高等级 GPS 网数据处理模型与方法分析

林　铁[1]，刘友文[2]
（1. 广东省国土资源厅测绘院，广州　510500；2. 武汉大学卫星导航研究中心，武汉　430079）

摘要：目前，高等级测量控制网都是采用 GPS 静态测量技术，控制网要求严格设计与布设，严格按照规范进行观测。显然，观测耗时长、工作量极大，为如实的反映观测质量的优劣，减少补测返测，后期的数据处理显得尤为重要。如何研究和掌握一套高等级高精度 GPS 数据处理模型和方法，是测绘部门共同面临的重要课题，具有实用价值。本文主要阐述了高等级高精度 GPS 网数据处理模型和方法，并结合实例进行了数据处理和结果分析，得到了满意结果。

关键词：GPS；数据处理；模型
中图分类号：P228.4　　**文献标识码**：B

Abstract: To build a high-grade GPS network needs many works, including design, observation, data processing and analysis. Study of model and method for that is full of significance in practical application. This paper mainly deals with the model and method of data processing for high-grade GPS network. Combining with the general GPS network, the authors of this paper process the GPS data using GAMIT software. And satisfied results have been achieved.

Key words: GPS; data processing; model

0　引言

高等级、高精度 GPS 控制网一般指范围较大、精度较高的一类控制网，它可以是局部网、国家基础网、地震监测网、甚至全球网。这类网一般点数较多、点间距较长(几十、几百公里或上千公里)，例如总参测绘局布设的 GPS 一、二级网，国家测绘局布设的 A、B 级网，用于地震预报的地震监测网，各省市的 A、B 级网，连续运行参考站系统的基准站网等。

目前，高等级测量控制网都是采用 GPS 静态测量技术，控制网要求严格设计与布设，严格按照规范进行观测。显然，观测耗时长、工作量极大，为如实的反映观测质量的优劣，减少补测返测，后期的数据处理显得尤为重要。如何研究和掌握一套高等级高精度 GPS 数据处理模型和方法，是测绘部门共同面临的重要课题，具有实用价值。

1　静态相对定位的观测方程

GPS 定位模式有很多种，按不同的分类法有动态定位，静态定位之分；有单点定位，相对定位之分；有伪距模式和载波模式之分。而高等级 GPS 控制网都是采取静态相对定位的模式，采用载波相位观测量。

载波相位观测方程为：

$$\Phi = \rho + d\rho + c(dt - dT) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_{\Phi} \quad (1)$$

其中，Φ 为以米为单位的测量完整的载波相位观测值；λ 为以米为单位的波长；N 为整周模糊度，ε_{Φ} 为接收机载波相位观测的噪声和多路径效应(ε_{mul})的影响。

为了降低使用上面观测方程进行定位的误差，可以构造差分观测模型，来消除或降低各种误差的影响。随着距离的增加，差分误差的残差也将增加。这种方法一般被称为差分GPS，广泛用于一台接收机和另一台接收机之间的相对定位。在两个不同接收机上观测相同的卫星，对观测方程进行求差，可以完全消除卫星钟差 dt，并削弱了电离层和轨道误差的影响。接收机间求差的载波相位观测方程，即单差观测方程为：

$$\Delta\Phi = \Delta\rho + \Delta d\rho + \Delta cdT + \lambda\Delta N - \Delta d_{ion} + \Delta d_{trop} + \Delta\varepsilon_{\Phi} \quad (2)$$

进一步在不同卫星间求差，接收机钟差可以消除，可以得到双差观测方程：

收稿日期：2007-10-16

作者简介：林铁(1977－)，男(汉族)，广东廉江人，大学本科，工程师.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\Delta\nabla\Phi = \Delta\nabla\rho + \Delta\nabla d\rho + \lambda\Delta\nabla N - \Delta\nabla d_{ion} + \Delta\nabla d_{trop} + \Delta\nabla\varepsilon_{\Phi} \quad (3)$$

