

文章编号: 1009-3850(2002)03-0100-07

GPS 测量误差分析

张清志, 陈智梁, 刘宇平

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: GPS 测量以其显著的定位特点, 得到了空前的应用和发展。它取代了常规的大地测量和工程控制测量, 现在已渗入到工程测量、地籍测量、交通管理、导航、地理信息系统、海洋、石油、气象和地球科学等许多研究领域。同时 GPS 还涉及数学、天文学、数字通讯、计算机科学、测绘学等多学科领域。GPS 测量应用的广泛开展, 使观测精度的影响因素和解决方法成为科学研究工作中的重点。由于 GPS 测量涉及多学科、多应用领域, 给研究的方向、方法提出了更高的要求。本文介绍了影响 GPS 测量精度的因素和常用的解决方法。

关键词: GPS 测量; 精度分析;

中图分类号: V474.2

文献标识码: A

1 概述

空间定位技术(VLBI, SLR 和 GPS)的发展使大地测量技术发生了根本性的改变, 均可用于对全球或局部地区实现高精度的动态和静态监测。但 VLBI(甚长基线测量, Very Long Baseline Interferometry)和 SLR(卫星激光测距, Satellite Laser Ranging)存在设备庞大、耗资巨大、不适合流动作业等缺点。而 GPS(全球定位系统, Global Positioning System)具有高精度、多功能、多用户、高效率、四维空间数据、测速快、设备轻便、自动化程度高和全天候作业等特点, 而得到广泛的应用^[1]。

GPS 是由美国国防部组织海、陆、空三军开发研制的, 目的是服务于美国的国防军事。在设计计划中, 准备提供两种服务: 一种为标准定位服务(SPS), 提供给民用, 利用粗码(C/A 码)定位时的设计精度约为 100m; 另一种为精密定位服务(Precise Positioning Service, 简称 PPS), 提供给军事和特许用户, 利用精码(P 码)定位, 设计精度为 10m。但经过多次 GPS 实验应用表明, 实际的定位精度远高于

此: C/A 码定位精度可达 14m; P 码定位精度可达 3m。由于实际精度与设计精度的矛盾, 美国从自身利益和安全出发, 采取措施限制非特许用户利用其高精度的实时定位功能。他们不仅在系统设计方面采取了许多保密措施, 还在系统运行中限制用户获取观测量的精度, 降低非特许用户的定位精度, 使之与设计精度相当。SA(选择可用性, Selective Availability)政策便是其一。

随着 GPS 技术应用的普及, 广大的 GPS 用户都希望能清楚到底有哪些因素在制约着 GPS 测量的精度和推广应用, 而 GPS 的应用及其精度也是当今全世界都非常关注的问题。如何找到误差源? 如何才能改进其精度? 如何才能使其精度达到更好? 如何才能摆脱美国的种种限制? 这些都是急需解决的问题! 为了提高定位的精度, 满足用户对精度的要求, 研究这些误差来源并确定它们的影响规律和改正方法, 具有重要意义。

2 误差因素分析

正如其他测量一样, GPS 测量也同样不可避免

地受到测量误差的影响。GPS 是一个庞大的系统(由 GPS 卫星、用户和地面的监控站三部分组成),误差的组成也很复杂。根据不同的研究方向和研究重点,误差的分类各有不同。通常是按误差的性质将其分为系统误差和偶然误差两类^[2];而从误差的来源又可以将其分为与 GPS 卫星有关的误差、与 GPS 卫星信号传播有关的误差和与 GPS 信号接收机有关的误差^[2~4]。这里我们按误差对测量结果的影响程度把误差分为噪声误差、偏差和偶然误差 3 类。偶然误差是随机误差,其对测量结果的影响时大时小,但一般来说只要出现偶然误差,其对测量结果的影响往往都比较大,因此在测量过程中应尽量避免出现此类误差。

从图 1 中我们能清楚的看到上述 3 类误差对 GPS 测量观测精度的影响程度。我们在不断降低偏差影响的同时,应尽量避免偶然误差的出现或将其尽可能的降到最低,从而有效的提高观测精度。

