

车辆导航与监控中 GPS/GIS 实时定位配准误差分析

陆 锋 崔伟宏

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 该文对车辆导航与监控应用中 GPS 定位测量结果与数字地图的实时配准误差进行了深入分析,并结合实践推算了各环节误差量,在此基础上提出了消除或减轻误差的方法,使得在现有基本硬件配置条件下,车辆导航与监控应用中 GPS 定位测量结果与数字地图的配准误差减至最小水平。

关键词 车辆导航与监控, GPS, 数字地图, 配准误差

1 引言

近年来,随着 GPS 定位技术的不断发展与普及和硬件价格的迅速下降, GPS 实时定位结合 GIS 数字地图用于车辆的智能导航与监控显示出巨大的市场潜力与广阔前景。虽然此类应用只是 GPS, GIS 技术的一种初级水平的集成方式,但却在呼声日益高涨的智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)^[1-3]中占有重要地位。在发达国家,由于经济实力雄厚,通讯基础设施完善, GPS/GIS 集成技术支持下的车辆导航与监控应用已经非常普及^[4-8]。目前,此项技术在中国的一系列大中城市,特别是在公安、交通、消防及银行等部门也有了较快的发展,取得了一定的成效^{1)-3) [9-11]}。

然而,由于 GPS 定位及数据处理过程中存在一系列误差,使得 GPS 定位结果与数字地图的配准精度较低。而这一问题在实践中却远未引起足够的重视。目前正在试运行的此类系统,很多并未考虑定位与配准误差对系统有效性所造成的影响,这对 GPS/GIS 集成技术支持下的车辆导航与监控在中国的进一步普及与发展极为不利。

近年来我们先后承担了车辆智能导航及安全监控系统的开发工作,并在北京、深圳、西安等城市付诸实施。在系统开发过程中,经过分析与研究,我们推算了系统运行中的各环节误差量,提出了一系列误差处理方法,有效地减少了 GPS/GIS 的配准误差。

2 车辆导航与监控系统的基本特征

GPS/GIS 技术支持下的车辆导航与监控系统主要由车载 GPS-OEM 板及接收天线、计算机、GIS 软件、数字地图、RS-232 接口及无线通讯数据链等组成。GPS 接收天线实时接收 GPS 卫星信号,在 OEM 板上完成位置解算后通过无线通讯数据链或直接经 RS-232 接口输入计算机,由 GIS 进行实时处理并将结果实时配准在 GIS 数字地图上,然后利用 GIS 的空间分析算法完成车辆的智能导航与监控工作。

车辆导航与监控系统技术框图如图 1。

系统欲要良好运行,必须满足以下 3 个条件:

- (1) 具有较高精度与可靠性的 GPS 单点一次连续定位;
- (2) 高质量的 GIS 数字地图;
- (3) 完善的 GPS 定位结果与 GIS 数字地图的配准算法。

3 误差分类

按照 GPS/GIS 配准误差的产生及数据处理过程,可将其分为 5 部分,即定位粗差、GPS 常规测量误差、GPS 定位测量结果坐标转换误差、投影变换误差及 GIS 数字地图平面误差。其中的 GIS 数字地图平面误差,已有较多文献涉及,并做过深入的研究,在此不再赘述。

1) 李新功,邱方,詹舒波。GPS、GIS 在车辆实时监控中的应用。首届 ARC/INFO 中国用户会议论文集。1994。

2) 田原,郭伦,程承旗等。GPS/GIS 技术系统集成——以 Citystar-GPS 系统为例。中国 GIS 协会年会论文集。1995。

3) 高建荣。GPS 车辆监控系统在公交车辆管理中的应用。中国 GIS 技术应用协会年会论文集。All rights reserved. <http://www.cnki.net>