构造差分观测方程的主要目的是利用观测值之间的相关性，可消除或减弱一些具有系统性误差的影响，如卫星轨道误差、卫星钟差和大气折射误差等。同时，可减少平差计算中未知数的数量，以简化观测模型。另外，电离层折射影响可以根据它与频率的相关性，用两个频率观测值的线性组合消除[1，2]。

高精度 GPS 网数据处理软件大多采用双差模型，如美国的 GAMIT 软件，瑞士的 BERNESE 软件等。

2 高等级 GPS 网数据处理几个关键问题

GPS 数据处理中经常会遇到因所用的参数、模型、方法而造成结果的差异和精度的不同。对于高等级 GPS 控制网，要想获得满意的结果，基线处理是关键。影响 GPS 定位及基线处理精度的因素有很多，如卫星星历、对流层折射、电离层折射、多路径效应、基准站坐标、基线解时采用的软件、解算数学模型等。如不能正确处理这些因素，都将造成基线解算结果的差异[3]。

在高等级 GPS 网基线处理时，要考虑的问题很多，其中几个关键问题是参考框架确定与星历的选择、基准站起算坐标与约束条件、模型与参数选择等，以下对上述这些问题做详细叙述。

2.1 参考框架确定与星历选择

在 GPS 精密相对定位数据处理中，定位的基准是由卫星星历和基准站坐标共同给出的。基线解算时要求地面基准站坐标的框架及历元与卫星星历的框架及历元保持一致性。本文采用 ITRF2000 框架，历元为瞬时历元。

星历卫星轨道的精度是影响 GPS 基线解算精度的重要因素之一，因此提高卫星轨道的精度是保证定位精度的关键之一。高等级 GPS 网的数据处理，须采用 IGS(International GPS Service for Geodynamics)精密星历，其轨道精度达到 0.05m。假设控制网中的边长为 100km，星历对基线在最不利的情况下影响不超过 0.2mm。在本文数据处理过程中，采用 IGS 综合精密星历。

2.2 基准站选择与约束条件

对于高等级高精度 GPS 网应采用高精度基准站并强约束其坐标和松驰轨道的方案。其约束量应根据先验精度来确定，既不应太紧，也不应太松。高等级 GPS 网通常是要与 IGS 跟踪站联测，即引入高精度的 IGS 站当作基准站，对这些 IGS 站，采用其在 ITRF 框架下某个历元的测站坐标作为初始值，并给予适度的坐标强约束，比如三个方向的约束量可取 0.01m，0.01m，0.02m。

2.3 起算坐标

基线解算中，起算点(基准站)坐标的精度将影响基线的精度。起算点对基线解算的最大影响可以用(4)式表示：

$$\delta s = 0.60\times10^{-4}\times D\times\delta X_1 \quad (4)$$

式中δs为对基线的影响，D为基线的长度，δX_1为起算坐标的误差。假设起算坐标的误差为 20cm，基线的长度为 100km，则起算坐标对其影响为 1.2mm。由此可见，很有必要引进高精度的 GPS 基准点，如前面提到的 IGS 站。

2.4 模型与参数选择

本文采用的基线处理软件是高精度的 GAMIT 软件。GAMIT 软件采用双差观测值多测站模式求解基线。对整个 GPS 网，每天求一个解，称为单天解。选择的模型与参数主要包括：

(1)卫星钟差：用广播星历中的钟差参数进行改正。

(2)接收机钟差：利用由伪距观测值计算出的钟差进行改正。

(3)电离层折射：用两个频率上的观测值消除。

(4)对流层折射：根据标准大气模型用 Saastamoinen 模型改正，并对每个测站每隔一定时间加天顶方向上的折射量偏差参数。

(5)卫星和接收机天线相位中心改正：利用 NGS 提供的改正值进行偏心改正。

(6)测站位置的潮汐改正：通过潮汐模型进行改正。

(7)截止高度角：大于10°，多路径严重的测站可选用大于20°。

(8)历元间隔：30s 的采样间隔。

3 实例计算与分析

本文处理的 GPS 数据是我国南部某省的 A 级网数据。该控制网覆盖范围大，面积接近 18 万平方公里。全省共布设 12 个 A 级点，点间平均距离为 273.2km。整个网共观测 5 个时段，每个时段 13h。作者用 GAMIT 软件处理了 A 级网数据。基线处理时需与 IGS 全球站联算，引进的 IGS 全球跟踪站包括：WUHN(武汉)、SHAO(上海)、BJFS(北京)、

