性的坐标框架。

第2节 GPS 基线向量网的布网形式

GPS 网常用的布网形式有以下几种:

- 跟踪站式
- 会战式
- 多基准站式 (枢纽点式)
- 同步图形扩展式
- 单基准站式

⁹ 1ppm=10⁻⁶。

一、跟踪站式

1. 布网形式

若干台接收机长期固定安放在测站上，进行常年、不间断的观测，即一年观测 365 天，一天观测 24 小时，这种观测方式很象是跟踪站¹⁰，因此，这种布网形式被称为跟踪站式。

2. 特点

由于在采用跟踪站式的布网形式布设 GPS 网时，接收机在各个测站上进行了不间断的连续观测，观测时间长、数据量大，而且在处理采用这种方式所采集的数据时，一般采用精密星历，因此，采用此种形式布设的 GPS 网具有很高的精度和框架基准特性。

每个跟踪站为保证连续观测，一般需要建立专门的永久性建筑即跟踪站，用以安置仪器设备，这使得这种布网形式的观测成本很高。

此种布网形式一般用于建立 GPS 跟踪站（AA 级网），对于普通用途的 GPS 网，由于此种布网形式观测时间长、成本高，故一般不被采用。

二、会战式

1. 布网形式

在布设 GPS 网时，一次组织多台 GPS 接收机，集中在一段不太长的时间内，共同作业。在作业时，所有接收机在若干天的时间里分别在同一批点上进行多天、长时段的同步观测，在完成一批点的测量后，所有接收机又都迁移到另外一批点上进行相同方式的观测，直至所有的点观测完毕，这就是所谓的会战式的布网。

2. 特点

采用会战式布网形式所布设的 GPS 网，因为各基线均进行过较长时间、多时段的观测，所以可以较好地消除 SA 等因素的影响，因而具有特高的尺度精度。此种布网方式一般用于布设 A、B 级网。

三、多基准站式

1. 布网形式

所谓多基准站式的布网形式就是有若干台接收机在一段时间里长期固定在某几个

¹⁰ 实际上就是跟踪站。

点上进行长时间的观测，这些测站称为基准站，在基准站进行观测的同时，另外一些接收机则在这些基准站周围相互之间进行同步观测。

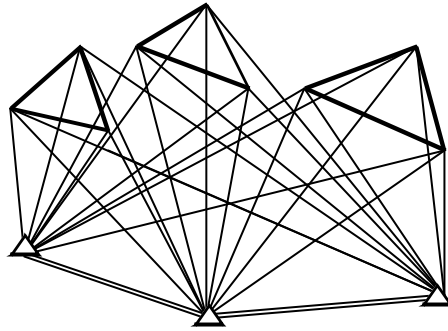


图3 多基准站式

2. 特点

采用多基准站式的布网形式所布设的 GPS 网，由于在各个基准站之间进行了长时间的观测，因此，可以获得较高精度的定位结果，这些高精度的基线向量可以作为整个 GPS 网的骨架。另外一方面，其余的进行了同步观测的接收机间除了自身间有基线向量相连外，它们与各个基准站之间也存在有同步观测，因此，也有同步观测基线相连，这样可以获得更强的图形结构。

四、 同步图形扩展式

1. 布网形式

所谓同步图形扩展式的布网形式，就是多台接收机在不同测站上进行同步观测，在完成一个时段的同步观测后，又迁移到其它的测站上进行同步观测，每次同步观测都可以形成一个同步图形，在测量过程中，不同的同步图形间一般有若干个公共点相连，整个 GPS 网由这些同步图形构成。

2. 特点

同步图形扩展式的布网形式具有扩展速度快，图形强度较高，且作业方法简单的优点。同步图形扩展式是布设 GPS 网时最常用的一种布网形式。

五、 单基准站式

1. 布网形式

单基准站式的布网方式有时又称作星形网方式，它是以一台接收机作为基准站，在某个测站上连续开机观测，其余的接收机在此基准站观测期间，在其周围流动，每到一点就进行观测，流动接收机之间一般不要求同步，这样，流动的接收机每观测一个时段，就与基准站间测得一条同步观测基线，所有这样测得的同步基线就形成了一个以基准站为中心的星形。流动的接收机有时也称为流动站。

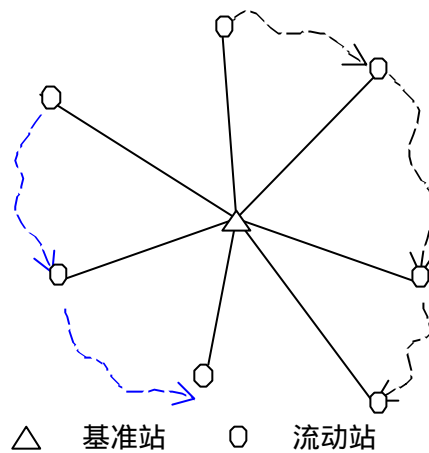


图4 单基准站式

2. 特点

单基准站式的布网方式的效率很高，但是由于各流动站一般只与基准站之间有同步观测基线，故图形强度很弱，为提高图形强度，一般需要每个测站至少进行两次观测。

第3节 采用同步图形扩展的布网形式布设 GPS 基线向量网时的观测作业方式

同步图形扩展式的作业方式具有作业效率高，图形强度好的特点，它是目前在 GPS 测量中普遍采用的一种布网形式，在本书中将着重介绍此种布网形式。

采用同步图形扩展式布设 GPS 基线向量网时的观测作业方式主要有以下几种式：

- 点连式
- 边连式
- 网连式
- 混连式

一、 点连式

1. 观测作业方式

所谓点连式就是在观测作业时，相邻的同步图形间只通过一个公共点相连。这样，当有 m 台仪器共同作业时，每观测一个时段，就可以测得 $m-1$ 个新点，当这些仪器观测观测了 s 个时段后，就可以测得 $1+s \cdot (m-1)$ 个点。

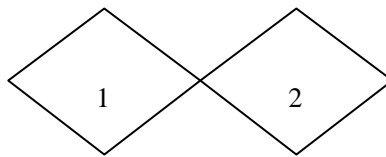


图5 点连式

2. 特点

点连式观测作业方式的优点是作业效率高，图形扩展迅速；它的缺点是图形强度低，如果连接点发生问题，将影响到后面的同步图形。

二、 边连式

1. 观测作业方式

所谓边连式就是在观测作业时，相邻的同步图形间有一条边（即两个公共点）相连。这样，当有 m 台仪器共同作业时，每观测一个时段，就可以测得 $m-2$ 个新点，当这些仪器观测观测了 s 个时段后，就可以测得 $2+s \cdot (m-2)$ 个点。

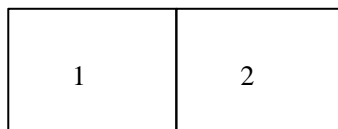


图6 边连式

2. 特点

边连式观测作业方式具有较好的图形强度和较高的作业效率。

三、网连式

1. 观测作业方式

所谓网连式就是在作业时，相邻的同步图形间有 3 个（含 3 个）以上的公共点相连。这样，当有 m 台仪器共同作业时，每观测一个时段，就可以测得 $m - k$ 个新点，当这些仪器观测了 s 个时段后，就可以测得 $k + s \cdot (m - k)$ 个点。

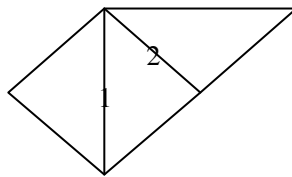


图7 混连式

2. 特点

采用网连式观测作业方式所测设的 GPS 网具有很强的图形强度，但网连式观测作业方式的作业效率很低。

四、混连式

1. 观测作业方式

在实际的 GPS 作业中，一般并不是单独采用上面所介绍的某一种观测作业模式，而是根据具体情况，有选择地灵活采用这几种方式作业，这样一种观测作业方式就是所谓的混连式。

2. 特点

混连式观测作业方式是我们实际作业中最常用的作业方式，它实际上是点连式、边连式和网连式的一个结合体。

第4节 布设 GPS 基线向量网时的设计指标

在布设 GPS 网时，我们除了遵循一定的设计原则外，还需要一些定量的指标来指导我们的工作。在我们进行 GPS 网的设计时经常需要采用效率指标、可靠性指标和精度指标。

