

全国公路网差分 GPS 数据采集软件的设计

程鹏飞¹ 李夕银¹ 张 莉¹ 蔡燕辉¹

(1 中国测绘科学研究院大地测量与工程测量研究所, 北京市北太平路 16 号, 100039)

摘要:介绍了全国公路网差分 GPS 数据采集软件主要模块中的算法和流程, 包括差分 GPS 定位算法、载波相位平滑算法、地物属性纪录、计算机时间与 GPS 接收机时间的同步、地物匹配及偏心改正算法等。

关键词:差分 GPS; 公路测量; 地物匹配

中图法分类号:P228.41

公路网是国家基础地理信息库中重要的组成部分。全国公路网测量可以采用卫星遥感影像和车载差分 GPS 两种方式。与前者相比, 车载差分 GPS 道路测量具有精度高、信息准确全面、成本低等优点。

车载差分 GPS 道路数据采集的工作流程如图 1 所示。

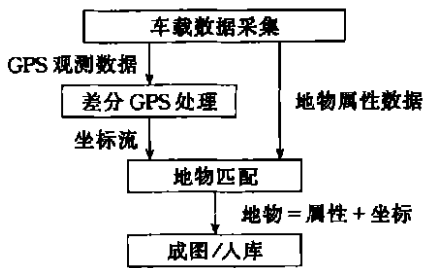


图 1 车载差分 GPS 公路数据采集流程

Fig. 1 Flow Chart of Vehicle DGPS for Highway Data Collection

车载差分 GPS 道路数据采集需要的硬件设备比较简单, 包括汽车、GPS 接收机、计算机等。软件系统的功能包括: 差分 GPS 解算、地物属性采集、地物/坐标匹配、地物坐标处理、成图等。

1 差分 GPS 数据处理

1.1 算法设计

差分 GPS 数据处理采用码伪距局域差分模式。该模式中包括一个基准站和一个或多个流动站。基准站设在坐标已知的参考点位上, 通过该

已知坐标计算伪距改正 (pseudorange correction, PRC) 和距离改正率 (range rate correction, RRC); 流动站使用这些改正对伪距观测量进行修正, 并利用修正后的观测量进行定位计算。

在 t_0 历元, 基准站的伪距模型为:

$$R_B^j(t_0) = \rho_B^j(t_0) + I_B^j(t_0) + \Delta\rho_B^j(t_0) + c\delta(t_0) - c\hat{\phi}_B(t_0) \quad (1)$$

式中, $R_B^j(t_0)$ 为卫星 j 的伪距观测量; $\rho_B^j(t_0)$ 为卫星 j 到基准站 B 的距离; $\Delta\rho_B^j(t_0)$ 为传播途径误差 (如电离层、对流层); $c\delta(t_0)$ 为仅与卫星有关的误差 (如轨道误差、卫星钟差等); $c\hat{\phi}_B(t_0)$ 为仅与接收机相关的误差 (如接收机钟差、多路径误差等); c 为光速。

PRC 的计算公式为:

$$\text{PRC}^j(t_0) = -R_B^j(t_0) + \rho_B^j(t_0) = -\Delta\rho_B^j(t_0) - c\delta(t_0) + c\hat{\phi}_B(t_0) \quad (2)$$

RRC 可以通过 PRC 时间序列的数值微分估计:

$$\text{RRC}^j(t_0) = \left. \frac{d\text{PRC}^j(t)}{dt} \right|_{t_0} \quad (3)$$

任意时刻的 PRC 可以通过式 (4) 计算:

$$\text{PRC}^j(t) = \text{PRC}^j(t_0) + \text{RRC}^j(t_0)(t - t_0) \quad (4)$$

其精度会随时间延迟 $(t - t_0)$ 的增加而降低, 但在道路数据集中采用事后差分 GPS 方式, 基准站采样间隔用流动站采样间隔 (1~2s) 的 1~2 倍, 故该项误差很小。

流动站观测模型为:

$$R_r^j(t) = \rho_r^j(t) + \Delta\rho_r^j(t) + c\delta(t) - c\hat{\phi}_r(t) \quad (5)$$

