

对我国GPS空间定位网若干技术问题的探讨

施品浩 冯延明 李征航

【摘要】 本文围绕我国GPS空间定位网布测的目的意义、布网方案及相应的精度指标,施测中应考虑的观测技术和数据处理策略等有关技术问题展开了较深入的讨论,并指出了结合定位网布测应开展的几项基础研究。最后,就以上问题总结了作者们的基本观点,供有关方面参考。

【关键词】 GPS定位; 观测技术; 数据处理; 精度标准

1 引言

发展国家GPS空间定位网是国家重点科研项目《现代地壳运动和地球动力学的研究及应用》的主要内容之一,是国家测绘局“八五”重点工程项目之一。它的完成将为我国未来10~20年测绘事业的发展奠定重要的基础。该网的技术方案(即项目设计书)由武汉测绘科技大学负责起草,协同陕西省测绘局等单位共同完成^[1]。目前该网的首期工程——青藏高原外业观测工作已经完成。

本文主要从技术的角度,对国家GPS空间定位网的建立所涉及的几个问题,提出来和同行们共同讨论。主要包括布网的目的意义,精度指标与方案,观测技术与数据处理,应用研究与开发等。

2 布网的目的及意义

国家GPS空间网的建立,是根据我国测绘事业,地球科学及国防建设等发展的需要与空间定位技术实际可能性而提出来的,因而是一个多用途的空间定位网。其重要意义在于如下几个方面:

1、建立和维持我国的三维地心坐标框架

地心坐标框架是在必要的理论、常数定义之下,由指定的参考测站的位置和运动来实现的^[4]。这些站应具有一定的精度、密度和合理的分布。VLBI(甚长基线干涉测量基线(上海—昆明))/SLR(卫星激光测距网)网的地心坐标被认为具有较高的精度,国外目前的先

收稿日期:1991-11-07

进水平是1米以内^[5]。但在我国,由于这些站分布集中且站数太少,满足不了实用要求。国家高精度GPS网密度大而分布广,具有得天独厚的优势,它不仅能提供绝对位置的信息,还可提供精确的相对位置信息,使我们有可能利用各种空间网的绝对位置信息和相对位置信息,建立更为精确的地心坐标系统。这是一项大地测量的基础工作,对于空间技术和国防建设的发展,具有尤为重要的意义。

2、精化我国的大地水准面

国家GPS空间网中各点原则上都应同时确定其水准高程(和水准点重合或进行水准联测),因而这些点上的大地水准面差距皆可准确确定。传统的天文水准和天文重力水准方法主要缺点是误差累积快,经济效益低,难以大规模实现。GPS观测量、水准资料及以重力测量方法为主体的其他独立的方法获得的地球模型(如我国的WLD—89模型)相结合,不仅可以厘米—分米级的精确度确定大地水准面差距之差,而且通过整体处理,还可以实现相应精度水平的精确的大地高与海拔高的转换。建立我国统一的高程系统。

3、检核和加强全国天文大地网。

我国天文大地网经过整体平差,具有相当好的内部符合精度。50 000多点的大地坐标,在我国国民经济建设中发挥了极为重要的作用,是国家的一笔宝贵财产。然而,由于该网是在不同年代由不同单位,根据不同的作业规范采用不同类型的仪器施测的,因而存在系统误差的影响,这种系统就造成网的局部扭曲和伸缩,并引起网外围(离大地原点较远地区)愈远系统偏离愈大。国家GPS空间网精度若高于天文大地网一到两个量级,不仅能够提高天文大地网的整体精度,而且能够确定天文大地网的更细微的局部形变,从而达到加强和改善该网的目的,以进一步发挥其作用。

4、地壳形变监测与地球动力学研究

利用现代空间技术来监测大陆板块或研究板块内部的构造运动,进行全球性或区域性地球动力学研究,是当今地学界研究工作的前沿。我国青藏高原是全球造山运动最强烈的地区之一,也是国内外地学工作者注目的热点。研究表明,从喜马拉雅山到天山山脉,地壳每年上升10厘米左右,从南到北递减。此外,许多大断裂带,如横断山脉(含川西断裂带),京津唐地区(燕山山脉),天山山脉至祁连山脉地壳运动也相当活跃。精确地测定这些地区的地壳运动,对于预报大地震灾害将起到重要作用。