一、效率指标

在进行 GPS 网的设计时，我们经常采用效率指标来衡量某种网设计方案的效率，以及在采用某种布网方案作业时所需要的作业时间、消耗等。

在布设一个 GPS 网时，在点数、接收机数和平均重复设站次数¹¹确定后，则完成该网测设所需的理论最少观测期数¹²就可以确定。但是，当按照某个具体的布网方式和观测作业方式进行作业时，要按要求完成整网的测设，所需的观测期数与理论上的最少观测期数会有所差异，理论最少观测期数¹³与设计的观测期数的比值，称之为效率指标(e)，即

$$e = \frac{s_{\min}}{s_d}$$

其中：

s_{\min} 为理论最少观测期数；

s_d 为设计观测期数。

该指标可用来衡量 GPS 网设计的效率。

二、可靠性指标

GPS 网可靠性，可以分为内可靠性和外可靠性。所谓 GPS 网的内可靠性就是指所布设的 GPS 网发现粗差的能力，即可发现的最小粗差的大小；所谓 GPS 网的外可靠性就是指 GPS 网抵御粗差的能力，即未剔除的粗差对 GPS 网所造成的不良影响的大小。关于内、外可靠性的问题，可以从一些相关书籍上找到更为详细的叙述，并且还给出了内、外可靠性指标的算法。由于内、外可靠性指标在计算上过于烦琐，因此，我们在实际的 GPS 网的设计中采用了另外一个计算较为简单的反映 GPS 网可靠性的数量指标，这个可靠性指标就是整网的多余独立基线数与总的独立基线数的比值，称为整网的平均可靠性指标(h)，即：

$$h = \frac{l_r}{l_t}$$

其中：

l_r 为多余的独立基线数¹⁴；

¹¹ 平均重复设站次数指的是总的设站次数与 GPS 网的点数的比值。

¹² 观测期数就是同步观测的时段数。

¹³ 理论最少观测期数 s_{\min} 可用下式计算：

$$s_{\min} = \text{INT}\left(\frac{R \cdot n}{m}\right)$$

其中：

R 为平均重复设站次数；

m 为接收机数；

n 为 GPS 网的点数；

$\text{INT}(\)$ 为凑整函数， $\text{INT}(x) \geq x$ 。

¹⁴ 多余的独立基线数可以这样计算：

l_t 为总的独立基线数。

三、 精度指标

当 GPS 网布网方式和观测作业方式确定后，GPS 网的网形就确定了，根据已确定的 GPS 网的网形，可以得到 GPS 网的设计矩阵 \mathbf{B} ，从而可以得到 GPS 网的协因数阵 $\mathbf{Q} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})$ ，在 GPS 网的设计阶段可以采用 $tr(\mathbf{Q})$ 作为衡量 GPS 网精度的指标。

第5节 GPS 网的设计准则

一、 出发点

GPS 网设计的出发点是在保证质量的前提下，尽可能地提高效率，努力降低成本。因此，在进行 GPS 的设计和测设时，既不能脱离实际的应用需求，盲目地最求不必要的高精度和高可靠性；也不能为追求高效率 and 低成本，而放弃对质量的要求。

二、 GPS 网布网作业准则

1. 选点

- 为保证对卫星的连续跟踪观测和卫星信号的质量，要求测站上空应尽可能的开阔，在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 高度角以上不能有成片的障碍物。
- 为减少各种电磁波对 GPS 卫星信号的干扰，在测站周围约 200m 的范围内不能有强电磁波干扰源，如大功率无线电发射设施、高压输电线等。
- 为避免或减少多路径效应的发生，测站应远离对电磁波信号反射强烈的地形、地物，如高层建筑、成片水域等。
- 为便于观测作业和今后的应用，测站应选在交通便利，上点方便的地方。
- 测站应选择在易于保存的地方。

2. 提高 GPS 网可靠性的方法

- 增加观测期数（增加独立基线数）。
在布设 GPS 网时，适当增加观测期数（时段数）对于提高 GPS 网的可靠性非常有效。因为，随着观测期数的增加，所测得的独立基线数就会增加，而独立基线数的增加，对网的可靠性的提高是非常有宜的。
- 保证一定的重复设站次数¹⁵。

$$l_r = l_t - l_n$$

l_n 为必要的独立基线数， $l_n = n - 1$

l_t 为总的独立基线数， $l_t = s \cdot (m - 1)$ ， s 为观测期数， m 为同步观测接收机的台数。

¹⁵ 实际上这与增加观测期数是一致的。

保证一定的重复设站次数，可确保 GPS 网的可靠性。一方面，通过在同一测站上的多次观测，可有效地发现设站、对中、整平、量测天线高等人为错误；另一方面，重复设站次数的增加，也意味着观测期数的增加。不过，需要注意的是，当同一台接收机在同一测站上连续进行多个时段的观测时，各个时段间必须重新安置仪器，以更好地消除各种人为操作误差和错误。

- 保证每个测站至少与三条以上的独立基线相连，这样可以使得测站具有较高的可靠性。

在布设 GPS 网时，各个点的可靠性与点位无直接关系，而与该点上所连接的基线数有关，点上所连接的基线数越多，点的可靠性则越高。

- 在布网时要使网中所有最小异步环的边数不大于 6 条。

在布设 GPS 网时，检查 GPS 观测值（基线向量）质量的最佳方法是异步环闭合差，而随着组成异步环的基线向量数的增加，其检验质量的能力将逐渐下降。

提高 GPS 网精度的方法

- 为保证 GPS 网中各相邻点具有较高的相对精度，对网中距离较近的点一定要进行同步观测，以获得它们间的直接观测基线。
- 为提高整个 GPS 网的精度，可以在全面网之上布设框架网，以框架网作为整个 GPS 网的骨架。
- 在布网时要使网中所有最小异步环的边数不大于 6 条。
- 在布设 GPS 网时，引入高精度激光测距边，作为观测值与 GPS 观测值（基线向量）一同进行联合平差，或将它们作为起算边长。
- 若要采用高程拟合的方法，测定网中各点的正常高/正高，则需在布网时，选定一定数量的水准点，水准点的数量应尽可能的多，且应在网中均匀分布，还要保证有部分点分布在网中的四周，将整个网包含在其中。
- 为提高 GPS 网的尺度精度，可采用如下方法：增设长时间、多时段的基线向量。

3. 布设 GPS 网时起算点的选取与分布

- 若要求所布设的 GPS 网的成果与旧成果吻合最好，则起算点¹⁶数量越多越好，若不要求所布设的 GPS 网的成果完全与旧成果吻合，则一般可选 3~5 个起算点，这样既可以保证新老坐标成果的一致性，也可以保持 GPS 网的原有精度。
- 为保证整网的点位精度均匀，起算点一般应均匀地分布在 GPS 网的周围。要避免所有的起算点分布在网中一侧的情况。

4. 布设 GPS 网时起算边长的选取与分布

- 在布设 GPS 网时，可以采用高精度激光测距边作为起算边长，激光测距边的数量可在 3~5 条左右，它们可设置在 GPS 网中的任意位置。但激光测距边两 endpoints 的高差不应过分悬殊。

¹⁶ 一定要保证所采用的起算点的成果不能有质量问题。

5. 布设 GPS 网时起算方位的选取与分布

- 在布设 GPS 网时，可以引入起算方位，但起算方位不宜太多，起算方位可布设在 GPS 网中的任意位置。

第6章 GPS 基线解算

第1节 GPS 基线解算的基本原理

GPS 基线向量表示了各测站间的一种位置关系，即测站与测站间的坐标增量。GPS 基线向量与常规测量中的基线是有区别的，常规测量中的基线只有长度属性，而 GPS 基线向量则具有长度、水平方位和垂直方位等三项属性。GPS 基线向量是 GPS 同步观测的直接结果，也是进行 GPS 网平差，获取最终点位的观测值。

一、 观测值

基线解算一般采用差分观测值，较为常用的差分观测值为双差观测值，即由两个测站的原始观测值分别在测站和卫星间求差后所得到的观测值。双差观测值可以表示为下面的形式：

$$dd(\mathbf{f}_f) + v_f = dd(\mathbf{r}) + dd(\mathbf{r}_{ion}) + dd(\mathbf{r}_{trop}) + \mathbf{I}_f \cdot N_f^{m,n}$$