采用伪距改正后为:

$$R_r^j(t)_{\text{corr}} = R_r^j(t) + \text{PRC}^j(t) = \rho_r^j(t) + \Delta \rho_r^j(t) + c \delta(t) - c \hat{\varphi}(t) - \Delta \rho_B^j(t_0) - c \hat{\delta}(t_0) + c \hat{\delta}(t_0) - \text{RRC}^j(t_0)(t - t_0) \quad (6)$$

考虑短时间内 PRC 的时间不变性为:

$$R_r^j(t)_{\text{corr}} \doteq \rho_r^j(t) + \Delta \rho_r^j(t) + c \delta(t) - c \hat{\varphi}(t) - \Delta \rho_B^j(t) - c \hat{\delta}(t) + c \hat{\delta}(t) = \rho_r^j(t) + \Delta \rho_r^j(t) - c \hat{\varphi}(t) - \Delta \rho_B^j(t) + c \hat{\delta}(t) \quad (7)$$

由于在一定区域内, 传播途径误差具有较强的相关性, 故

$$R_r^j(t)_{\text{corr}} \doteq \rho_r^j(t) + c \hat{\delta}(t) - c \hat{\varphi}(t) \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 卫星误差与传播途径误差基本可以消除。

为了减小码距噪声, 采用观测精度较高的载波相位对码距进行平滑。平滑的方法有多种, DGPSWay 软件中采用了如下的递归公式:

$$R_{i+1} = \omega_{i+1} R_{i+1} + (1 - \omega_{i+1})(R_i + \Delta \Phi_{i+1, i}) \quad (9)$$

式中, R_i 为历元 t_i 的平滑伪距; R_{i+1} 为历元 t_{i+1} 的

观测伪距; $\Delta \Phi_{i+1, i} = \Phi_{i+1} - \Phi_i$, 为使用载波相位计算的 距离差。 ω_{i+1} 为历元 t_i 的平滑权因子 (smoothing weight factor, SWF), 对起始历元, ω 设为 1, 后续历元递减。在出现周跳的历元, 平滑失败, ω 重新设为 1。鉴于多普勒频移观测量具有抗周跳能力, 故简单的周跳探测可以通过多普勒频移观测量来实现。

1.2 试验情况

为验证定位精度及作业距离, 笔者在 1999 年 (SA 尚未关闭)进行了大量的试验, 如图 2 所示。试验线路为: ①西宝高速, 全长 170km, 东西走向。②西铜一级公路, 全长 102km, 南北走向。试验结果评估的方法包括: ①与静态 GPS 点比较; ②与 1:1 万地形图比较。试验前, 收集了试验线路经过区域最新的 1:1 万地形图, 通过明显地进行比较。试验结果见表 1、表 2, 中误差按 $m = \pm \sqrt{[\Delta S]^2 / n}$ 计算, 表 1 中 $m = \pm 3.9\text{m}$, 表 2 中 $m = \pm 7.2\text{m}$ 。

表 1 车载 GPS 采集点成果与静态点成果比较精度统计

Tab. 1 Accuracy Comparison Between Vehicle DGPS and Static GPS Results

较差区间 $\Delta S / \text{m}$	0~2.5	2.5~5.0	5.0~7.5	7.5~10	>10	最大值
采集点数	16	14	8	5	1	12.2
百分率/%	36.4	31.8	18.2	11.4	2.2	

表 2 车载 GPS 采集点地物点成果与 1:1 万地形图比较精度统计

Tab. 2 Accuracy Comparison Between Vehicle DGPS and Map at Scale of 1:10 000

较差区间 $\Delta S / \text{m}$	0~2.5	2.5~5.0	5.0~7.5	7.5~10	>10	最大值
地物点数	38	66	37	20	18	25.1
百分率/%	21.2	36.9	20.6	11.2	10	



