

文章编号: 1000-7598 (2009) 05-1532-05

GPS 一机多天线公路高边坡实时监测系统研究

王劲松^{1,2}, 陈正阳¹, 梁光华²

(1.中南大学 信息物理工程学院, 长沙 410083; 2.广东交通职业技术学院 公路学院, 广州 510650)

摘 要: 根据一机多天线思想, 建立了 GPS 一机多天线公路高边坡监测系统, 降低了系统成本。其由野外采集子系统和室内控制子系统组成。前者将天线阵列采集的 GPS 信号, 经分时器、信号放大器、无线路由器、WLAN 天线传输至后者, 经数据处理得各监测点的坐标数据。在单历元数据处理中, 利用 GPS 采样密度高、监测点前后 2 次变形量较小的特点, 由卫星地距双差值 $\nabla\Delta\rho_{BM}^{ij}$ 、载波相位双差值 $\nabla\Delta\phi_{BM}^{ij}$ 、波长 λ , 计算出整周模糊度 $\nabla\Delta N_{BM}^{ij}$ 的非整数解, 再采用 ROUND 函数使其变为整数, 得到整周模糊度。有了整周模糊度, 双频 GPS 接收机的载波相位定位精度一般可达 ± 5 mm, 既能满足公路高边坡实时监测的精度, 又解决了卫星信号在不同天线通道间切换产生的周跳问题, 使数据处理简化。

关 键 词: GPS; 一机多天线; 高边坡; 实时; 监测系统

中图分类号: P 228; TU 433

文献标识码: A

Study of real time monitoring system of highway steep slopes based on GPS with multi-antenna

WANG Jin-song^{1,2}, CHEN Zheng-yang¹, LIANG Guang-hua²

(1. School of info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Highway, Guangdong Communications Polytechnic College, Guangzhou 510650, China)

Abstract: In order to reduce the cost, the GPS with multi-antenna highway steep slopes real time monitoring system is established according to the idea that the single GPS receiver links multiple antennas. The system consists of field collection subsystem and indoor control subsystem. The collecting GPS signal from antenna array of the former is transmitted to the latter through time-sharing instrument, signal amplifier, wireless router, WLAN antenna; and the monitor points' coordinates are computed by data processing. In the single epoch algorithm, the non-integer solution of the ambiguity $\nabla\Delta N_{BM}^{ij}$ can be calculated from double difference value of satellite-earth $\nabla\Delta\rho_{BM}^{ij}$, double difference value of carrier phase $\nabla\Delta\phi_{BM}^{ij}$ and wavelength λ because the sampling of GPS is dense and the deformation value of monitor points between the twice samplings is small commonly; and then the integer ambiguity $\nabla\Delta N_{BM}^{ij}$ is obtained by ROUND function. Thus, the positioning precision of the double frequency receivers' carrier phase can attain ± 5 mm. It not only meet the requisite precision of steep slopes real time monitoring of highway, but also solve the problem of cycle slips which is brought from the switch of GPS signal between different antenna channels; thus the data processing can be simplified.

Key words: GPS; GPS with multi-antenna; steep slopes; real time; monitoring system

1 引 言

在公路尤其是高速公路的建设中, 为满足线形和纵坡的要求, 往往需要进行人工开挖, 形成公路高边坡, 因而破坏了原土体或岩体的天然平衡状态。在地质条件、阳光照射、降雨冲刷、下渗等多种因素作用下, 潜伏着边坡失稳的危害, 严重威胁公路建设和运营的安全。为及时预报公路高边坡的变形状况及其发展趋势, 避免边坡灾害, 高边坡变

形监测已成为我国公路工程建设中一个亟待解决的问题。

变形监测分为外部变形监测和内部变形监测两种, 前者主要采用经纬仪、水准仪、全站仪、GPS 等大地测量仪器测量绝对变形, 其优点是测量范围广、精度高; 后者主要采用测斜仪、多点位移计等进行岩土工程的监测, 其优点是能测出岩体内部的变形分布, 但测量范围小。对于重要的高边坡变形, 要有机地结合这两种监测手段。