其中：

$dd(\dots)$ 为双差分算子（在测站 i, j 和卫星 m, n 间求差）；

$dd(\mathbf{f}_f)$ 为频率 f 的双差载波相位观测值；

v_f 为频率 f 的双差载波相位观测值的残差（改正数）；

\mathbf{r} 为观测历元 t 时的站星距离；

\mathbf{r}_{ion} 为电离层延迟；

\mathbf{r}_{trop} 为对流层延迟；

\mathbf{I}_f 为频率 f 的载波相位的波长；

$N_f^{m,n}$ 为整周末知数。

若在某一历元中，对 k 颗卫星数进行了同步观测，则可以得到 $k-1$ 个双差观测值；若在整个同步观测时段内同步观测卫星的总数为 l 则整周末知数的数量为 $l-1$ 。

在进行基线解算时， \mathbf{r}_{ion} 和 \mathbf{r}_{trop} 一般并不作为未知参数，而是通过某些方法将它们消除¹⁷。因此，基线解算时一般只有两类参数，一类是测站的坐标参数 X_C ，数量为 3^{18} ；

另一类是整周末知数参数 X_N （ m 为同步观测的卫星数），数量为 $m-1$ 。

二、 基线解算（平差）

基线解算的过程实际上主要是一个平差的过程，平差所采用的观测值主要是双差观测值。在基线解算时，平差要分三个阶段进行，第一阶段进行初始平差，解算出整周末

¹⁷ 如用模型改正或双频改正。

¹⁸ 在基线解算时将基线的一个端点的坐标作为已知值固定，解求另一个点。固定的点称为起点，待求的点称为终点。

知数参数¹⁹的和基线向量的实数解（浮动解）；在第二阶段，将整周未知数固定成整数；在第三阶段，将确定的整周未知数作为已知值，仅将待定的测站坐标作为未知参数，再次进行平差解算，解求出基线向量的最终解-整数解（固定解）。

1. 初始平差

根据双差观测值的观测方程（需要进行线性化），组成误差方程后，然后组成本法方程后，求解待定的未知参数其精度信息，其结果为：

$$\text{待定参数：} \hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{X}_C \\ \hat{X}_N \end{bmatrix}$$

$$\text{待定参数的协因数阵：} Q = \begin{bmatrix} Q_{\hat{X}_C \hat{X}_C} & Q_{\hat{X}_C \hat{X}_N} \\ Q_{\hat{X}_N \hat{X}_C} & Q_{\hat{X}_N \hat{X}_N} \end{bmatrix},$$

单位权中误差： \hat{s}_0 。

通过初始平差，所解算出的整周未知数参数 X_N 本应为整数，但由于观测值误差、随即模型和函数模型不完善等原因，使得其结果为实数，因此，此时与实数的整周未知数参数对应的基线解被称作基线向量的实数解或浮动解。

为了获得较好的基线解算结果，必须准确地确定出整周未知数的整数值。

2. 整周未知数的确定

确定整周未知数的整数值的的方法有很多种，目前所采用的方法基本上是以下面将要介绍的搜索法为基础的。搜索法的具体步骤如下：

1. 根据初始平差的结果 \hat{X}_N 和 $D_{\hat{X}_N \hat{X}_N}$ ²⁰，分别以 \hat{X}_N 中的每一个整周未知数为中心，以与它们中误差的若干倍²¹为搜索半径，确定出每一个整周未知数的一组备选整数值。
2. 从上面所确定出的每一个整周未知数的备选整数值中一次选取一个，组成整周未知数的备选组，并分别以它们作为已知值，代入原基线解算方程，确定出相应的基线解：

$$\hat{X}_i = [\hat{X}_{C_i}],$$

$$Q_i = [Q_{\hat{X}_{C_i} \hat{X}_{C_i}}],$$

$$\hat{s}_{0i}$$

3. 从所解算出的所有基线向量中选出产生单位权中误差最小那个基线向量结果，作为最终的解算结果，这就是所谓的基线向量整数解（或称固定解）。

$$\hat{X}_i = [\hat{X}_{C_i}],$$

$$Q_i = [Q_{\hat{X}_{C_i} \hat{X}_{C_i}}],$$

$$\hat{s}_{0i}$$

¹⁹ 此时所解求出的整周未知数为实数。

²⁰ $D_{\hat{X}_N \hat{X}_N} = \hat{s}_0^2 \cdot Q_{\hat{X}_N \hat{X}_N}$ 。

²¹ 可根据一定的置信水平来加以确定。

不过当出现以下情况时，则认为整周未知数无法确定，而无法求出该基线向量的整数解。

$$\frac{\hat{S}_{0\text{次最小}}}{\hat{S}_{0\text{最小}}} \leq T$$

$$T = z_{F, f, f; 1-a/2}$$

$z_{F, f, f; 1-a/2}$ 是置信水平为 $1-a$ 时的 F 分布的接受域，其自由度为 f 和 f 。

其中：

$\frac{\hat{S}_{0\text{次最小}}}{\hat{S}_{0\text{最小}}}$ 称为 *RATIO* 值；

\hat{S}_{0i} 也被称为 *RMS*；

$tr(Q)$ 称为 *RDOP* 值。

3. 确定基线向量的固定解

当确定了整周未知数的整数值后，与之相对应的基线向量就是基线向量的整数解。

第2节 GPS 基线解算的分类

一、 单基线解算

1. 定义

当有 m 台 GPS 接收机进行了一个时段的同步观测后，每两台接收机之间就可以形成一条基线向量，共有 $1/2 \cdot m(m-1)$ 条同步观测基线，其中最多可以选出相互独立的 $m-1$ 条同步观测基线，至于这 $m-1$ 条独立基线如何选取，只要保证所选的 $m-1$ 条独立基线不构成闭和环就可以了。这也是说，凡是构成了闭和环的同步基线是函数相关的，同步观测所获得的独立基线虽然不具有函数相关的特性，但它们却是误差相关的，实际上所有的同步观测基线间都是误差相关的。所谓单基线解算，就是在基线解算时不顾及同步观测基线间的误差相关性，对每条基线单独进行解算。

2. 特点

单基线解算的算法简单，但由于其解算结果无法反映同步基线间的误差相关的特性，不利于后面的网平差处理，一般只用在普通等级 GPS 网的测设中。

二、 多基线解

1. 定义

与单基线解算不同的是，多基线解算顾及了同步观测基线间的误差相关性，在基线解算时对所有同步观测的独立基线一并解算。

2. 特点

多基线解由于在基线解算时顾及了同步观测基线间的误差相关特性，因此，在理论上是严密的。

第3节 基线解算阶段的质量控制

一、 质量控制指标及其应用

1. 质量控制指标

■ 单位权方差因子 \hat{s}_0

■ 定义

$$\hat{s}_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{f}}$$

其中：

V 为观测值的残差；

P 为观测值的权；

n 为观测值的总数。

■ 实质

单位权方差因子又称为参考因子。

■ 数据删除率

■ 定义

在基线解算时，如果观测值的改正数大于某一个阈值时，则认为该观测值含有粗差，则需要将其删除。被删除观测值的数量与观测值的总数的比值，就是所谓的数据删除率。

■ 实质

数据删除率从某一方面反映出了 GPS 原始观测值的质量。数据删除率越高，说明观测值的质量越差。

■ **RATIO**

■ 定义

$$RATIO = RMS_{\text{次最小}} / RMS_{\text{最小}}$$

显然, $RATIO \geq 1.0$

■ 实质

$RATIO$ 反映了所确定出的整周未知数参数的可靠性, 这一指标取决于多种因素, 既与观测值的质量有关, 也与观测条件²²的好坏有关。

■ **RDOP**

■ 定义

所谓 $RDOP$ 值指的是在基线解算时待定参数的协因数阵的迹 ($tr(Q)$) 的平方根, 即 $RDOP = (tr(Q))^{1/2}$ $RDOP$ 值的大小与基线位置和卫星在空间中的几何分布及运行轨迹 (即观测条件) 有关, 当基线位置确定后, $RDOP$ 值就只与观测条件有关了, 而观测条件又是时间的函数, 因此, 实际上对与某条基线向量来讲, 其 $RDOP$ 值的大小与观测时间段有关。