1. 噪声误差

噪声误差是由 PRN(伪随机噪声码, Pseudo Random Noise)的噪声误差和接收机噪声误差构成。接收机噪声主要由天线噪声、传输线噪声、接收机内部噪声三部分组成。

GPS 测量的主要观测量是卫星信号从卫星到接收机的时间延迟,为了测量时间延迟,要在接收机内复制测距码信号,并通过接收机的时间延迟器进行

相移,使复制的码信号与接收到的相应码信号达到最大相关,其必须的相移量,便是卫星发射的码信号到达接收机天线的传播时间。卫星发射码与接收机内复制的相应测距码之间的相位差,通常其大小约为码元宽度的 1%。根据相位差与码元宽度的这种关系,我们可初步估计各种波长的信号的观测精度。对 C/A 码而言,码元宽度为 293m,所以其观测精度约为 2.9m; P 码的码元宽度为 29.3m,其观测精度约为 0.29m。由于载波的波长远小于码的波长,因此在分辨率相同的情况下,载波相位的观测精度比码相位的观测精度要高得多。对 L₁ 载波(波长为 19.03cm)而言观测,误差约为 2.0mm; L₂ 载波(波长为 24.42cm)的观测误差约为 2.5mm。因此 P 码和载波相位的观测精度比 C/A 码要高得多,双频接收机的观测精度要高于单频接收机的观测精度。同时,由于不同的接收设备,其接收机噪声误差也不尽相同,主要是由于它们的天线噪声、传输线噪声、接收机内部噪声各不相同。因此接收设备的性能也是影响观测精度的一个方面。

2. 偏差

偏差包含 SA(已于 2000 年 5 月 1 日关闭)政策和其他因素引起的偏差。

SA 是由美国国防部对非美国军事和政府特许用户的 SPS(标准定位服务, Standard Positioning Service)的定位精度的限制,所采取的人为干扰。对

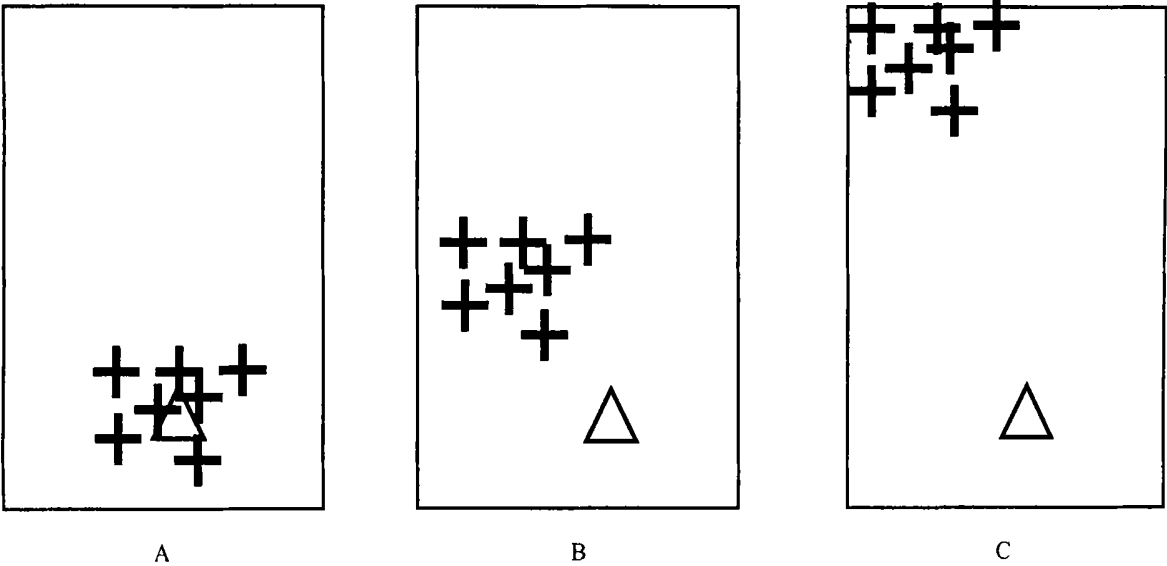


图 1 噪声误差、偏差和偶然误差对测量结果的影响

A. 噪声误差; B. 噪声误差和偏差; C. 噪声误差、偏差和偶然误差。△实际位置; + 估计位置

Fig. 1 The effects of noise errors, deviations and accidental errors on the GPS measurements

noise errors; B= noise errors and deviations; C= noise errors, deviations and accidental errors. △Actual location; + Estimated location