图 2 差分精度测试

Fig. 2 DGPS Accuracy Test

与静态测量结果的比较可直接反映出差分定位的精度, 考虑到 1:1 万地形图用于综合取舍因素, 差分定位结果与之比较可以反映出差分定位的可靠性。

2 地物属性数据采集

地物属性数据采集要解决的主要问题有两个: ①记录地物的属性项; ②记录车辆通过地物的时间, 以便从差分 GPS 定位的时间/坐标流中提取地物的坐标。

2.1 地物属性项

道路附属设施和相关地物, 如桥梁、路口、加油站、里程碑等。这些地物的属性项不尽相同。为实现统一管理, 对其属性项、存储类型、长度、显示方式等进行整理, 形成地物属性表文件。该文件包含地物名称、代码、地物几何类型 (点状、线状、面状) 及其属性项信息等, 其中属性项信息又包括名称、存储方式、控件模式等。由于采用文本格式, 地物类型库的修改非常方便, 并且执行程序

代码不必重新编译。

在软件实现中,充分利用 C++ 面向对象的设计方法实现地物的动态统一。具体方法是设计一动态类,该类与地物属性表直接相关,通过属性表中的地物属性结构实现地物属性项的自动存储、显示及更新。图 3 给出了地物属性项记录的界面,右边的属性项将自动根据左边地物的改变而改变,其对应关系由上述的地物属性表文件确定。



图 3 自动化地物/属性记录器
Fig.3 Object/Attribute Recorder

2.2 时间记录

地物属性记录器通过时间将地物和差分 GPS 定位结果联系起来。获取记录地物属性时的时间有 3 种方式:①直接利用计算机时间;②使用 GPS 接收机的事件标识功能;③利用计算机来

获得 GPS 接收机时间。

利用计算机时间的优点是实现简单,无需增加额外设备,但计算机必须与 GPS 的时钟同步。粗略的方法是在施测前校准计算机时钟,施测后校核。另外一种方法是在采集过程中,人为设置几何特征点来实现两钟的同步,详见文献[3]。

GPS 接收机的事件标识通过外部脉冲在接收机内部产生时间信息,获取的时间完全同步,其缺点是许多 GPS 接收机不具备事件标识功能,无法采用本方法。

利用计算机来获得 GPS 接收机时间是通过建立计算机与 GPS 接收机的实时通讯,通过一个独立的线程实时更新计算机的时钟,虽然输入/输出会造成一定的时间延迟,但该延迟量很小,其精度满足需要。此外还可以获取卫星状态、导航结果等附加信息。

DGPSWay 软件中最初采用方法①(几何同步),随后进行升级采用了方法③,其设计流程图如图 4。即通讯线程监测到新的 GPS 接收机的时间信息,便计算并修正计算机时间和 GPS 接收机时间之间的差异 Δt ,主线程在有外部事件时,利用计算机时间和 Δt 来恢复 GPS 接收机时间。

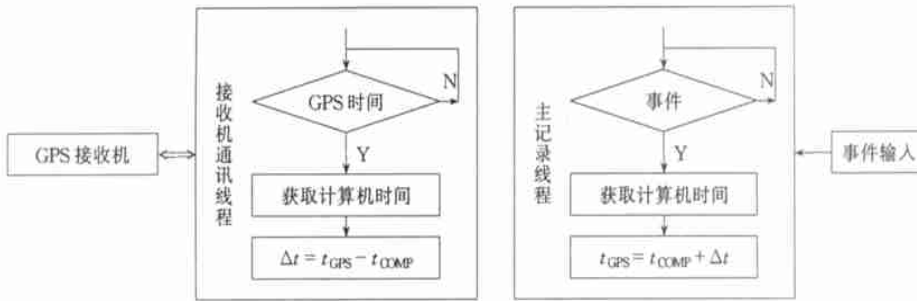


图 4 时间同步流程
Fig.4 Time Synchronization Diagram

3 地物匹配

如图 5 所示,地物匹配是指根据记录的地物时间信息 t (和 t'),从差分 GPS 解算出的时间/坐标流中得到地物对应的坐标 X, \dots, X' ,并对其进行修正得到地物坐标 X_t, \dots, X'_T 的过程。其流程如图 6。首先根据地物的采集时间,从坐标流中提取出对应的坐标(串),然后用线性时间/坐标模型对端点坐标进行内插。内插公式为:

$$X = \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} (X_2 - X_1) + X_1 \quad (10)$$