除上述四个主要方面外,国家高精度GPS空面网还应该对分布在近海和远海的主要岛屿进行联测,为开展海洋大地测量提供统一的高精度的大地基准点,为海洋资源的勘探与开发,精确的领海划界,海洋船舶导航定位,海底地形测绘及海洋科学研究提供基础的测绘保障。此外,国家GPS网通过与沿海的验潮站联测,还可为测定海面升降和预报海浸灾害等,积累资料和奠定基础。

3 精度指标和布网方案

精度指标和布网方案是根据网的用途要求,及考虑到实际的技术可能性提出的。不同的用途对于精度和密度要求是不同的。为了既保证全网的质量同时也不造成浪费,我们建议用三个不同层次的布网方案并采用不同精度指标施测。

(1) 国家GPS大地测量基准网(或一级网),平均边长为800km,最长边控制在1500公里以内,最短边约为500km。目前按 $3\text{mm} + 0.1\text{ppm}$ 施测,目的在于提供全国范围GPS定位的参考基准,保持我国的地心坐标基本框架,并为正在建设中的我国GPS卫星定轨跟踪站提供必要的起算数据。今后的发展有三个方面:①作为更新我国地心框架的基本网,并通过国际联测,建立与全球地心框架的联系,从而从根本上解决我国的地心框架的改善和更新发展问题;②作为我国地壳运动的基本监测网,并与区域性地壳形变监测网和沿海地面沉降监测网构成整体,为其提供可靠基准;③用于地球动力学研究。基准网的未来发展应以 $3\text{mm} + 0.01\text{ppm}$ 精度指标施测(目前及近期我国的软件技术尚难达到此水平)。

(2) 国家GPS大地测量基本网(或称二级网),平均边长150公里左右,除个别困难地区外,基本上均匀复盖全国(环中间隔可达400公里左右),为前面所提的各项目标提供服务。从测绘专业的基本任务来说,主要解决全国范围的大地水准面的差距模型。东部平原、丘陵地区可能得到优于1.0米的内插精度,西部山区也能提供2米左右的精度,满足1:50 000地形图更新的需要。总点数在300~400个之间,目前施测精度应不低于 $5\text{mm} + 0.5\text{ppm}$;今后分期分批复测精确到 $5\text{mm} + 0.1\text{ppm}$,采用GPS轨道改进方式处理或使用精密星历处理。

(3) 国家GPS大地测量控制网(或三级网),其平均边长50~70km,施测精度为 $8\text{mm} + 1\text{ppm}$ 。目前仅在东部沿海省市开展,以后将根据需要和可能,逐步扩展到全国范围。总点数预计可达2500个左右。未来10年内不超过1000个。三级网在东部沿海地区可望提供优于 $\pm 0.2\text{m}$ 大地水准面起伏的分辨能力,直接为工农业生产施工测量提供平面和高程起算数据,为1:10 000基本图更新服务;该网扩展到西部山区时,也可望提供1米左右的大地水准面起伏,同样可以满足该地区的各种测量工程需要。

表1给出了上述各级GPS网的布设和施测的基本指标。各级网的点位具体分布,参见[1][2]。按照上述层次划分的一、二、三级GPS网与现有的I、II等全国天文大地网相衔接。为了方便起见,我们简称以上各级国家GPS空间大地测量网为“国家GPS网(National primary GPS NETWORK—NAGNET)。”

表 1

层 次	一	二	三
平均边长(km)	800	150	60
边长范围(km)	500~1500	60~300	20~150
目前施测精度	$3\text{mm} + 0.1\text{ppmd}^*$	$5\text{mm} + 0.5\text{ppmd}$	$8\text{mm} + 1\text{ppmd}$
今后复测精度	$3\text{mm} + 0.01\text{ppmd}$	$5\text{mm} + 0.1\text{ppmd}$	$8\text{mm} + 1\text{ppmd}$
总点数	<30	300~400	逐步扩展