收稿日期: 2008-04-07

第一作者简介: 王劲松, 男, 1971 年生, 教授, 博士研究生, 主要从事 GPS 理论与应用方面的研究。E-mail: gdjywj@sina.com

公路高边坡的外部变形监测,要求达到亚厘米级精度,过去常采用常规大地测量方法(平面位移采用边角网测量方法,垂直位移采用精密水准测量方法),很难实现实时监测,而且在边坡变形剧烈期间对观测人员的安全也构成威胁。GPS 三维定位以其精度高、范围广、全天候、易选点等诸多优点,已逐渐取代常规大地测量方法,在变形监测等领域得到广泛应用^[1]。GPS 变形监测有3种不同的监测模式:周期性重复测量、固定连续 GPS 测站阵列和实时动态监测,其中前2种模式适用于缓慢变形,一般采用静态相对定位方式进行数据处理;实时动态监测,采样密度高(几秒钟采样一次),能计算出每个历元的位置,具有实时性和自动化的优点,数据处理可以采用 OTF(on the fly)的方法,但高边坡

的监测环境往往较差, GPS 信号经常中断,给 OTF 方法带来了一定的困难,文献[2—4]提出了动态监测的单历元数据处理方法。

若每个监测点都配备一台 GPS 接收机,则设备投入多、成本昂贵,限制了其广泛应用,香港理工大学丁晓利教授 1999 年首次提出了一机多天线的思想,即不改变 GPS 接收机的结构,而通过增加一个 GPS 多天线转换开关 GMS(GPS multi-antenna switch),使其与多个 GPS 天线相连^[5]。

2 实时监测系统的构成

如图1所示, GPS 一机多天线公路高边坡实时监测系统,由野外采集子系统和室内控制子系统两部分组成。

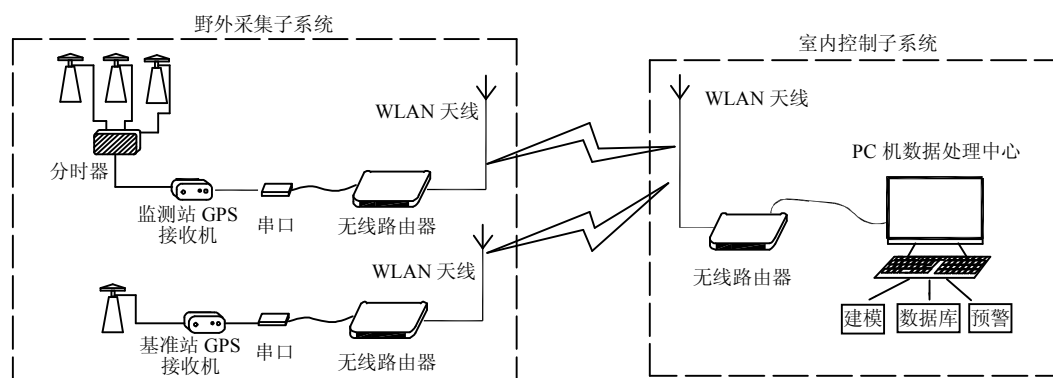


图1 GPS 一机多天线公路高边坡实时监测系统构成

Fig.1 Structure of real time monitoring system of highway steep slopes based on GPS with multi-antenna

2.1 野外采集子系统

野外采集子系统包括 GPS 天线阵列、分频器、信号放大器、GPS 接收机、串口服务器、无线路由器、WLAN 天线、基准站等。分频器将多个 GPS 天线与一台 GPS 接收机相连,在定位过程中 GMS 逐个扫描天线,并保持每个天线在一定的时间间隔内同接收机相连。时间间隔可根据实际需要事先予以设置,接收机通过接收来自不同天线的 GPS 信号,获得不同监测点上的观测值。

天线接收到的信号在传输到分频器的途中,若距离较远,信号的损失会较大,则需要在传输线路上安装信号放大器。分频器逐一将各监测点的观测数据传送到 GPS 接收机,通过串口服务器将数据打包,变成适合以太网传输的信息(TCP/IP),再经无线路由器变成无线局域网(WLAN)信号,然后经 WLAN 天线向外发送。基准站的信号同样经串口服务器、无线路由器和 WLAN 天线发送信号。

2.2 室内控制子系统

室内控制子系统由 WLAN 天线、无线路由器、

计算机组成。通过 WLAN 天线接收野外采集子系统发送的 GPS 信息,并通过无线路由器把这个信息传递到计算机,进行数据处理,实现 GPS 信息的处理、查询、分析、报警。在数据处理中,系统将收集来的监测数据,经软件解算,得各监测点的坐标数据。

3 监测系统的数据处理

GPS 一机多天线公路高边坡实时监测系统在监测过程中,卫星信号会按照设定时段在不同的通道间切换。通道切换虽然只需很短的时间,但切换会产生 GPS 相位周跳,若采用常规的 GPS 软件来解算,其定位结果往往不能满足监测精度要求。采用 GPS 单历元数据处理方法,是解决周跳的有效途径。