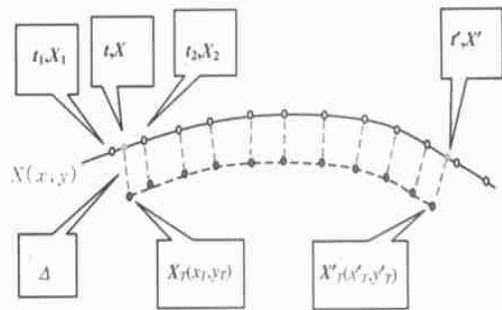


图 5 轨迹/地物示意图
Fig.5 Illustration of Trace and Object

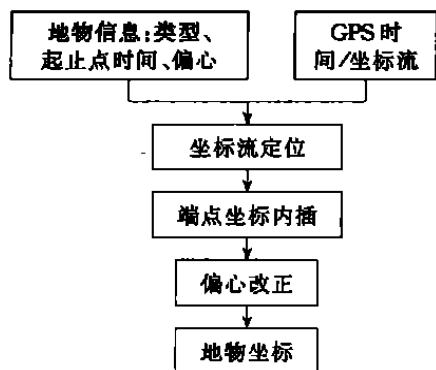


图 6 地物匹配流程

Fig. 6 Flow Chart of Object Matching

式中, $X = X(x, y)$ 为端点坐标; t 为端点时刻; X_1, X_2, t_1, t_2 分别为前后历元的坐标和对应时刻。当地物与车辆轨迹不共线时, 需要进行偏心改正, 其原理是根据偏心量按轨迹线的法线方向进行平移。计算公式为:

$$\begin{cases} x_T = x + \Delta \cos(\tan^{-1}(dy/dx) + \pi/2) \\ y_T = y + \Delta \sin(\tan^{-1}(dy/dx) + \pi/2) \end{cases} \quad (11)$$

式中, Δ 为偏心值; $X(x, y)$ 为轨迹点坐标,

$X'(x', y')$ 为偏心改正后坐标。

DGPSWay 软件已经成功地在中国公路网 GPS 测绘工程中得到了应用。目前, 国省道部分已经采集完毕, 县乡道部分正在进行当中。该软件还针对公路数据集中的一些实际情况, 如停车、倒车造成数据拥挤的点位过滤、定位结果的图形显示等进行了功能扩充。

参 考 文 献

- 1 陈俊勇. 全球定位系统差分实时定位技术概论. 测绘科技动态, 1996: 97
- 2 刘经南, 陈俊勇, 等. 广域差分 GPS 原理和方法. 北京: 测绘出版社, 1998
- 3 程鹏飞, 李夕银, 等. 用差分 GPS 采集 1:5 万公路数据的技术关键. 测绘科学, 2000, 25(1)
- 4 Hofmann-Wellenhof B. GPS Theory and Practice, 4th ed. Now York: Springer, 1997

第一作者简介: 程鹏飞, 研究员, 博士。现主要从事卫星与定位领域的研究工作。

E-mail: pfcheng@public.bta.net.cn

DGPS-based Software Design of Nationwide Highway Surveying in China

CHENG Pengfei¹ LI Xiyin¹ ZHANG Li¹ CAI Yanhui¹

(1 Chinese Academy of Surveying and Mapping 16 Beitaijing Road, Beijing, China, 100039)

Abstract: Arithmetic and module-design in the DGPSWay software were introduced. The differential GPS based software package has been successfully used in the nationwide highway surveying in China. Arithmetic of differential GPS and carrier phase-aided code smoothing, recording of attribute-data, time synchronization between computer and GPS receiver, matching of terrestrial-object and coordinate stream were described in detail.

Key words: differential GPS; highway surveying; matching of terrestrial-object

About the first author: CHENG Pengfei, researcher, Ph. D. His research interest is mainly focused on the domain of satellite navigation and positioning.

E-mail: pfcheng@public.bta.net.cn