*d为边长

4 观测技术与数据处理

GPS观测技术涉及到外业作业的各种具体细则。这些在武汉测绘科技大学所编写的《国家高精度GPS空间定位作业细则》[6]中已有详尽的描述,这里侧重于对外业作业的基本技

术指标和GPS 定位实践中归纳出来的对称性观测原则给予必要的讨论。

表 2 给出了各级GPS 网测量作业的基本技术设计指标。

表 2

精度层次	一	二	三
时段长度(分)	180	180/120*	120
时段数	8	4	2
相对图形强度因子	5	6	8
采样间隔(移)	15/60	15/60**	15/60
卫星高度角	10	10	15
总观测卫星数	12	9	6
总观测值象限分布	25±5%	25±10%	25±15%
观测值日夜光段	各占50%	各占50%	各占50%

*若采用精密星历,时段长度120分即可。

**采用外接原子钟时,可取60秒。

时段长度的选择是由处理方式和图形强度限制所决定的,三级网一般采用广播星历或精密星历处理,使用性能良好的能够精确确定相位模糊度双差处理,还可使时段长度进一步缩短;对于二级网,在没有精密星历可供利用的情况下,必须采用轨道改进方式定位处理,因此时段长度加强有利于求解轨道参数,对于一级网(基准网),要达到0.1ppm的定位水平即使使用精密星历,亦必须进行轨道改进处理。经验表明,3小时以上的弧长对于解算轨道参数是必要的。

时段数的选择主要是取决于精度要求。对于中低精度的应用而言,内部符合要求较低,不同时段解只要在一定范围内相吻合即可。对于高精度应用而言,如果由于采用了不同初值和不同数据弧段而得出不唯一的或不能在规定范围内相吻合的结果,显然是不能接受的。时段数的增加对于保证定位结果的收敛性是必要的。

观测的“对称性”原则,是大地测量中广泛采用的原则。例如三角测量中正、倒镜观测;日夜光段对称观测等。这些规则有力地消除了系统误差的影响,提高了观测成果的可靠性。对于GPS测量而言,这一原则同样适用。例如,日夜时段对称观测有助于减弱星历偏差的影响,以及电离层大气折射的影响,并能充分利用卫星弧段,提高绝对定位精度,因此上述技术指标中规定了光段对称分配观测法。接收机系统存在天线相位中心偏差,时段间采用交换仪器或顺序调换仪器的作业方式,可使这项偏差的影响通过处理得到消除或减弱。仪器常数偏差或仪器相对常数偏差的影响一般在1—2cm范围内。对于中低精度,如三级以下的GPS网,是无需考虑的。但对于监测地壳形变为目的的二级网有关区域网,这种影响已与形变量相当,必须予以考虑,否则不可能正确判断是地壳运动。一般而言,仪器常数实际上是随环境而发生变化,通过测前常数测定也不可能使问题得到完善的解决。因此,在必要的情况下,采用交换仪器等对称性观测措施,对于消除仪器系统偏差,提高成果的可靠性是很有意义的。需要指出的是交换仪器方式作业得到结果其重复性较之不搬动仪器的结果表面上要差一些,但实际上暴露出系统误差的影响,使之能够被分离从而提高定位可靠性。

传统的大地测量，测量精度主要取决于仪器。但在GPS测量中，数据处理是个相当重要的方面。同一组数据，不同的软件的处理结果，其精度可能要差几个量级。因此通常说某种仪器精度应该是该接收机及其商品软件的定位精度。