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

LHAS(拉萨)、URUM(乌鲁木齐)、KUNM(昆明)等共 9 个站，并以这些站作为 A 级网的基准站。

由于GAMIT软件采用的是网解(即全组合解)，其同步环闭合差在基线解算时已经进行了分配。对于 GAMIT 软件基线解的同步环检核，可以把解的 nrms 值(标准均方根误差)作为同步环质量好坏的一个指标，一般要求 nrms 值小于 0.6，不能大于 1.0。A 级网共计算 5 个同步环，其 nrms 值均小于 0.5，这说明基线解的精度较好。

各时段解向量的重复性反映了基线解的内部精度，是衡量基线解质量的一个重要指标。其定义为：

$$R=\left[\frac{\frac{n}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left(c_i-\bar{c}\right)^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sigma_i^2}}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

式中：C_i—各时段解基线的各分量，σ_i^2—相应分量的协方差，$\bar{c}$—相应基线分量的加权平均值，R—相应的重复性。

整网的重复精度可用固定误差和比例误差两部分表示，即：

$$\sigma=a+bl \tag{6}$$

式中：σ—分量的重复性精度指标，a—分量的固定误差，b—相对误差，l—分量的长度，由分量的重复性进行固定误差与比例误差的直线拟合得到。

A 级网有 210 条重复基线(包括全球站)。A 级网的基线向量重复性如表 1 所示。从表 1 中可以看出，该控制网基线分量重复性在水平方向上优于 $3.1mm+0.14\times10^{-8}$，垂直方向优于 $20.4mm+0.1\times10^{-8}$，基线长度方向为 $5.1mm+0.07\times10^{-8}$。可见基线处理的精度很高。

基线向量重复性统计表　　表 1

	南北方向 mm + 10^{-8}		东西方向 mm + 10^{-8}		垂直方向 mm + 10^{-8}		基线长度 mm + 10^{-8}	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
A 级	3.1	0.14	6.4	0.01	20.4	0.10	5.1	0.07

在获取高精度的基线后，笔者利用平差软件 PowerAdj 对该网进行了平差。在 ITRF 坐标框架下三维平差的基准站为 3 个国家 A 级 GPS 网点：WUHN(武汉)、SHAO(上海)、BJFS(北京)，坐标为国家 96A 级 GPS 网的坐标，其坐标框架为 ITRF93，历元为 1996.365。通过平差，该控制网与国家 A 级网实现了坐标框架与基准的统一。平差得到满意的结果，A 级点的坐标分量在水平方向上的平均精度为 0.0024m，大地高方向为 0.0092m。

4　结论

综上所述，高等级的GPS网数据处理的关键是要确定合适的数据处理模型和方法。利用本文提出的数据处理模型与方法，采用GAMIT软件进行了实例基线处理，并进行了平差，得到了高精度的结果，从而验证了本文论述的数据处理模型严密，方法合理。

参 考 文 献

[1] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理和方法[M]. 北京：科学出版社，2003.

[2] 周忠谟，易杰军，周琪. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京：测绘出版社，1997.

[3] 姜卫平，刘经南，叶世榕. GPS 形变监测网基线处理中系统误差的分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2001，26(3)：196~199.

[4] 施闯. 大规模、高精度 GPS 网平差处理与分析理论及其应用[M]. 北京：测绘出版社，2002.

[5] 隋立芬. 高精度 GPS 网的统一与数据处理若干问题研究[D]. 郑州：解放军信息工程大学，2001.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net