C/A码而言,其精度由 30m 增大到 100m 土。由于 SA 对每个卫星附加的偏差不同,而且同一卫星的不同时段偏差的值也不同,因此 SA 偏差对测量结果的影响很大。但从 2000 年 5 月 1 日起美国取消了该项限制措施。

3. 其它偏差

其它偏差主要包括:卫星钟差、卫星轨道偏差、对流层延迟误差、电离层误差、多路径效应误差、天线相位中心位置偏差、相对论效应等等。

(1) 卫星钟差:GPS 测量的原理是信号由卫星传播到接收机的传播时间乘以卫星信号的传播速度。如果卫星信号中有 6~8μs 的误差,则其影响可达 180~240cm。可见 GPS 的测量精度与时钟(卫星和接收机的时钟)误差密切相关。虽然 GPS 卫星都采用高精度的原子钟(铷钟和铯钟),但由于主控站(及监控站)的控制和调整,仍不能完全改正的卫星钟的钟面时与 GPS 时之间的同步误差及卫星钟与卫星钟之间的同步误差,通过卫星的导航电文提供给用户。同时接收机钟与卫星钟之间的同步误差,这样就存在两种时间误差,由时间误差而引起等效的距离误差。在相对定位中,卫星钟差或经主控站(及监控站)改正后的残差可通过观测量求差(或差分)得以消除,而接收机钟与卫星钟之间的同步误差(即接收机钟差)也可通过观测值求差得以有效的减弱。因此卫星钟差通过模型和数据处理方法得到了一定程度的修正。

(2) 卫星轨道偏差:该偏差指卫星星历给出的卫星空间位置与卫星实际位置间的偏差。由于卫星星历是 GPS 定位的主要数据依据,卫星在运行中要受到多种摄动力的影响,而地面监测站及主控站又难以精确测定其对每一个卫星的作用力,因此主控站(和监控站)不能精确测定并给出每一个卫星的瞬时

轨道信息,由此形成卫星轨道偏差。目前有效的方法是采用由美国国家大地测量局(NGS)提供的精密星历,同时采用不断改进的定轨技术及摄动力模型和同步观测值求差来降低或消除这一误差。

(3) 对流层延迟误差:电磁波在对流层中的传播速度与大气折射和传播方向有关(图 2)。对流层的组成成分(云、雾、雨、雪、气体元素、水、冰晶、尘埃等等)很复杂。对流层延迟误差分为干分量和湿分量两部分。干分量占对流层延迟误差的 90%,干分量主要与大气层的温度和压力有关;湿分量主要与传播路径上的大气湿度和高度有关。对流层延迟误差伴随卫星高度角的减小而增加,并且对流层延迟误差的改变值近似与卫星高度角的余割值的改变与这时的天顶延迟(卫星高度角为 90°时的对流层延迟)的乘积(表 1,表 2)。但通过模型改正及双频技术和差分技术或大气的测量(水汽辐射计)得以很大的改进。

(4) 电离层误差:GPS 信号和其它电磁波信号一样,会受到电离层这一介质弥散特性的影响,使信号的传播路径发生变化。由于电磁波在电离层中产生的各种延迟都与电磁波传播路径上的电子总量有关,而电离层中的电子密度是变化的,它与太阳黑子活动状况、地球上地理位置、季节变化和时间有关。同时电磁波传播延迟还与电磁波传到 GPS 接收天线的方位有关,天顶方向时传播路径上的电子总量最少,所受电离层延迟的影响也最小。国内外利用 GPS,针对电离层的周日、季节、年变化形态特点,各种异常电离层现象如行扰、耀斑、日食,以及电离层不均匀结构引起的信号闪烁及电离层电子总量等方面进行广泛研究,现在 GPS 在电离层的研究方面已取得了有效的成绩。利用掩星方法来分析电离层电子密度随高度的分布,为电离层误差的改正提供了