国家各级GPS网的数据处理主要分为外业概算、内业处理，以及全网整体平差三个阶段。

外业概算包括外业基线处理和数据检验两部分。前者利用广播星历并使用厂方软件处理，主要需作如下两项工作

a) 各时段基线向量解算：得到 ΔX , ΔY , ΔZ , 或 ΔB , ΔL , ΔH , 同时得到单点定位结果 X , Y , Z , 或 B , L , H 以及相应的精度信息。

b) 通过解码输出Rinex格式的星历和观测数据。

完成定位计算后应进行下列检核：

a) 同步环闭合差检验

b) 基线向量的重复性检核

表 3

精度分析	一	二	三
输入	Rinex格式文件	Rinex格式文件	Rinex格式文件
初始数据	概算坐标	概算坐标	概算坐标
处理模式	长弧轨道改进	短弧轨道改进	网定位
与跟踪网关系	需联网处理	可单独处理	单独处理
坐标系统	WGS-84/SLR	WGS-84	WGS-84
观测值处理方式	双差/非差	双差	双差/三差
待估参数： (对于每个时段)	基线向量，三维坐标，卫星轨道根数，光压参数，整周模糊度及相应的方差协方差。	基线向量，三维坐标解，卫星轨道根数，光压参数，整周模糊度值等，以及相应的方差协方差	基线向量，三维坐标，整周模糊度参数等，以及相应精度信息
数据分析内容	①残差分析 ②定位及轨道解收敛性分析 ③精度分析 ④输出报告 ⑤总体评价	①残差分析 ②定位解收敛性分析 ③精度分析 ④输出报告 ⑤总体评价	①残差分析 ②定位解重复性分析 ③精度分析 ④输出报告 ⑤总体评价

c) 伪距定位重复性检核

d) 环闭合差检核

通过外业检核后的观测资料及成果可进入内业处理。外业检验不合格的成果应及时组织返工。外业检验的各项限差规定仍是一个有待研究的问题,可暂按〔6〕有关规定执行。同时,在实践中不断完善有关技术措施,并发展数据检验方法。

内业处理包括数据编辑,数据预处理、网定位计算及事后数据分析等内容。这是获得最后成果的完整的精加工过程。表3给出了国家各级GPS网内业处理有关技术策略。

国家GPS网的整体平差采用数据处理阶段得出的各测站(各子网)的单点定位结果及方差-协方差阵,以及相对网定位结果及其方差-协方差阵,进行整体处理,获得全网统一基准或框架的定位结果。

设各级GPS网的三维绝对位置参数向量为 X ,内业处理输出的位置向量“观测值”为 L_p ,其方差为 $\sigma^2 P_p^{-1}$,相对位置向量“观测值”为 L_c ,方差协方差阵为 $\sigma^2 P_c^{-1}$ 则整体平差的数学模型为:

$$L_p = A_p X + \Delta P$$

$$L_c = A_c X + \Delta c$$

$$E[\Delta P] = 0, E[\Delta c] = 0$$

$$D(\Delta P) = \sigma^2 P_p^{-1}, D(\Delta c) = \sigma^2 P_c^{-1}$$

A_p, A_c 为相应的设计矩阵。平差按照“加权基准”的“自由网”方式进行。平差后各点间的相对位置可获得一定程度的改善;在各种误差总影响为随机误差的假定下,全网统一后的绝对位置精度可大幅度提高。

5 应用研究的几个方面

国家GPS网涉及到建网研究和应用研究两类研究项目。这里就应用国家GPS网建立我国地心坐标框架,建立统一高程基准和监测地壳运动的GPS测量系统等三个方面,提出一些基本观点和方法。

1、建立和维持我国三维地心坐标框架的研究

现代大地测量和海洋学应用,地球动力学研究,空间科学及现代国防的发展等,都对三维地心坐标的确定,提出越来越高的要求。现行的地心坐标测定方法,主要有以卫星动力测地为代表的直接方法和以测定地心框架与参心框架之间转换关系为目的的间接方法两类^{〔7〕}。目前我国自己确定的地心I号坐标框架,采用了各种可能的技术手段,其精度仍然只有5~7米。其根本原因是:缺乏所需要的广泛分布的高精度观测资料而只能孤立地使用某些区域网或一个个单点位置和重力场信息;缺乏强有力的手段,建立我国局部地心框架与全框架的联系。国家GPS网为解决这些问题提供了可能性:国家各级GPS网具有精度为厘米级的相对位置精度,这些坚强的相对位置联系使我们有可能充分利用各个点绝对位置信息,确定地心基准。同时,通过GPS国际会战,或SLR国际联测,可使上述由国家GPS网维持的我国局部地心框架较方便地纳入全球框架,从而使得我国从根本上解决地心框架的维持、更新和发展问题。