3.1 单历元数据处理方法

单历元定位主要应用于中短基线,是指仅利用一个历元的观测数据确定整周模糊度,一旦解出整周模糊度,即可得到该历元时刻待定点厘米级或亚厘米级精度的坐标。单历元定位成功的一个前提是

要求具有较高精度的近似坐标,对于单频 GPS 接收机,一般要求分米级精度的近似坐标,双频接收机可以放宽到 $\pm 2 \text{ m}^{[6]}$ 。

单历元数据处理方法,文献[2]提出选择 4 颗卫星构成整周模糊度搜索空间的方法,对待定点可能的位置,用最小二乘原理解算,选择具有最小残差二次型最优解。此方法可用于缓慢或快速变形,但计算复杂,需开发专业软件。

在公路高边坡变形监测中,由于基准点和监测点的首次观测数据,可以通过与国家 A 级或 B 级 GPS 大地控制网点(A 级 GPS 网的绝对精度不低于 $\pm 0.1 \text{ m}$, B 级 GPS 网的绝对精度不低于 $\pm 1 \text{ m}^{[7]}$)联测,采用静态定位的方法精确测定其绝对坐标,使其精度达到单历元数据处理双频接收机所要求的 $\pm 2 \text{ m}$ 精度。在基准点和监测点坐标已知的情况下,根据测得的相位观测值,按下面的方法,即可计算出整周模糊度。

3.2 整周模糊度计算方法

如图 2 所示,设基准点为 B , 监测点为 M , 卫星 i 和 j 中, i 为参考卫星,由载波相位定位公式,有:

$$\rho_B^i = \lambda \phi_B^i + \lambda N_B^i + c\delta_B + c\delta^i + \Delta_{B,\text{ion}}^i + \Delta_{B,\text{trop}}^i + \Delta_B^i \quad (1)$$

$$\rho_M^i = \lambda \phi_M^i + \lambda N_M^i + c\delta_M + c\delta^i + \Delta_{M,\text{ion}}^i + \Delta_{M,\text{trop}}^i + \Delta_M^i \quad (2)$$

式中: ρ_B^i 、 ρ_M^i 均为卫星至地面点间距离; λ 为载波波长; ϕ_B^i 、 ϕ_M^i 均为 B 、 M 两点的不足一周的载波相位观测值; c 为电磁波传播速度; N_B^i 、 N_M^i 为整周模糊度; δ_B 、 δ_M 均为接收机钟差; $\Delta_{B,\text{ion}}^i$ 、 $\Delta_{M,\text{ion}}^i$ 为电离层改正数; $\Delta_{B,\text{trop}}^i$ 、 $\Delta_{M,\text{trop}}^i$ 为对流层改正数; Δ_B^i 、 Δ_M^i 为其他误差改正数。

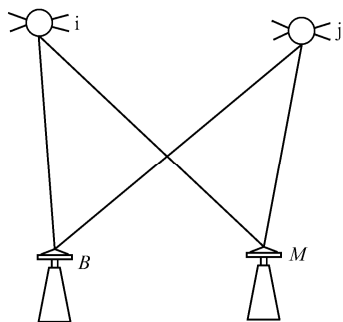


图 2 单历元 GPS 定位示意图

Fig.2 Sketch of single epoch GPS positioning

由于 B 、 M 两点相距几公里,电离层、对流层的影响大致相等,忽略其他误差影响,则站间求差

(单差)后,有:

$$\Delta \rho_{BM}^i = \lambda \Delta \phi_{BM}^i + \lambda \Delta N_{BM}^i + c \Delta \delta_{BM} \quad (3)$$

式中: $\Delta \rho_{BM}^i = \rho_M^i - \rho_B^i$, $\Delta \phi_{BM}^i = \phi_M^i - \phi_B^i$, $\Delta N_{BM}^i = N_M^i - N_B^i$, $\Delta \delta_{BM} = \delta_M - \delta_B$ 。同理,对于卫星 j ,有:

$$\Delta \rho_{BM}^j = \lambda \Delta \phi_{BM}^j + \lambda \Delta N_{BM}^j + c \Delta \delta_{BM} \quad (4)$$

将式 (3)、(4) 相减,得双差观测方程:

$$\nabla \Delta \rho_{BM}^{ij} = \lambda \nabla \Delta \phi_{BM}^{ij} + \lambda \nabla \Delta N_{BM}^{ij} \quad (5)$$