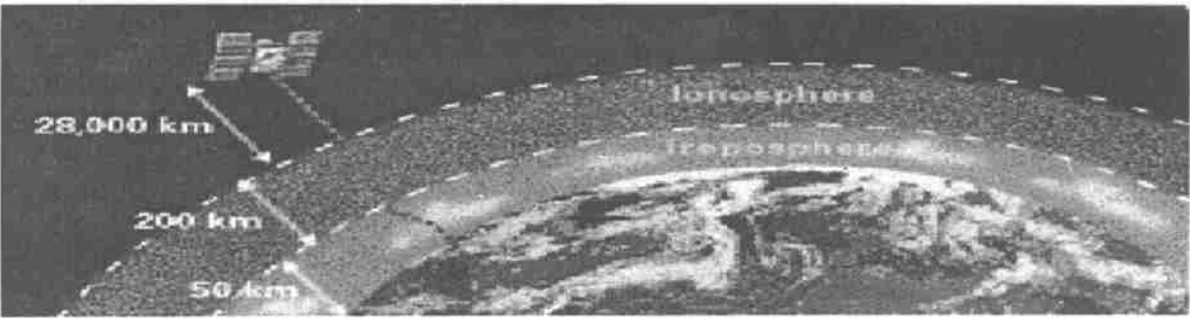


图 2 大气层分类及对卫星信号的影响

Fig. 2 Classification of the atmospheric layers and their effects on satellite signals

表 1 高度角对对流层延迟的影响^[2]

Table 1 The effects of the elevation angles of a satellite on the atmospheric propagation delay

高 度 角	90°	20°	15°	10°	5°
干分量/m	2. 31	6. 71	8. 81	12. 90	23. 61
湿分量/m	0. 20	0. 58	0. 77	1. 14	2. 21
对流层延迟/m	2. 51	7. 29	9. 58	14. 04	25. 82

表 2 由余割值计算的各项对流层延迟(对流层延迟与高度角的关系)^[4]

Table 2 The adjustments for the atmospheric propagation delay calculated from the cosecant of elevation

高 度 角	90°	20°	15°	10°	5°
余 割 值	1	2.92	3. 86	5. 75	11. 47
干分量/m	2. 31	6. 752	8. 9166	13. 2825	26. 495
湿分量/m	0. 20	0. 584	0. 772	1. 15	2. 294
对流层延迟/m	2. 51	7. 3292	9. 6886	14. 4325	28. 7897

可靠的数学依据。利用双频观测和电离层模型改正及同步观测值求差, 已可基本消除电离层误差对观测值的影响。

(5) 多路径效应误差: 多路径效应是由于接收机天线不只是接收到卫星直接发射的信号, 还接收到经接收机天线周围物体一次或多次反射的卫星信号, 把这两种叠加的信号作为观测量来解算(由于经接收机天线周围物体一次或多次反射的卫星信号的时间延迟要比直接到达接收机天线的卫星信号的时间延迟要长), 定位结果中就含有这种多路径信号影响的误差。因此多路径效应误差与点位位置的选取有密切关系。在选取 GPS 观测点位时(安置接收机天线) 应避开具有强反射性能的环境(如水面、平坦光滑的地面、平整的建筑物等), 同时采用具有良好屏蔽的天线(如扼流圈天线) 和适当延长观测时间。

(6) 天线相位中心位置偏差: GPS 定位是以天线相位中心位置为准的, 而天线对中是以天线的几何中心为准的。理论上天线相位中心与天线的几何中心应一致, 但实际上接收机天线相位中心随着信号输入的强度与方位不同而有变化, 往往偏离天线的几何中心。为了尽量减少天线相位中心位置偏差对观测的影响, 这要求我们安置天线时要以天线附有的方位标进行定向; 同时使用性能好的天线(如扼流圈天线), 以求尽可能的减小由天线相位中心位置偏移带来的误差。

GPS 测量除受到以上几个方面的误差影响外, 还受到相对论效应、地球自转、地球潮汐、卫星钟和接收机钟振荡器的随机误差、各种改正模型的误差及信号传播的相对论效应等的影响。