实现上述目标的基本方法是卫星动力测地和各种空间网的整体平差。其理论依据之一是卫星动力测地解的稳定性理论。这个理论描述了地心坐标框架的实现是一个不断趋近过程。主要包括定位和定轨解相对于给定基准的收敛性，而基准解相对于框架的随观测值空间覆盖扩延的收敛性，以及地心偏差解随相对位置精度的提高而改善的基本原理。假定国家GPS网各点单点定位精度为 σ_p ，各基线向量平均相对定位中误差为 σ_c ，网的总点数为 N ，那么在各点定位误差均为偶然误差的假定下，地心偏差解或各点三维位置解的精度为

$$\sigma_c = \pm \sqrt{\sigma_p^2/N + \overline{\sigma_L^2}}$$

例如 $\sigma_p = \pm 10$ 米， $\overline{\sigma_L} = \pm 0.5$ 米（对于500km边长，相当于1ppm）， $N = 50$ ，则地心偏差测定精度约为

$$\sigma_c = \pm 1.9^m$$

上述经验公式是从模拟计算结果中归纳出来的，可见地心偏差解对于定位误差的随机性，点的个数及相对位置精度的依赖性，而前者取决于网的分布范围。这个结果对于地心框架的建立和改进是十分有益的。

2、建立统一垂直基准的研究

垂直基准在理论上定义为一个重力等位面。但在过去的实践中，它总是由相对于局部海平面的验潮站的高程来实现的。由于海面地形随时间和空间的变化，局部海平面严格说来不是一个重力等位面。到目前为止，我们还没有能够建立起一个用于三维大地定位的统一的垂直基准。

国家GPS网的建立为我们提供了这种可能性，它基于地球重力场模型、GPS大地高差，精密水准测量数据和验潮结果的新方法。如已指出，国家GPS网包括成百上千个点，这些点大都与国家一、二等水准点相重合或与之联测，因而有正高高差。正高高差与GPS大地高高差之差即得大地水准面差距之差；国家GPS网经过整体处理获得统一坐标框架后，每个点的绝对位置具有同等精度水平，其相对于给定地心框架的偏差为几个厘米到一分米。而所有点都可利用地球模型计算出大地水准面差距，精度在几米以内。一般而言，地球模型的建立主要取决重力资料和卫星海洋测高资料，与GPS、水准资料具有很好的独立性，因而地球模型得到的大地水准面差距的绝对性较好，我们可以利用所有的差距值和差距之差进行整体处理，确定一个共同的垂直基准值，亦即网中所有点都具有一致的差距偏差。假定差距之差为厘米级精度，那么各点差距值都可以达到几个厘米到1分米的精度水平。这样我们就可得到国家GPS网中各点的大地高与大地水准面，高程之间精确转换。毫无疑问，只要地球模型的导出量和GPS网平差所采用的地心框架相一致，那么所得到的高程基准就是一个统一的基准。这种方法最终有可能导致全球统一垂直基准的建立。

3、监测地壳运动的GPS测量系统的研究

如已指出，由于区域地壳运动和地球动力学研究的监测网是在国家基准网的基础上扩展的。从技术的角度，区域性监测网亦必须与全国网构成整体。地壳运动监测对基线向量提出了优于2cm的精度要求。要达到这一水平是相当困难的，这是因为许多尚未考虑的误差差源都有可能达到这一量级。例如基准误差的影响，仪器常数偏差效应，大气折射的残余影响，统计模型和物理参数的不确定性等。对于这些误差，仅从数据处理的角度来研究解决问题的方法是不够的，必须从系统的或整体的观点来研究问题。这就是所谓监测地壳运动的GPS测