■ 实质

$RDOP$ 表明了 GPS 卫星的状态对相对定位的影响, 即取决于观测条件的好坏, 它不受观测值质量好坏的影响。

■ **RMS**

■ 定义

RMS 即均方根误差 (Root Mean Square), 即:

$$RMS = \sqrt{\frac{V^T V}{n-1}}$$

其中:

V 为观测值的残差;

P 为观测值的权;

n 为观测值的总数。

■ 实质

RMS 表明了观测值的质量, 观测值质量越好, RMS 越小, 反之, 观测值质量越差, 则 RMS 越大, 它不受观测条件 (观测期间卫星分布图形) 的好坏的影响。

依照数理统计的理论观测值误差落在 1.96 倍 RMS 的范围内的概率是 95%。

■ **同步环闭合差**

■ 定义

同步环闭合差是由同步观测基线所组成的闭合环的闭合差²³。

²² 在 GPS 测量中的观测条件指的是卫星星座的几何图形和运行轨迹。

²³ 所谓环的闭和差有以下几类:

■ 特点及作用

由于同步观测基线间具有一定的内在联系，从而使得同步环闭合差在理论上应总是为 0 的，如果同步环闭合差超限，则说明组成同步环的基线中至少存在一条基线向量是错误的，但反过来，如果同步环闭合差没有超限，还不能说明组成同步环的所有基线在质量上均合格。

■ 异步环闭合差

■ 定义

不是完全由同步观测基线所组成的闭合环称为异步环，异步环的闭合差称为异步环闭合差。

■ 特点及作用

当异步环闭合差满足限差要求时，则表明组成异步环的基线向量的质量是合格的；当异步环闭合差不满足限差要求时，则表明组成异步环的基线向量中至少有一条基线向量的质量不合格，要确定出哪些基线向量的质量不合格，可以通过多个相邻的异步环或重复基线来进行。

■ 重复基线较差

■ 定义

不同观测时段，对同一条基线的观测结果，就是所谓重复基线。这些观测结果之间的差异，就是重复基线较差。

二、应用

RATIO、*RDOP* 和 *RMS* 这几个质量指标只具有某种相对意义，它们数值的高低不能绝对的说明基线质量的高低。若 *RMS* 偏大，则说明观测值质量较差²⁴，若 *RDOP* 值较大，则说明观测条件较差。

第4节 影响 GPS 基线解算结果的几个因素及其应对方法

一、影响 GPS 基线解算结果的几个因素

影响基线解算结果的因素主要有以下几条：

■ 基线解算时所设定的起点坐标不准确

起点坐标不准确，会导致基线出现尺度和方向上的偏差。

$$\text{分量闭合差：} \mathbf{e}_{\Delta X} = \sum \Delta X ; \mathbf{e}_{\Delta Y} = \sum \Delta Y ; \mathbf{e}_{\Delta Z} = \sum \Delta Z 。$$

$$\text{全长相对闭合差：} \mathbf{e} = (\mathbf{e}_{\Delta X}^2 + \mathbf{e}_{\Delta Y}^2 + \mathbf{e}_{\Delta Z}^2)^{1/2} / \sum S ， \text{其中：} \sum S \text{ 为环长。}$$

²⁴ 观测值质量的好坏取决于接收机的测相精度的高低，周跳修复是否完全，对流层和电离层延迟的影响是否完全消除，以及多路径效应是否严重等因素。

- 少数卫星的观测时间太短，导致这些卫星的整周未知数无法准确确定
当卫星的观测时间太短时，会导致与该颗卫星有关的整周未知数无法准确确定，而对与基线解算来讲，对于参与计算的卫星，如果与其相关的整周未知数没有准确确定的话，就将影响整个
- 在整个观测时段里，有个别时间段里周跳太多，致使周跳修复不完善
- 在观测时段内，多路径效应比较严重，观测值的改正数普遍较大
- 对流层或电离层折射影响过大

二、影响 GPS 基线解算结果因素的判别及应对措施

1. 影响 GPS 基线解算结果因素的判别

■ 概述

对于影响 GPS 基线解算结果因素，有些是较容易判别的，如卫星观测时间太短、周跳太多、多路径效应严重、对流层或电离层折射影响过大等；但对于另外一些因素却不好判断了，如起点坐标不准确。

■ 基线起点坐标不准确的判别

对于由起点坐标不准确所以对基线解算质量造成的影响，目前还没有较容易的方法来加以判别，因此，在实际工作中，只有尽量提高起点坐标的准确度，以避免这种情况的发生。

■ 卫星观测时间短的判别

关于卫星观测时间太短这类问题的判断比较简单，只要查看观测数据的记录文件中有关对与每个卫星的观测数据的数量就可以了，有些数据处理软件还输出卫星的可见性图，这就更直观了。

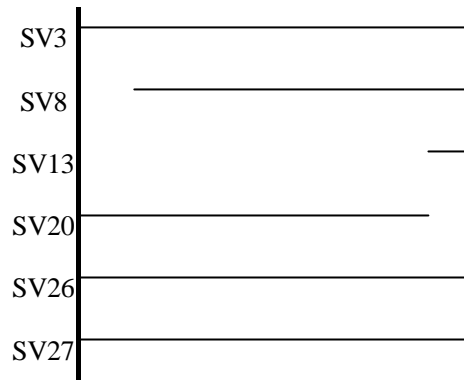


图8 卫星的可见性图（示例）

■ 周跳太多的判别

对于卫星观测值中周跳太多的情况，可以从基线解算后所获得的观测值残差上来分析。目前，大部分的基线处理软件一般采用的双差观测值，当在某测站对某颗卫星的观测值中含有未修复的周跳时，与此相关的所有双差观测值的残差都会出现显著的整数倍的增大。

■ 多路径效应严重、对流层或电离层折射影响过大的判别

对于多路径效应、对流层或电离层折射影响的判别，我们也是通过观测值残差来进行的。不过与整周跳变不同的是，当路径效应严重、对流层或电离层折射影响过大时，观测值残差不是象周跳未修复那样出现整数倍的增大，而只是出现非整数倍的增大，一般不超过 1 周，但却又明显地大于正常观测值的残差。

2. 应对措施

■ 基线起点坐标不准确的应对方法

要解决基线起点坐标不准确的问题，可以在进行基线解算时，使用坐标准确度较高的点作为基线解算的起点，较为准确的起点坐标可以通过进行较长时间的单点定位或通过 WGS-84 坐标较准确的点联测得到；也可以采用在进行整网的基线解算时，所有基线起点的坐标均由一个点坐标衍生而来，使得基线结果均具有某一系统偏差，然后在 GPS 网平差处理时，引入系统参数的方法加以解决。

■ 卫星观测时间短的应对方法

若某颗卫星的观测时间太短，则可以删除该卫星的观测数据，不让它们参加基线解算，这样可以保证基线解算结果的质量。

■ 周跳太多的的应对方法

若多颗卫星在相同的时间段内经常发生周跳时，则可采用删除周跳严重的时间段的方法，来尝试改善基线解算结果的质量；若只是个别卫星经常发生周跳，则可采用删除经常发生周跳的卫星的观测值的方法，来尝试改善基线解算结果的质量。

■ 多路径效应严重

由于多路径效应往往造成观测值残差较大，因此，可以通过缩小编辑因子的方法来剔除残差较大的观测值；另外，也可以采用删除多路径效应严重的时间段或卫星的方法。

■ 对流层或电离层折射影响过大的应对方法

对于对流层或电离层折射影响过大的问题，可以采用下列方法：

1. 提高截止高度角，剔除易受对流层或电离层影响的低高度角观测数据。但这种方法，具有一定的盲目性，因为，高度角低的信号，不一定受对流层或电离层的影响就大。
2. 分别采用模型对对流层和电离层延迟进行改正。
3. 如果观测值是双频观测值，则可以使用消除了电离层折射影响的观测值来进行基线解算。

3. 基线精化处理的有力工具-残差图

在基线解算时经常要判断影响基线解算结果质量的因素，或需要确定哪颗卫星或哪段时间的观测值质量上有问题，残差图对于完成这些工作非常有用。所谓残差图就是根据观测值的残差绘制的一种图表。