第三类误差大多与人为因素有关, 由于它对观测结果的影响很大, 所以我们应时刻注意避免此类误差出现。

用户的人为误差, 包括大地基准点的选取及对仪器的操作规程的掌握程度(仪器安置误差, 对中、整平、天线方位的定向等), 量测天线高度的误差等。

接收机软件和硬件引起的误差, 要求出测前要检校仪器。

主控站和监控站由于人为的或计算机错误引起的误差, 由这类误差(或者称为错误) 引起的误差可以由 1m 到几百公里, 其严重后果可想而知。

美国随时可能启用的 AS (反电子欺骗, Anti Spoofing) 技术。AS 技术是 P 码经过译密技术处理变为 Y 码, 由 P 码与高度机密的 W 码模 2 和形成 Y 码。AS 和 SA 是两个独立的干扰 GPS 测量精度的技术。

其它电磁波的影响包括接收机天线附近地区的电磁波的干扰(高压电线, 发射台等等)。

除此而外, 卫星的空间位置和能见度也是影响观测精度的一个重要方面。

卫星的空间位置, 我们用 PDOP(空间位置精度因子, Position Dilution of Precision) 来表示, 但通常都用几何精度因子 GDOP(Geometric Dilution of Precision) 来描述空间位置精度因子 PDOP 和时间误差 TDOP(接收机钟差精度因子, Time Dilution of Precision) 的综合影响的精度因子。计算方法是(见附录):

$$GDOP=[(PDOP)^2+(TDOP)^2]^{1/2}$$

GPS 绝对定位的误差与精度因子(DOP) 的大小成正比。既然精度因子的数值与所测卫星的几何分布图形有关, 那么何种分布的图形比较适宜, 就成了人们研究的中心问题。经分析研究表明: 当观测站与 4 颗观测卫星所构成的六面体体积越大时, 所测卫星在空间的分布范围也越大, 而这时的 GDOP 值越小, 观测的精度也越好; 但是为了降低大气折射对观测精度的影响, 通常都要先限制观测卫星的高度角(上述大气折射对观测精度的影响)。当所测卫星在空间的

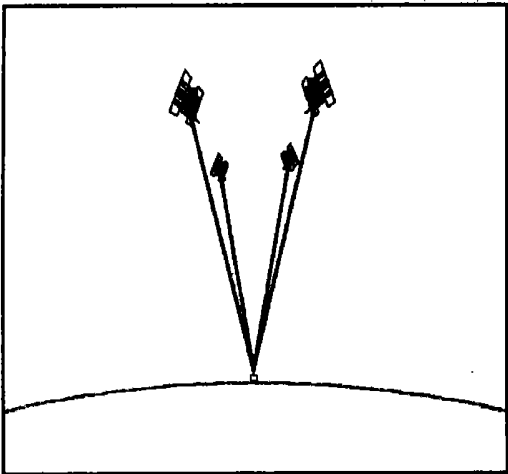
分布范围越大, GDOP 值越小; 当所测卫星在空间的分布范围越小, 则 GDOP 值越大。当 GDOP 值越小, 则观测效果就越显著(图 3)。因此可参照 GDOP 值的大小, 决定观测效果的好坏, 同时决定是否采用此点位或此观测值。

但是光有好的 GDOP(GDOP 值较小) 而没有好的能见度, 也是没有用的(图 4)。因此观测站周围屏障

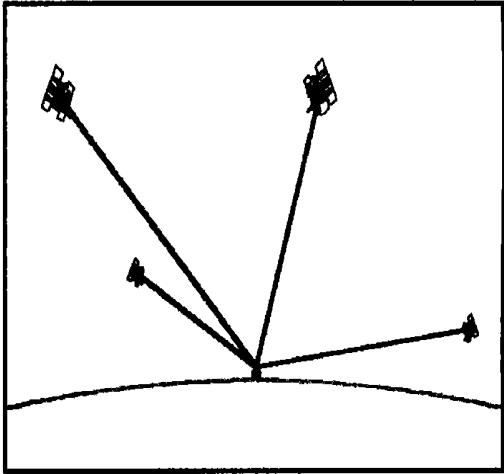
物的高度角应小于 15° 。

3 如何提高 GPS 的观测精度

鉴于美国对 GPS 用户所采取的种种限制措施, 及人们对误差来源认识的进一步加深, 广大用户和科研人员开展的许多意义重大的研究、开发、实验, 并且取得了有效的成果。