量系统的概念。该系统包括三个主要部分：监测网的设计，优化观测方案及数据处理技术。

监测网的设计主要通过模拟计算来实现。分析各种布网方案使基准的影响降到最小，各种数据弧长的解被用来研究解的稳定性；比较可估子空间上各种可能的剩余参数模型，选择一组最优的参数组合等。

对于观测方案设计而言，这里需要侧重考虑的是那些影响的确存在，但不影响基线向量重复性和内部符合性的误差源。观测方案优化设计的目的在于：消除定位结果中主要系统误差影响，或者使之能从观测值中分离出来。这是一种暴露观测值中潜在系统误差的技术，需要对GPS的误差特性有个透彻的了解。

数据处理方面的主要努力应放在限制大气折光的残余影响和其他离散噪声水平上，从而提高解的重复性。对于垂直分量的分解而言，选用原始相位模糊度参数有助于保持相位观测值的“距离”特性；借助于设计很好的观测方案和有效的统计模型，可使对流层折射的影响降低到最低限度。此外，电离层改正的时间序列分析可望降低电离层影响的噪声水平。

上述三个方面的发展不可偏废。一旦它们作为一个整体被用于区域性监测网，进一步的工作是对该系统做出正确的评价，包括方差—协方差分析，观测方案有效性检验，数据采集的可靠性分析，软件处理系统的稳定性分析，系统总体精度水平等。

6 结论和建议

1、建立我国GPS空间网是我国未来10到20年测绘事业发展的一项重要的基础性工作。从技术的角度看该网布测的主要目的意义在于建立和维持我国的三维地心坐标框架，精化我国大地水准面，加强并检核我国天文大地网，开展地壳运动监测和地球动力学研究等。它的建立还将促进我国测绘科学超前发展和自身的技术改造，以及与其他行业的横向渗透，并加强测绘在国民经济建设中的先导地位。

2、国家GPS网分三级布测对于保证全网的强度和质最，满足各层次需要，合理地调配人力和财力，是必要的，也是符合我国国情的可行方案。

3、观测与数据处理技术对国家GPS网的建立是十分关键的。观测技术要根据精度要求精心设计。数据处理的核心是软件开发。这两项工作必须尽快完成。

4、国家GPS网的建立既是一项国家工程，又是一项综合性测绘科技研究项目，在工程开展的同时，进行建网的方法理论研究和应用项目的研究是十分必要的。本文提出的三项基础性研究应予以优先考虑。

参 考 文 献

- [1] 武汉测绘科技大学.《国家高精度GPS空间定位网布测项目设计书》，1990，10
- [2] 武汉测绘科技大学.《国家高精度GPS空间定位网布测项目设计书补充报告》，1991，3
- [3] 陕西省测绘局.《国家高精度GPS空间定位网布测项目设计书》，1991，5
- [4] Mueller I I. Reference Coordinate Systems: An Update, Iectuer 25, The Earth

sciences, 1989.

- [5] Malla R P, Wu. S C. GPS Inferred Geocentric Reference Frame For Satellite Positioning and Navigation. Bull. G' eod. 1989(63): 263~279
- [6] 武汉测绘科技大学. 《国家高精度GPS空间定位网作业细则(草案)》, 1990. 10
- [7] 朱华统. 常用大地坐标系及其变换, 北京: 解放军出版社, 1990.

Some Theroretical Aspects for The National Primary GPS Network of China

Shi Pinghao Feng Yanming Li Zhenghang

【Abstract】 The national primary GPS network (NAGNET), covered the whole contint and prinicipal islands of China, has been desiged and the observation campai- gns have being carried out, conducted by the National Beauru of Surveying and Mapp- ing. This paper discusses several technical problems for the establishment of the NAG- NET, including the gaols and significance, accuracy standards and techinal schem of the network, the technical elements of both obsevation and data processing, and some aspects for application research and development. Finally, several recommendations are given for the project.

【Key words】 GPS positioning, the methods and specifications of observation , data processing, accuracy standart