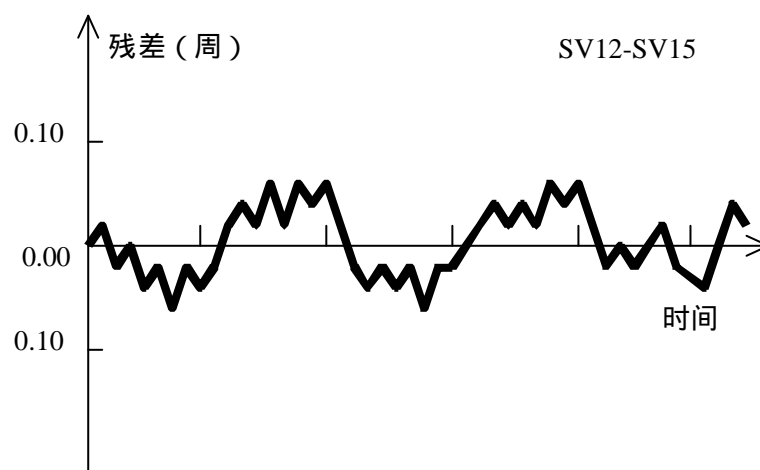


图9 残差图

上图是一种常见双差分观测值残差图的形式，它的横轴表示观测时间，纵轴表示观测值的残差，右上角的“SV12-SV15”表示此残差是SV12号卫星与SV15号卫星的差分观测值的残差。正常的残差图一般为残差绕着零轴上下摆动，振幅一般不超过0.1周。

下面三个图表明SV12号卫星的观测值中含有周跳。

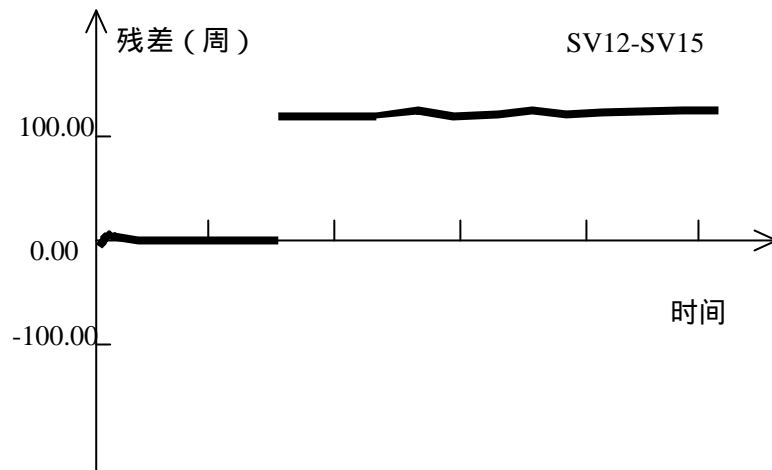


图10 SV12 含有周跳的残差图 (1)

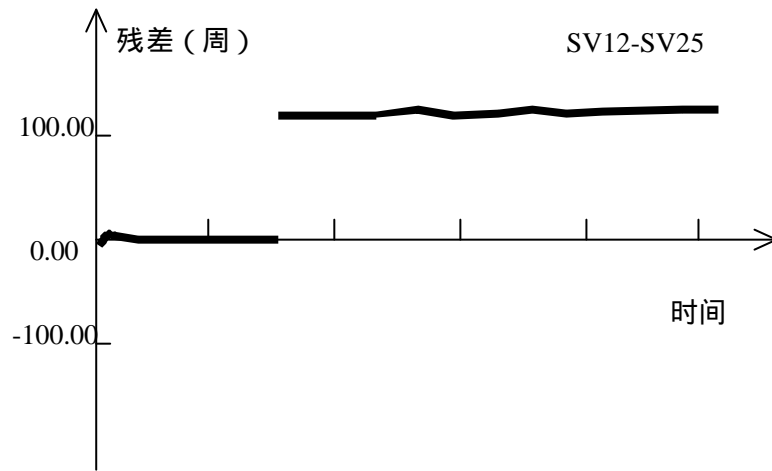


图11 SV12 含有周跳的残差图 (2)

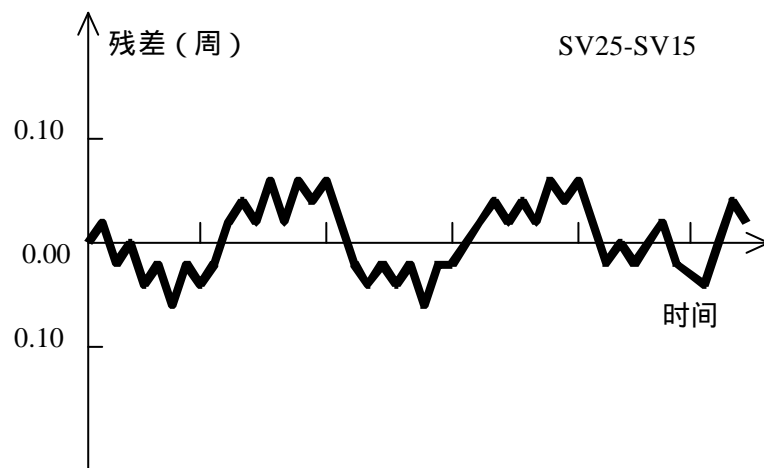


图12 SV12 含有周跳的残差图 (3)

下面三个残差图表明 SV25 在 $T_1 \sim T_2$ 时间段内受不明因素（可能是多路径效应、对流层折射、电离层折射或强电磁波干扰）影响严重。

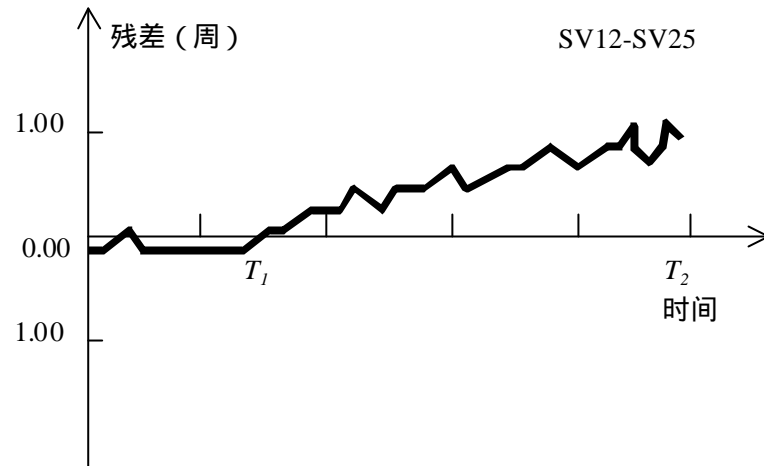


图13 SV25 受不明因素影响残差图 (1)

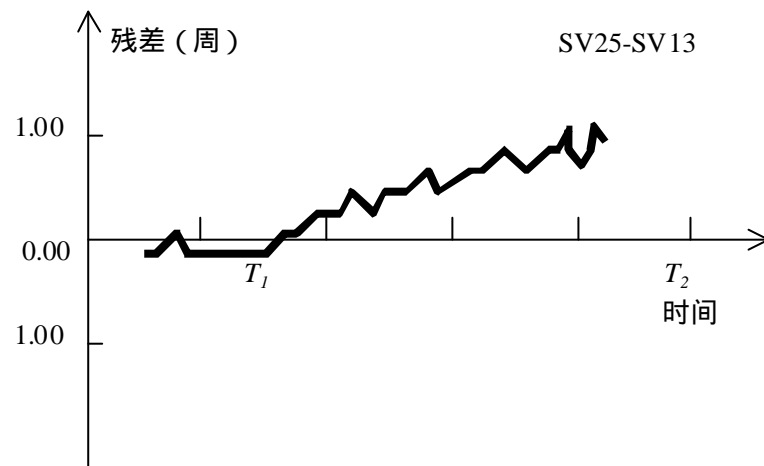


图14 SV25 受不明因素影响残差图 (2)