式中: $\nabla \Delta \rho_{BM}^{ij} = \Delta \rho_{BM}^j - \Delta \rho_{BM}^i$, $\nabla \Delta \phi_{BM}^{ij} = \Delta \phi_{BM}^j - \Delta \phi_{BM}^i$, $\nabla \Delta N_{BM}^{ij} = \Delta N_{BM}^j - \Delta N_{BM}^i$ 。

故当卫星 i 、卫星 j 、基准点 B 、监测点 M 坐标已知时, $\nabla \Delta \rho_{BM}^{ij}$ 为已知量, $\nabla \Delta \phi_{BM}^{ij}$ 、 λ 也为已知量,故按式 (5) 可计算出整周模糊度 $\nabla \Delta N_{BM}^{ij}$, 由于残余误差的影响,计算出的 $\nabla \Delta N_{BM}^{ij}$ 是非整数,再采用“四舍五入”(round 函数)的方法,使其变为整数,有:

$$\nabla \Delta N_{BM}^{ij} = \text{round}(\nabla \Delta \rho_{BM}^{ij} / \lambda - \nabla \Delta \phi_{BM}^{ij}) \quad (6)$$

3.3 整周模糊度计算方法的精度分析

由图 1 知,设卫星 i 和监测点 M 之间的距离为 ρ , 则有:

$$\rho = \sqrt{(X^i - X_M)^2 + (Y^i - Y_M)^2 + (Z^i - Z_M)^2} \quad (7)$$

式中: X 、 Y 、 Z 分别为卫星 i 和监测点 M 的三维坐标;按载波相位观测值,有:

$$\rho = \lambda(\phi(t) + N) \Rightarrow N = \rho / \lambda - \phi(t) \quad (8)$$

式中: $\phi(t)$ 为实测的不足一周的载波相位值; N 为整周模糊度。

由误差传播定律知:

$$\sigma_N^2 \lambda^2 = \frac{(X^i - X_M)^2}{\rho^2} \sigma_x^2 + \frac{(Y^i - Y_M)^2}{\rho^2} \sigma_y^2 + \frac{(Z^i - Z_M)^2}{\rho^2} \sigma_z^2 \quad (9)$$

设 $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma_z^2$, $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$, 则由式 (9) 知:

$$\sigma_N^2 = \sigma_x^2 = \sigma^2 / (3\lambda^2) \quad (10)$$

“四舍五入”,使整周模糊度 N 变为整数,产生最大误差是 0.5 周,即 $\sigma_N = 0.5$;按载波 L_1 的波长 $\lambda = 0.1903 \text{ m}$ 计算,则由式 (10) 可得,监测点 M 的位移量 $\sigma = 0.165 \text{ m}$ 。故 3.2 节中采用“四舍五入”法,计算单历元整周模糊度的方法在精度上是可行

的。因为只有当监测点 M 的变形位移量达到 0.165 m 时,才会出现错误,而 GPS 一机多天线公路高边坡监测系统,是一种实时动态监测,采样密度高,每隔几秒钟(一般不超过 20 s)采样一次,几秒钟内变形位移量一般不会超过 0.165 m。

3.4 坐标数据的转换

在变形监测系统中,基准点 B 是稳定的,其 WGS84 坐标(X_0, Y_0, Z_0)、经纬度(L_0, B_0)是已知的,故按式(6)解算出整周模糊度后,按载波相位定位方法,便可计算出基准点 B 到每个监测点 P 的三维基线向量($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$),进而得到每个监测点 P 的 WGS84 坐标(X_{84}, Y_{84}, Z_{84}),即

$$X_{84} = X_0 + \Delta X, Y_{84} = Y_0 + \Delta Y, Z_{84} = Z_0 + \Delta Z \quad (11)$$

为了直观地反映监测点 P 的水平位移、垂直位移情况,还需建立站心地平坐标系(以点 B 为原点,沿边坡纵向为 X 轴正向,边坡横向为 Y 轴正向,铅垂方向向上为 Z 轴正向的左手系),将式(11)得到的监测点 P 的 WGS84 坐标(X_{84}, Y_{84}, Z_{84}),转换成站心地平坐标(X, Y, Z),其转换公式^[8]为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{84} - X_0 \\ Y_{84} - Y_0 \\ Z_{84} - Z_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据各期监测点 P 的站心地平坐标(X, Y, Z),就可绘制出点 P 沿边坡纵向水平位移、沿边坡横向水平位移、垂直位移随时间变化曲线,从而对高边坡变形趋势作出预测。