GDOP较大



GDOP较小

图 3 卫星的几何分布与 GDOP 值的关系
A. GDOP 较大 B. GDOP 较小

Fig. 3 The relationship between the geometric distribution of a satellite and GDOP values
A. larger GDOP values B. smaller GDOP values

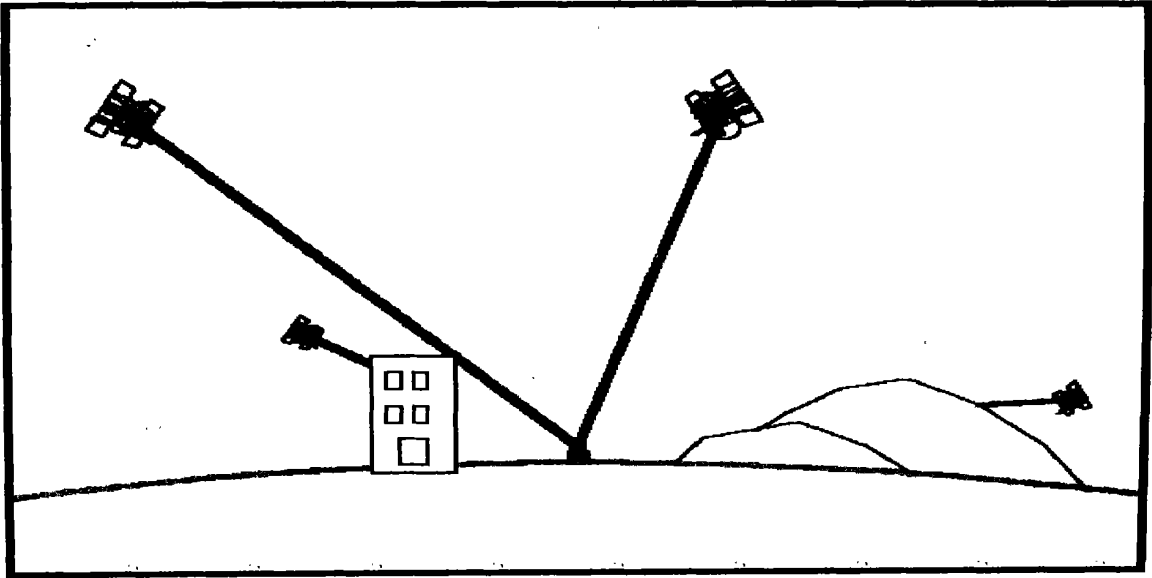


图 4 GDOP 较小, 卫星能见度差

Fig. 4 The positive correlation of a satellite's visibility with GDOP values

1. 主要措施

(1) 建立独立的 GPS 卫星测轨网, 精确测定 GPS 卫星的星历, 供非特许用户使用。

(2) 载波相位测量相对定位技术, 即采用直接测量载波相位, 其相对定位精度可达 10^{-7} 。

(3) 差分定位技术(Differential GPS——DGPS)。差分定位是在一个已知点上设立基准站, 跟踪观测 GPS 卫星, 测定各卫星伪距观测值的改正值; 通过差分数据传输系统, 实时发送给流动站; 流动站观测 GPS 卫星伪距, 以差分修正后进行定位解算。DGPS 可以消除或减弱 SA 的影响, 还可以明显地减弱电离层和对流层延迟误差对观测结果的影响。

(4) 建立独立的卫星定位系统。建立独立的卫星定位系统虽然可以完全摆脱对美国 GPS 的依赖, 但技术复杂, 耗资巨大, 对发展中国家尚是困难。

2. 选点原则

GPS 点点位的选取对 GPS 观测的顺利进行和获得理想的精度也具有非常重要的意义。首先应根据测量任务的目的和测区范围, 精度和密度的要求, 充分收集和了解测区的地理情况, 及原有的控制点的分布和保存情况。并按照选取 GPS 点的点位原则进行选点、定点、观测。