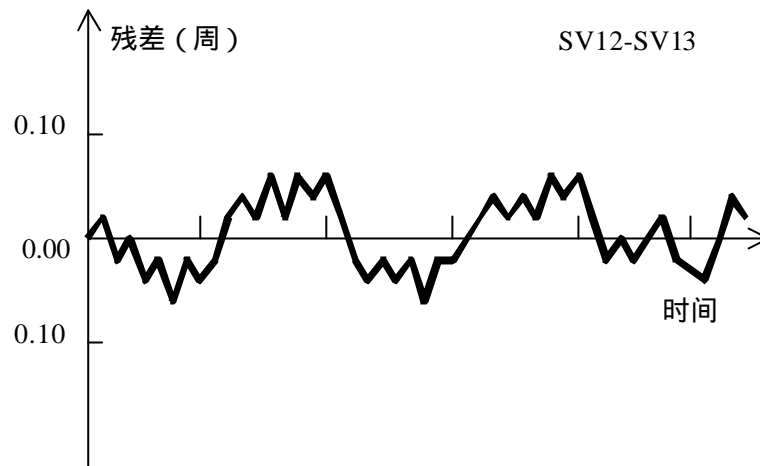


图15 SV25 受不明因素影响残差图 (3)

第5节 GPS 基线解算的过程

每一个厂商所生产的接收机都会配备相应的数据处理软件，它们在使用方法都会有各自不同的特点，但是，无论是那种软件，它们在使用步骤上却是大体相同的。

GPS 基线解算的过程是：

1. 原始观测数据的读入

在进行基线解算时，首先需要读取原始的 GPS 观测值数据。一般说来，各接收机厂商随接收机一起提供的数据处理软件都可以直接处理从接收机中传输出来的 GPS 原始观测值数据，而由第三方所开发的数据处理软件则不一定能对各接收机的原始观测值数据进行处理，要处理这些数据，首先需要进行格式转换。目前，最常用的格式是 RINEX 格式，对于按此种格式存储的数据，大部分的数据处理软件都能直接处理。

2. 外业输入数据的检查与修改

在读入了 GPS 观测值数据后，就需要对观测数据进行必要的检查，检查的项目包括：测站名、点号、测站坐标、天线高等。对这些项目进行检查的目的，是为了避免外业操作时的误操作。

3. 设定基线解算的控制参数

基线解算的控制参数用以确定数据处理软件采用何种处理方法来进行基线解算，设定基线解算的控制参数是基线解算时的一个非常重要的环节，通过控制参数的设定，可以实现基线的精化处理。

4. 基线解算

基线解算的过程一般是自动进行的，无需过多的人工干预。

5. 基线质量的检验

基线解算完毕后，基线结果并不能马上用于后续的处理，还必须对基线的质量进行检验，只有质量合格的基线才能用于后续的处理，如果不合格，则需要对基线进行重新解算或重新测量。基线的质量检验需要通过 *RATIO*、*RDOP*、*RMS*、同步环闭和差、异步环闭和差和重复基线较差来进行。

6. 结束

第7章 GPS 基线向量网平差

GPS 基线解算就是利用 GPS 观测值，通过数据处理，得到测站的坐标或测站间的基线向量值。

在布设 GPS 网时，首先需对构成 GPS 网的基线进行观测，并利用所采集到的 GPS 数据进行数据处理，通过基线解算，获得具有同步观测数据的测站间的基线向量。为了确定 GPS 网中各个点在某一特定坐标系下的绝对坐标，需要提供位置基准、方位基准和尺度基准，而一条 GPS 基线向量只含有在 WGS-84 下的水平方位、垂直方位和尺度信息，通过多条 GPS 基线向量可以提供网的方位基准和尺度基准，由于 GPS 基线向量中不含有确定网中各点绝对坐标的位置基准信息，因此，仅凭 GPS 基线向量所提供的基准信息，是无法确定出网中各点的绝对坐标的。而我们布设 GPS 网的主要目的是确定网中各个点在某一特定局部坐标系下的坐标，这就需要从外部引入位置基准，这个外部基准通常是通过一个以上的起算点来提供的。网平差时可利用所引入的起算数据来计算出网中各点的坐标。当然，GPS 基线向量网的平差，除了可以解求出待定点的坐标以外，还可以发现和剔除 GPS 基线向量观测值和地面观测中的粗差，消除由于各种类型的误差而引起的矛盾，并评定观测成果的精度。

第1节 GPS 网平差的分类

GPS 网平差的类型有多种，根据平差所进行的坐标空间，可将 GPS 网平差分为三维平差和二维平差，根据平差时所采用的观测值和起算数据的数量和类型，可将平差分为无约束平差、约束平差和联合平差等。

一、 三维平差和二维平差

1. 三维平差

所谓三维平差是指平差在三维空间坐标系中进行，观测值为三维空间中的观测值，解算出的结果为点的三维空间坐标。GPS 网的三维平差，一般在三维空间直角坐标系或三维空间大地坐标系下进行。

2. 二维平差

所谓二维平差是指平差在二维平面坐标系下进行，观测值为二维观测值，解算出的结果为点的二维平面坐标。二维平差一般适合于小范围 GPS 网的平差。

二、 无约束平差、约束平差和联合平差

1. 无约束平差

GPS 网的无约束平差指的是在平差时不引入会造成 GPS 网产生由非观测测量所引起的变形的外部起算数据。常见的 GPS 网的无约束平差，一般是在平差时没有起算数据或没有多余的起算数据。

2. 约束平差

GPS 网的约束平差指的是平差时所采用的观测值完全是 GPS 观测值（即 GPS 基线向量），而且，在平差时引入了使得 GPS 网产生由非观测测量所引起的变形的外部起算数据。

3. 联合平差

GPS 网的联合平差指的是平差时所采用的观测值除了 GPS 观测值以外，还采用了地面常规观测值，这些地面常规观测值包括边长、方向、角度等观测值等。

第2节 GPS 网平差原理

一、 三维无约束平差

1. 定义

所谓 GPS 网的三维无约束平差是指平差在 WGS-84 三维空间直角坐标系下进行，平差时不引入使得 GPS 网产生由非观测测量所引起的变形的的外部约束条件。具体地说，就是在进行平差时，所采用的起算条件不超过三个。对于 GPS 网来说，在进行三维平差时，其必要的起算条件的数量为三个，这三个起算条件既可以是一个起算点的三维坐标向量，也可以是其它的起算条件。

2. 作用

GPS 网的三维无约束平差有以下三个主要作用：

- 评定 GPS 网的内部符合精度，发现和剔除 GPS 观测值中可能存在的粗差
由于三维无约束平差的结果完全取决于 GPS 网的布设方法和 GPS 观测值的质量，因此，三维无约束平差的结果就完全反映了 GPS 网本身的质量好坏，如果平差结果质量不好，则说明 GPS 网的布设或 GPS 观测值的质量有问题；反之，则说明 GPS 网的布设或 GPS 观测值的质量没有问题。
- 得到 GPS 网中各个点在 WGS-84 系下经过了平差处理的三维空间直角坐标

在进行 GPS 网的三维无约束平差时，如果指定网中某点准确的 WGS-84 坐标作为起算点，则最后可得到的 GPS 网中各个点经过了平差处理的在 WGS-84 系下的坐标。

- 为将来可能进行的高程拟合，提供经过了平差处理的大地高数据
用 GPS 水准替代常规水准测量获取各点的正高或正常高是目前 GPS 应用中一个较新的领域，现在一般采用的是利用公共点进行高程拟合的方法。在进行高程拟合之前，必须获得经过平差的大地高数据，三维无约束平差可以提供这些数据。

3. 原理

在 GPS 网三维无约束平差中所采用的观测值为基线向量，即 GPS 基线的起点到终点的坐标差，因此，对与每一条基线向量，都可以列出如下的一组观测方程：

$$\begin{bmatrix} v_{\Delta X} \\ v_{\Delta Y} \\ v_{\Delta Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_i \\ dY_i \\ dZ_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_j \\ dY_j \\ dZ_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} - X_i^0 + X_j^0 \\ \Delta Y_{ij} - Y_i^0 + Y_j^0 \\ \Delta Z_{ij} - Z_i^0 + Z_j^0 \end{bmatrix}$$

与此相对应的方差-协方差阵、协因数阵和权阵分别为：

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{\Delta X}^2 & \mathbf{s}_{\Delta X \Delta Y} & \mathbf{s}_{\Delta X \Delta Z} \\ \mathbf{s}_{\Delta Y \Delta X} & \mathbf{s}_{\Delta Y}^2 & \mathbf{s}_{\Delta Y \Delta Z} \\ \mathbf{s}_{\Delta Z \Delta X} & \mathbf{s}_{\Delta Z \Delta Y} & \mathbf{s}_{\Delta Z}^2 \end{bmatrix},$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{\mathbf{s}_0^2} D_{ij}$$

$$P_{ij} = D_{ij}^{-1}$$

\mathbf{s}_0 为先验的单位权中误差。

平差所用的观测方程就是通过上面的方法列出的，但为了使平差进行下去，还必须引入位置基准，引入位置基准的方法一般有两种。第一种是以 GPS 网中一个点的 WGS-84 坐标作为起算的位置基准，即可有一个基准方程：

$$\begin{bmatrix} dX_i \\ dY_i \\ dZ_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i^0 \\ Y_i^0 \\ Z_i^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = 0$$