4 实时监测系统的实现

广东某高速公路边坡,坡高 80 多米,由于地质条件较差,发育多个滑坡,为保障行车安全,建立了 GPS 一机多天线公路高边坡实时监测系统,由 2 台 Trimble 5800 双频机组成,仪器标称静态定位精度为: $\pm(5 \text{ mm} + 0.5 \times 10^{-3} \text{ mm})$ (水平), $\pm(5 \text{ mm} + 1 \times 10^{-3} \text{ mm})$ (垂直)。

4.1 监测点布设及基准点联测

如图 3 所示,该系统包括 1 个基准点 B 和 6 个监测点 $1^{\#} \sim 6^{\#}$ 。 B 点位于距离监测区域约 2 km 的视野开阔、干扰较少的稳固山体上,6 个监测点布设在高边坡形变比较敏感的特征点上,从现场看,

$1^{\#}$ 、 $2^{\#}$ 较稳定, $3^{\#} \sim 6^{\#}$ 有变形。基准点和监测点均埋设安装有强制对中装置的混凝土观测墩(墩高大于等于 1 m),接收天线固定安置在观测墩上,严格置平且保持指北,6 个监测点经分时器与 1 台 Trimble 5800 接收机相连,基准点与另 1 台 Trimble 5800 接收机相连。

首先按照《全球定位系统(GPS)测量规范》^[9]中 B 级网的精度要求,将基准点 B 与 2 个国家 B 级 GPS 大地控制网点进行了高精度的静态定位联测,得到基准点 B 精度不低于 $\pm 1 \text{ m}$ 的 WGS84 坐标(X_0, Y_0, Z_0),再以 B 点为基准,同样采用 GPS 静态定位的方法精确测定 $1^{\#} \sim 6^{\#}$ 点的 WGS84 坐标,作为首次观测数据。

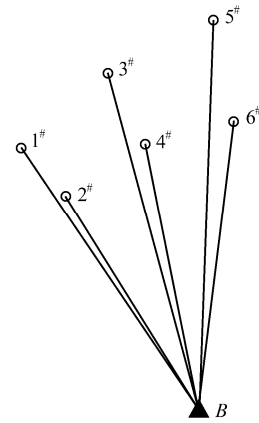


图 3 GPS 监测网点位布置示意图
Fig.3 Sketch of GPS points disposal of monitoring net

4.2 数据处理

采用多天线系统,对监测点 $1^{\#} \sim 6^{\#}$ 和基准点 B 进行 24 h 连续观测,数据采样间隔为 15 s,卫星截止高度角设为 15° ,空间位置精度因子 $PDOP < 6$ 。

4.2.1 整周模糊度的解算

为了检验整周模糊度解算的正确性,以 B 点和 $1^{\#}$ 点的首次观测数据为已知量,用 2 台 Trimble 5800 双频接收机,对以 PRN7 为参考卫星组成的 4 个卫星对(PRN7-PRN11、PRN7-PRN8、PRN7-PRN20、PRN7-PRN25),进行了 1 h 数据采集,以载波 L_1 为例,应用式(6)计算 L_1 的整周模糊度如表 1,结果表明,采用“四舍五入”的方法,可得到正确的整周模糊度。

4.2.2 成果数据

将 1 d 中载波 L_1 、 L_2 各个历元解算出的监测点位置坐标的平均值,作为该天监测点的位置坐标;以 1 d 为 1 期,将每期监测点位置坐标与首次观测坐标之差作为监测点的形变量,按站心地平坐标绘

制出纵向水平位移、横向水平位移、垂直位移随时间变化曲线。图 4、5 为 3[#]点的横向水平位移(Y 方向)变化、垂直位移(Z 方向)变化图。

表 1 单历元解算卫星对的载波 L_1 的整周模糊度
Table 1 Integer ambiguity resolution of carrier L_1 of satellites pair by single epoch algorithm

参数	以 PRN7 为参考卫星组成的 4 个卫星对			
	PRN7-PRN11	PRN7-PRN8	PRN7-PRN20	PRN7-PRN25
历元 10	62.18	-7.84	51.86	46.23
历元 11	62.12	-7.89	51.94	46.28
历元 12	62.23	-7.92	51.82	46.12
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
历元 58	62.10	-7.80	51.88	46.30
历元 59	62.26	-7.90	51.84	46.32
历元 60	62.15	-7.85	51.92	46.19
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
正确值	62.00	-8.00	52.00	46.00