收稿日期:1998-04-23;收到修改稿日期:1999-03-31

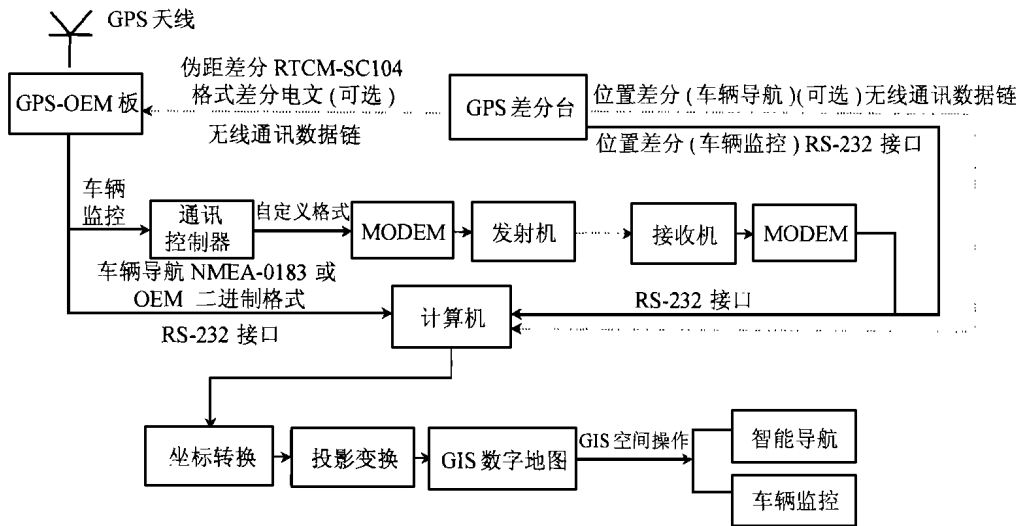


图 1 车辆导航与监控系统技术框图

Fig. 1 Diagram of vehicle guidance and monitoring system

3.1 定位粗差

定位粗差是完全错误的测量值，可能产生于定位过程中的 GPS 卫星失锁、瞬时错误的卫星导航电文及通讯误码等。其定位误差由几百米到几公里不等。这种情况也可能出现在 GPS 接收机刚开机后的 1—2min 内，由于未能捕获有效的卫星信号而产生定位粗差。

3.2 GPS 常规测量误差

GPS 常规测量误差包括 GPS 星钟误差、星历误差、电离层延迟误差、对流层延迟误差、接收机噪声误差与通道间偏差等。此外，美国国防部实施的 SA 政策，产生平均为 30m 左右的平面定位误差^[12-14]。

GPS 常规平面定位误差范围如表 1。

表 1 GPS 常规平面定位误差

Table 1 GPS conventional planar positioning error

50%置信度	40m
95%置信度	100m

3.3 GPS 定位测量结果坐标转换及投影变换误差

中国目前 GIS 数字地图定位所采用的平面直角坐标系主要是北京 54 坐标系与西安 80 坐标系。其它地方独立坐标系也均与这两种坐标系有着明确的变换关系。而 GPS 定位所采用的是 WGS-84 坐标系。其定位结果，无论是大地坐标或大地直角坐标，均为 WGS-84 坐标。由于空间任意一限定，其在

不同的大地坐标系中具有不同的大地坐标及大地直角坐标值，经投影后得到的平面直角坐标也不同，因此，GPS 定位测量结果，必须经过严格的大地直角坐标转换与投影变换，才能与 GIS 数字地图精确配准。然而，由于很多 GPS 用户缺乏专业基础，往往忽略了这一重要步骤，直接将测量结果进行仿射变换得到平面直角坐标，与 GIS 数字地图配准。这样势必造成较大误差。根据我们在北京地区的实测数据计算，忽略严格的大地直角坐标转换与投影变换所带来的定位误差，在北京平均达 70—100m 左右，已远远大于 GPS 常规测量误差。

4 误差处理方法

4.1 定位粗差

当 GPS 定位测量过程中出现粗差时，常伴有较大的 DOP 值，对于移动目标，还将出现显著的速度异常。因而此类粗差较易识别。在车辆导航与监控系统中我们通过 GPS-OEM 板上设置合适的 DOP 滤波因子、速度滤波因子及加速度滤波因子以探测此类粗差并予以剔除。在无线通讯过程中由于误码而出现的定位粗差，我们通过无线通讯中的多项式生成循环码校验法予以识别并剔除。由于粗差特征明显，易于剔除，只会在短时间内影响定位的连续性，而不会对定位的精度产生较大影响。

对于因粗差而造成的定位短时的不连续，在实践中我们利用已获取的有效定位点及移动速率对空缺定位数据进行短时的线性插值，以补偿短时粗差对车辆导航及监控所带来的不利影响。

4.2 GPS 常规测量误差

GPS 常规测量误差中的星钟误差、星历误差和信号传播延迟误差,特别是 SA 带来的误差,可以通过差分方法予以减少或消除。实时伪距差分可将单点一次定位精度提高至 5—10m 左右。如此高的定位精度对于车辆导航与监控是否必要还有待进一步商榷。但可以肯定的是,采用实时伪距差分技术将会大幅度提高系统车载部分的成本及占用宝贵的无线通讯资源。目前中国还没有出现在国外比较普及的局域或广域差分信号发布商。虽然利用广播电台调频副载波搭载差分信号技术已经研制成功,但它仍然需要专用的车载调频收音装置^[15],在现阶段对于中国的车辆导航与监控应用也是不合时宜的。