第二种是采用秩亏自由网基准，引入下面的基准方程：

$$G^T dB = 0$$

$$G^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [E \quad E \quad E \quad \dots \quad E]$$

$$\begin{aligned} dB &= [db_1 \quad db_2 \quad db_3 \quad \dots \quad db_n]^T \\ &= [dX_1 \quad dY_1 \quad dZ_1 \quad \dots \quad dX_n \quad dY_n \quad dZ_n]^T \end{aligned}$$

根据上面的观测方程和基准方程，按照最小二乘原理进行平差解算，得到平差结果。

$$\text{待定点坐标参数: } \begin{bmatrix} \widehat{X}_1 \\ \widehat{Y}_1 \\ \widehat{Z}_1 \\ \dots \\ \widehat{X}_n \\ \widehat{Y}_n \\ \widehat{Z}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^0 \\ Y_1^0 \\ Z_1^0 \\ \dots \\ X_n^0 \\ Y_n^0 \\ Z_n^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\widehat{X}_1 \\ d\widehat{Y}_1 \\ d\widehat{Z}_1 \\ \dots \\ d\widehat{X}_n \\ d\widehat{Y}_n \\ d\widehat{Z}_n \end{bmatrix}$$

单位权中误差： $\widehat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{3n - 3p + 3}}$ ；其中 n 为组成 GPS 网的基线数， p 为基线数。

协因数阵： Q

4. 单位权方差的检验

平差后单位权方差的估值 $\widehat{\sigma}_0^2$ 应与平差前先验的单位权方差 σ_0^2 一致，判断它们是否一致可以采用 c^2 -检验。

原假设 $H_0: \widehat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$

备选假设 $H_1: \widehat{\sigma}_0^2 \neq \sigma_0^2$

其中：

$$\widehat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{3n - 3p + 3}$$

若：

$$\frac{V^T P V}{c_{a/2}^2} < \sigma_0^2 < \frac{V^T P V}{c_{1-a/2}^2} ; \text{其中 } a \text{ 为显著性水平}$$

则 H_0 成立；反之，则 H_1 成立。

二、 三维联合平差

GPS 网的三维联合平差一般是在某一个地方坐标系下进行的，平差所采用的观测量除了 GPS 基线向量外，有可能还引入了常规的地面观测值，这些常规的地面观测值包括边长观测值、角度观测值、方向观测值等；平差所采用的起算数据一般为地面点的三维大地坐标，除此之外，有时还加入了已知边长和已知方位等作为起算数据。

三、 二维联合平差

二维联合平差与三维联合平差很相似，不同的是二维联合平差一般在一个平面坐标系下进行。与三维联合平差一样的是，平差所采用的观测量除了 GPS 基线向量外，有可能还引入了常规的地面观测值，这些常规的地面观测值包括边长观测值、角度观测值、方向观测值等；平差所采用的起算数据一般为地面点的二维平面坐标，除此之外，有时还加入了已知边长和已知方位等作为起算数据。

第3节 GPS 网平差的过程

在使用数据处理软件进行 GPS 网平差时，需要按以下几个步骤来进行：

- 提取基线向量，构建 GPS 基线向量网
- 三维无约束平差
- 约束平差/联合平差
- 质量分析与控制

一、 提取基线向量，构建 GPS 基线向量网

要进行 GPS 网平差，首先必须提取基线向量，构建 GPS 基线向量网。提取基线向量时需要遵循以下几项原则：

- 必须选取相互独立的基线，若选取了不相互独立的基线，则平差结果会与真实的情况不相符合。
- 所选取的基线应构成闭合的几何图形。
- 选取质量好的基线向量，基线质量的好坏，可以依据 RMS 、 $RDOP$ 、 $RATIO$ 、同步环闭和差、异步环闭和差和重复基线较差来判定。
- 选取能构成边数较少的异步环的基线向量。
- 选取边长较短的基线向量。

二、 三维无约束平差

在构成了 GPS 基线向量网后，需要进行 GPS 网的三维无约束平差，通过无约束平差主要达到以下几个目的：

- 根据无约束平差的结果，判别在所构成的 GPS 网中是否有粗差基线，如发现含有粗差的基线，需要进行相应的处理，必须使得最后用于构网的所有基线向量均满足质量要求。
- 调整各基线向量观测值的权，使得它们相互匹配。

三、 约束平差/联合平差

在进行完三维无约束平差后，需要进行约束平差或联合平差，平差可根据需要在三维空间进行或二维空间中进行。

约束平差的具体步骤是：

- 指定进行平差的基准和坐标系统。
- 指定起算数据。
- 检验约束条件的质量。
- 进行平差解算。

四、 质量分析与控制

在这一步，进行 GPS 网质量的评定，在评定时可以采用下面的指标：

- 基线向量的改正数。

根据基线向量的改正数的大小，可以判断出基线向量中是否含有粗差。具体判定依据是，若： $|v_i| < \hat{s}_0 \cdot \sqrt{q_i} \cdot t_{1-\alpha/2}$ ²⁵，则认为基线向量中不含有粗差；反之，则含有粗差。

- 相邻点的中误差和相对中误差。

若在进行质量评定时，发现有质量问题，需要根据具体情况进行处理，如果发现构成 GPS 网的基线中含有粗差，则需要采用删除含有粗差的基线、重新对含有粗差的基线进行解算或重测含有粗差的基线等方法加以解决；如果发现个别起算数据有质量问题，则应该放弃有质量问题的起算数据。

第4节 GPS 网平差中起算数据的检验

在进行 GPS 网的约束平差或联合平差时，起算数据质量的检验是很必要的，由于在 GPS 网平差中所用的起算数据一般为点的坐标，因此，在这里将主要介绍对起算点坐标的检验。

一、 方差检验法

在进行三维无约束平差，要进行方差估计，调整观测值的权，直至验后的单位权方差与先验的单位权方差相容²⁶。在进行约束平差时，以三维无约束平差所得到的验后单位权方差作为先验的单位权方差，逐个加入起算数据进行平差解算，同时检验验后的单位权方差与先验的单位权方差之间的相容性，当在加入了某一起算数据后发现它们不一致，则说明该起算数据可能存在质量问题。

二、 符合路线法

符合路线法是从一个起算点通过一条由 GPS 基线向量组成的 GPS 导线推算另一个起算点的坐标，将此坐标与已知值比较，根据它们差异的大小来判断起算点的质量。为准确地判断起算点质量的好坏，一般需要采用多条符合路线。

三、 检查点法

在进行平差解算时，不将所有起算点坐标固定，而是保留一个点作为检查点，平差后比较该点坐标的平差值和已知值，根据它们差异的大小来判断起算点质量的好坏。为准确地判断起算点质量的好坏，一般需要轮换地将各个起算点分别作为检查点。

²⁵ v_i 为观测值残差， \hat{s}_0 为单位权方差， q_i 为第 i 个观测值的协因数， $t_{1-\alpha/2}$ 为在显著性水平 α 下的 t 分布的区间。

²⁶ 要求统计量 $\frac{f \cdot \hat{s}_0^2}{s_0^2}$ 通过 c^2 -检验，其中 f 为自由度。

第8章 GPS 高程

第1节 高程系统

在测量中常用的高程系统有大地高系统、正高系统和正常高系统。

一、 大地高系统

大地高系统是以参考椭球面为基准面的高程系统。某点的大地高是该点到通过该点的参考椭球的法线与参考椭球面的交点间的距离。大地高也称为椭球高，大地高一般用符号 H 表示。大地高是一个纯几何量，不具有物理意义，同一个点，在不同的基准下，具有不同的大地高。