(1) 观测站应选在易于仪器的安置的地方, 并且视野开阔, 视场内的障碍物的高度角应低于 $10^\circ \sim$

15° 。

(2) 天线安置点应远离大功率的无线电发生器和高压输电线, 以避免周围磁场对信号的干涉。

(3) 观测站附近地区不应有大的水域, 或对电磁波反射强烈的物体。

(4) 点位应选在地面基础坚固, 易于点位的保存地方, 比如基岩上, 但尤其要注意不能选在滚石上和可能开采的基岩上。

(5) 网行应利于同步观测边、点的联结。

(6) 如要和水准联测, 则选点人员应实地踏勘水准路线, 提出有关的建议。

其它的注意事项: 仪器设备的精度; 观测的时间不宜太短; 采样间隔的选取; 计算方法和计算软件的选取; 大地基准点的选取。

参考文献:

- [1] 周忠谟, 等. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1997.
- [2] 高成发. GPS 测量[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [3] 张清志. 大气传播延迟改正正在 GAMIT 软件中的应用[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(2): 23—30.
- [4] 徐绍铨, 等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998.
- [5] 王广运, 等. GPS 精密测地系统原理[M]. 测绘出版社, 1988.

附录:

GDOP 的计算方法举例(据 Peter H Dana. 1998/4/24):

GPSGDOP Example °peter H. Dana °4/23/96

Satellite (SV) coordinates in ECEF XYZ from Ephemeris Parameters and SV Time

$SV_{x0} := 15524471.175$ $SV_{y0} := -16649826.222$ $SV_{z0} := 13512272.387$ SV15

$SV_{x1} := -2304058.534$ $SV_{y1} := -23287906.465$ $SV_{z1} := 11917038.105$ SV27

$SV_{x2} := 16680243.357$ $SV_{y2} := -3069625.561$ $SV_{z2} := 20378551.047$ SV31

$SV_{x3} := -14799931.395$ $SV_{y3} := -21425358.24$ $SV_{z3} := 6069947.224$ SV7

Receiver Position Estimate in ECEF XYZ

$R_x := -730000$ $R_y := -5440000$ $R_z := 3230000$

For Each of 4 SVs $i := 0.3$

Ranges from Receiver Position Estimate to SVs (R) and Array of observed °Predicted Ranges

$$R_i = \sqrt{(SV_{xi} - R_x)^2 + (SV_{yi} - R_y)^2 + (SV_{zi} - R_z)^2}$$

Compute Directional Derivatives for XTZ and Time

$$D_{xi} := \frac{SV_{xi} - R_x}{R_i} \quad D_{yi} := \frac{SV_{yi} - R_y}{R_i} \quad D_{zi} := \frac{SV_{zi} - R_z}{R_i} \quad D_{ti} := -1$$

Solve for Correotion to Receiver Position Estimate

$$A := \begin{bmatrix} D_{x_0} & D_{y_0} & D_{z_0} & D_{t_0} \\ D_{x_1} & D_{y_1} & D_{z_1} & D_{t_1} \\ D_{x_2} & D_{y_2} & D_{z_2} & D_{t_2} \\ D_{x_3} & D_{y_3} & D_{z_3} & D_{t_3} \end{bmatrix}$$

$$P := (A^T \circ A)^{-1}$$

Compute Geometric Dilution of Precision (GDOP) tem:

$$GDOP := \sqrt{P_{0.0} + P_{1.1} + P_{2.2} + P_{3.3}} \quad GDOP = 6.806$$

$$PDOP := \sqrt{P_{0.0} + P_{1.1} + P_{2.2}} \quad PDOP = 6.171$$

$$TDOP := \sqrt{P_{3.3}} \quad PDOP = 2.871$$

The error analysis in GPS measurements

ZHANG Qing-zhi, CHEN Zhi-liang, LIU Yu-ping
(*Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China*)

Abstract: The GPS measurements now have been widely applied to various fields including engineering measurements, traffic management, navigation, GIS, oceanology, petroleum industry, meteorology and earth sciences. The authors contend in the present paper that in order to improve the precision of positioning and satisfy the needs of users, it is important to explore the origins and controls of the errors, and conventional resolutions and techniques in GPS measurements.

Key words: GPS measurement; precision analysis