比较折衷的方法是采用位置差分技术。差分站实时计算出位置改正值及改正值变化率,并按照应用特点向外发送(如车辆导航)或对接收数据进行差分处理(如车辆监控)。位置差分的最大优点是不需要 GPS-OEM 板具有伪距差分接口,在应用中可选择功能较为简单的 OEM 产品,降低成本。此外,若需要无线通讯(如车辆导航),其所需通讯数据量也比伪距差分减少很多。在车辆监控项目中,逆向位置差分技术甚至不要求占用额外的无线通讯资源实时传送差分电文,只需被监控车辆实时传送定位测量数据及定位所用 GPS 卫星的 PRN 值即可。所有差分改正工作均在监控站完成。其不足之处在于,由于位置差分是对计算结果的差分而不是对原始测量值的差分,为抵消共同误差项的影响,要求差分站 GPS 接收机与流动站 GPS 接收机使用同一组卫星定位,这就要求差分站 GPS 接收机具备快速选星功能。此外,为抵消接收机差异所带来的系统误差,差分站与流动站应使用同样型号的 GPS 接收机。位置差分一次定位误差为 15m 左右。若监控站 GPS 接收机不能快速选星,则此精度还将有所降低。按照我们在北京市车辆安全监控项目中的实测数据,不考虑流动站与监控站 GPS 定位星座的一致性,根据车辆运行轨迹拐点及垂线偏差值,估算出位置差分一次定位平均误差为 25m 左右。

值得注意的是, GPS 接收机常规测量误差一般要比其所标定的误差小。Wilson 曾对最流行的几种手持式导航型 GPS 接收机进行过连续长达两个月的测试,得到近千万个测量值^[16]。结果表明,所测试的各种型号 GPS 接收机平均定位误差均小于标定误差。其中价格在 250 美元左右的几种接收机

95.4%(2σ)的测量结果误差为 57—72m。我们也利用 Rockwell 的 Jupiter OEM 板与 Garmin 的 G20 OEM 板进行过长期测试,得到了类似的实验结果。

4.3 GPS 定位测量结果坐标转换及投影变换误差

4.3.1 大地直角坐标转换误差

GPS 系统采用的是 WGS-84 坐标系。它是一种地心坐标系。而实用的测量成果是属于某一国家坐标系或地方坐标系的,因此必须对 GPS 测量结果进行直角坐标转换。

大地直角坐标转换主要有 3 种模型,即布尔莎模型、莫洛金斯基模型及武测模型^[13]。对于普通应用,使用布尔莎模型即可满足需求。

布尔莎模型转换公式为

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+k) * \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_Z & -\epsilon_Y \\ -\epsilon_Z & 1 & \epsilon_X \\ \epsilon_Y & -\epsilon_X & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$ 为同一点在不同坐标系中的大地直角坐标。若 GPS 接收机输出结果为大地坐标,可根据文献^{[13], [14]}中有关公式将之转换为大地直角坐标。 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为两个坐标系的坐标原点平移量, k 为无量纲的尺度因子, $\epsilon_X, \epsilon_Y, \epsilon_Z$ 为坐标轴旋转角。实际应用中,对上述 7 个参数可采用地面控制点平差的方法解求。若只有一个地面控制点,也可只解求 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, 舍去 $\epsilon_X, \epsilon_Y, \epsilon_Z$ 及 k 4 个参数。大多数 GPS 接收机均可设置用户自定义大地直角坐标系,其中只包含 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 3 个平移参数及基本椭球参数,可直接输出 GPS 测量结果在此自定义大地直角坐标系中的大地坐标或大地直角坐标,省去用户的大地直角坐标转换过程。

由于 3 参数转换未考虑 3 个坐标轴旋转角及比例因子,会带来一定的误差,可以证明此舍入误差对大地坐标的影响为:

$$\Delta B'' = -\sin L * \epsilon_X + \cos L * \epsilon_Y \quad (2)$$

$$\Delta L'' = \operatorname{tg} B * \cos L * \epsilon_X + \operatorname{tg} B * \sin L * \epsilon_Y - \epsilon_Z \quad (3)$$

根据在北京地区的实测结果,此舍入误差为 10m 左右,并非可以忽略不计。因此,若条件允许,我们推荐使用 7 参数转换。

若经过大地直角坐标转换,直接将 GPS 测量结果进行高斯-克吕格投影变换纳入北京 54 或西安

80坐标系与 GIS 数字地图配准,将会带来较大误差。我们曾对北京市区进行了采样间隔为 1' 的系统抽样,共采集 20 * 20 个点位,首先对这些点位对应的 WGS-84 大地坐标直接做高斯-克吕格投影,然后对其所对应的大地直角坐标进行 7 参数转换,将转换结果化为大地坐标后再进行高斯-克吕格投影。二者比较结果表明,若不经大地直角坐标转换,直接将 GPS 测量结果进行高斯-克吕格投影变换,将会带来近 60m 的平均误差,这已经大于 GPS 常规测量平均误差(标定 1σ 为 50m)。