二、 正高系统

正高系统是以大地水准面为基准面的高程系统。某点的正高是该点到通过该点的铅垂线与大地水准面的交点之间的距离，正高用符号 H_g 表示。

三、 正常高

正常高系统是以似大地水准面为基准的高程系统。某点的正常高是该点到通过该点的铅垂线与似大地水准面的交点之间的距离，正常高用 H_g 表示。

四、 高程系统之间的转换关系

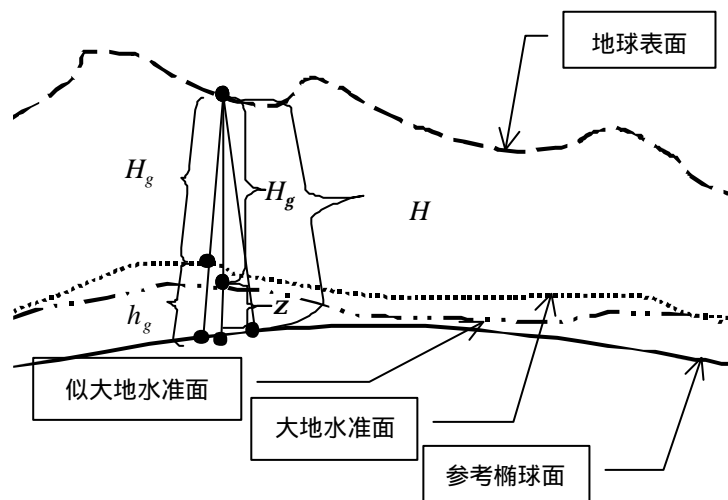


图16 高程系统间的相互关系

大地水准面到参考椭球面的距离，称为大地水准面差距，记为 h_g 。大地高与正高之间的关系可以表示为：

$$H = H_g + h_g$$

似大地水准面到参考椭球面的距离，称为高程异常，记为 z 。大地高与正常高之间的关系可以表示为：

$$H = H_g + z$$

第2节 GPS 高程的方法

由于采用 GPS 观测所得到的是大地高，为了确定出正高或正常高，需要有大地水准面差距或高程异常数据。

一、等值线图法

从高程异常图或大地水准面差距图分别查出各点的高程异常 z 或大地水准面差距 h_g ，然后分别采用下面两式可计算出正常高 H_g 和正高 H_g 。

$$\text{正常高： } H_g = H - z$$

$$\text{正高： } H_g = H - h_g$$

在采用等值线图法确定点的正常高和正高时要注意以下几个问题：

- 注意等值线图所适用的坐标系统，在求解正常高或正高时，要采用相应坐标系统的大地高数据。
- 采用等值线图法确定正常高或正高，其结果的精度在很大程度上取决于等值线图的精度。

二、地球模型法

地球模型法本质上是一种数字化的等值线图，目前国际上较常采用的地球模型有 OSU91A 等。不过可惜的是这些模型均不适合于我国。

三、高程拟合法

1. 基本原理

所谓高程拟合法就是利用在范围不大的区域中，高程异常具有一定的几何相关性这一原理，采用数学方法，求解正高、正常高或高程异常。

将高程异常表示为下面多项式的形式，

零次多项式：

$$z = a_0$$

一次多项式：

$$z = a_0 + a_1 \cdot dB + a_2 \cdot dL$$

二次多项式：

$$z = a_0 + a_1 \cdot dB + a_2 \cdot dL + a_3 \cdot dB^2 + a_4 \cdot dL^2 + a_5 \cdot dB \cdot dL$$

其中：

$$dB = B - B_0 ;$$

$$dL = L - L_0 ;$$

$$B_0 = \frac{1}{n} \sum B ;$$

$$L_0 = \frac{1}{n} \sum L ;$$

n 为 GPS 网的点数。

利用公共点上 GPS 测定的大地高和水准测量测定的正常高计算出该点上的高程异常 z ，存在一个这样的公共点，就可以依据上式列出一个方程：

$$z_i = a_0 + a_1 \cdot dB_i + a_2 \cdot dL_i + a_3 \cdot dB_i^2 + a_4 \cdot dL_i^2 + a_5 \cdot dB_i \cdot dL_i$$

若共存在 m 个这样的公共点，则可列出 m 个方程。

$$z_1 = a_0 + a_1 \cdot dB_1 + a_2 \cdot dL_1 + a_3 \cdot dB_1^2 + a_4 \cdot dL_1^2 + a_5 \cdot dB_1 \cdot dL_1$$

$$z_2 = a_0 + a_1 \cdot dB_2 + a_2 \cdot dL_2 + a_3 \cdot dB_2^2 + a_4 \cdot dL_2^2 + a_5 \cdot dB_2 \cdot dL_2$$

.....

$$z_m = a_0 + a_1 \cdot dB_m + a_2 \cdot dL_m + a_3 \cdot dB_m^2 + a_4 \cdot dL_m^2 + a_5 \cdot dB_m \cdot dL_m$$

即有：

$$V = Ax + L$$

其中：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & dB_1 & dL_1 & dB_1^2 & dL_1^2 & dB_1 \cdot dL_1 \\ 1 & dB_2 & dL_2 & dB_2^2 & dL_2^2 & dB_2 \cdot dL_2 \\ \dots\dots\dots \\ 1 & dB_m & dL_m & dB_m^2 & dL_m^2 & dB_m \cdot dL_m \end{bmatrix}$$

$$x = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5]^T$$

$$V = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_m]^T$$

通过最小二乘法可以求解出多项式的系数：

$$x = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L)$$

其中：

P 为权阵，它可以根据水准高程和 GPS 所测得的大地高的精度来加以确定。

2. 注意事项

■ 适用范围

上面介绍的高程拟合的方法，是一种纯几何的方法，因此，一般仅适用于高程异常变化较为平缓的地区（如平原地区），其拟合的准确度可达到一个分米以内。对于高程异常变化剧烈的地区（如山区），这种方法的准确度有限，这主要是因为在这类地区，高程异常的已知点很难将高程异常的特征表示出来。

■ 选择合适的高程异常已知点

所谓高程异常的已知点的高程异常值一般是通过水准测量测定正常高、通过 GPS 测量测定大地高后获得的。在实际工作中，一般采用在水准点上布设 GPS 点或对 GPS 点进行水准联测的方法来实现，为了获得好的拟合结果要求采用数量尽量多的已知点，它们应均匀分布，并且最好能够将整个 GPS 网包围起来。

■ 高程异常已知点的数量

若要用零次多项式进行高程拟合时，要确定 1 个参数，因此，需要 1 个以上的已知点；若要采用一次多项式进行高程拟合，要确定 3 个参数，需要 3 个以上的已知点；若要采用二次多项式进行高程拟合，要确定 6 个参数，则需要 6 个以上的已知点。

■ 分区拟合法

若拟合区域较大，可采用分区拟合的方法，即将整个 GPS 网划分为若干区域，利用位于各个区域中的已知点分别拟合出该区域中的各点的高程异常值，从而确定出它们的正常高。下图是一个分区拟合的示意图，拟合分两个区域进行，以虚线为界，位于虚线上的已知点两个区域都采用。

第9章 技术总结

第1节 技术总结的作用

在完成了 GPS 网的布设后，应该认真完成技术总结。每项 GPS 工程的技术总结不仅是工程一系列必要文档的主要组成部分，而且它能够使各方面对工程的各个细节有完整而充分的了解，从而便于今后对成果的充分而全面地加以利用。另一方面，通过对整个工程的总结，测量作业单位还能够总结经验，发现不足，为今后进行新的工程提供参考。

第2节 技术总结的内容

技术设计需要包含以下内容：

- 项目来源
介绍项目的来源、性质。
- 测区概况
介绍测区的地理位置、气候、人文、经济发展状况、交通条件、通讯条件等。
- 工程概况
介绍工程目的、作用、要求、等级（精度）、完成时间等。
- 技术依据
介绍作业所依据的测量规范、工程规范、行业标准等。
- 施测方案
介绍测量所采用的仪器、采取的布网方法等。
- 作业情况
介绍外业观测时实际遵循的操作规程、技术要求（包括仪器参数的设置（如采样率、截止高度角等）、对中精度、整平精度、天线高的量测方法及精度要求等。）、作业观测情况、工作量、观测成果等。
- 观测质量控制
介绍外业观测的质量要求，包括质量控制方法及各项限差要求等。
- 数据处理情况
介绍数据处理方法、过程、结果及精度统计与分析情况。
- 结论
对整个工程的质量及成果作出结论。