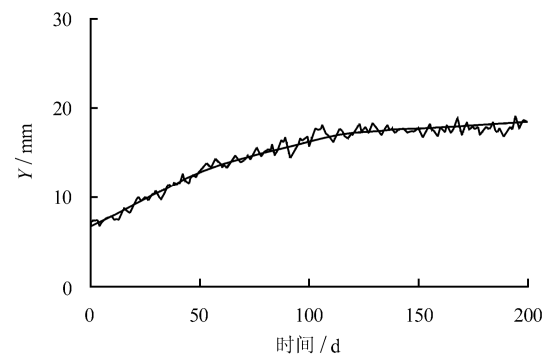


图 4 3[#]监测点横向水平位移变化曲线
Fig.4 Chart of traverse horizontal deformation of monitoring point #3

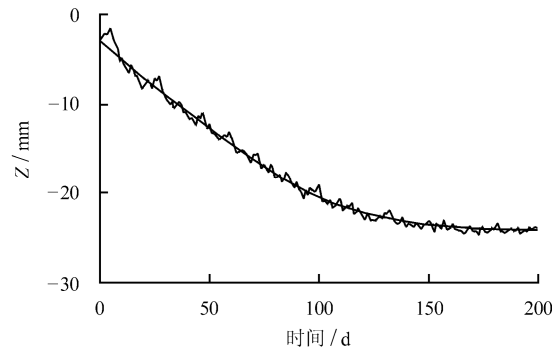


图 5 3[#]监测点垂直位移变化曲线
Fig.5 Chart of vertical deformation of monitoring point #3

5 结 语

GPS 一机多天线公路高边坡实时监测系统,既能满足危险区域实时、全天候监测的需要,又能大幅度降低设备成本,同时又不影响监测的精度,具有较高的性价比,为公路高边坡监测提供了 1 种新的技术方法,有着十分广阔的应用前景。该系统一

般都是长期连续工作的,故 GPS 接收机、电子、通讯设备应具有较高的产品质量和稳定性能,以确保监测系统高效工作。

参 考 文 献

[1] 侯林山, 王金龙, 朱三妹, 等. 利用差分 GPS 进行地面沉降监测的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 811—815.
HOU Lin-shan, WANG Jin-long, ZHU San-mei, et al. Study of difference GPS to monitor land subsidence[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 811—815.

[2] 陈永奇, LUTES J. 单历元 GPS 变形监测数据处理方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 324—328.
CHEN Yong-qi, LUTES J. Development of the methodology for single epoch GPS deformation monitoring[J]. **Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping**, 1998, 23(4): 324—328.

[3] 熊永良, 黄丁发, 张献洲. 一种可靠的含约束条件的 GPS 变形监测单历元求解算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(1): 51—56.
XIONG Yong-liang, HUANG Ding-fa, ZHANG Xian-zhou. A reliable GPS single epoch processing algorithm with known deformation interval constraints[J]. **Geomatics and Information Science of Wuhan University**, 2001, 26(1): 51—56.

[4] 余学祥, 徐绍铨, 吕伟才. GPS 变形监测信息的单历元解算方法研究[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 123—127.
YU Xue-xiang, XU Shao-quan, LÜ Wei-cai. The research of single epoch algorithm for the GPS deformation monitor information[J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 2002, 31(2): 123—127.

[5] DING X L, CHEN Y Q, HUANG D F, et al. Slope monitoring using GPS: A multi-antenna approach[J]. **GPS World**, 2000, (3): 52—55.

[6] 刘根友, 朱耀仲, 韩保民. GPS 单历元定位的阻尼 LAMBDA 算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(3): 195—197.
LIU Gen-you, ZHU Yao-zhong, HAN Bao-min. Damped LAMBDA algorithm for single epoch GPS positioning[J]. **Geomatics and Information Science of Wuhan University**, 2004, 29(3): 195—197.

[7] 陈俊勇. 中国国家高精度 GPS 大地控制网的建成[J]. 测绘通报, 1998, (8): 2—3.

[8] 王劲松. 站心地平极坐标系与 WGS-84 系的转换模型及应用[J]. 矿山测量, 2002, 112(3): 39—41.

[9] 国家测绘局测绘标准化研究所, 国家质量技术监督局. GB/T18314—2001 全球定位系统(GPS)测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.