大地直角坐标转换完成后,为方便投影变换,需将大地直角坐标化为大地坐标,具体转换公式可参看文献[13,14]。

4.3.2 投影变换误差

投影变换可利用严密公式或近似公式进行解算^[17,18]。采用这些投影变换公式,均可保证误差在 0.1m 以内。在城市应用中,因多使用 1:10000 地形图或地籍图建立 GIS 数据库,此时必须选用 3°带高斯-克吕格投影。

同样,由于不正确的投影变换方法所带来的定位误差也应引起足够的重视。在实际应用中利用仿射变换代替投影变换屡见不鲜。从本质上说,仿射变换并未进行球面到平面的投影变换,而只是利用公共点在平面上所进行的坐标转换,其误差将随着区域的扩大而迅速增大。我们利用上述 400 个样点作为控制点,经最小二乘平差解求仿射变换参数,所得控制点残余均方差为 12m,区域边缘控制点 X 坐标偏差达 32m, Y 坐标偏差达 8m,点位误差已达 35m。在实际应用中,用户所选控制点数量将会大幅度减少,点位误差还会增大。因此,利用仿射变换代替投影变换的做法是不可取的。

图 2 为北京市区车辆跟踪 GPS 实测数据示意图(部分),共连续测量了 3946 个点。地图数字化时控制点的残余均方差为 5m。如图 3, $p_0, p_1 \dots$ 为 GPS 单点一次定位值直接经仿射变换所得到的平面直角坐标点, $p'_0, p'_1 \dots$ 为各点经实时位置差分、严格大地坐标转换及投影变换后的位置点, $\overrightarrow{p_0q_0}, \overrightarrow{p_1q_1}, \dots$ 为各误差矢量垂线分量。利用 GIS 空间接近性分析的有关操作,计算可得各分量误差均值为

可见,经实时位置差分、严格大地坐标转换及投影变换后,配准效果已大为改善。

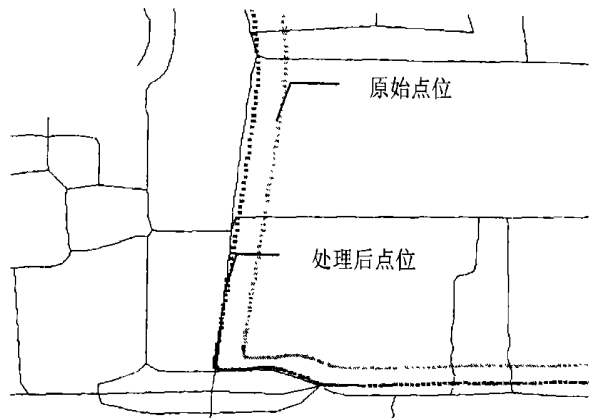


图 2 实测数据示意

Fig. 2. Diagram of practical measuring data

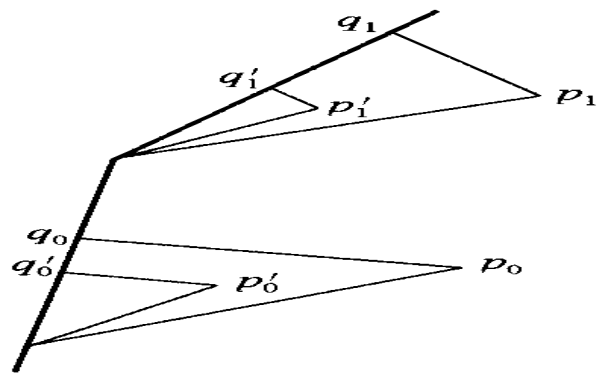


图 3 坐标转换误差矢量比较

Fig. 3. Comparison of error vector of coordinate transformation

4.4 定位结果的实时垂线改正

通过严格的大地直角坐标转换及投影变换后, GPS 定位测量结果与数字地图的配准误差中只包含了 GPS 常规测量误差。考虑到车辆导航与监控应用中 GPS 定位结果的线性特征(车辆需沿道路行驶),在实践中我们利用 GIS 空间接近性分析方法使配准误差进一步减小。

首先,将 GPS 定位误差矢量分解为沿道路路段方向的矢量分量与道路垂线方向的矢量分量。如图 4, p'_a 为经严格大地直角坐标转换及投影变换后的 GPS 测量点位, p_a 为其真实坐标, θ 为 $p'_a p_a$ 与路段 $p_{a-1} p_{a+1}$ 的夹角。过 p'_a 做路段 $p_{a-1} p_{a+1}$ 的垂线,垂足为 q ,则误差矢量

$$\overrightarrow{p_a p'_a} = \overrightarrow{p_a q} + \overrightarrow{q p'_a}$$

由于已知 p_a 点一定位于路段上,误差矢量分量

$$E_{average} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n p_i q_i \approx 44.8m,$$

$$E'_{average} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n p'_i q'_i \approx 16.4m \quad (n = 3946) \quad (4)$$

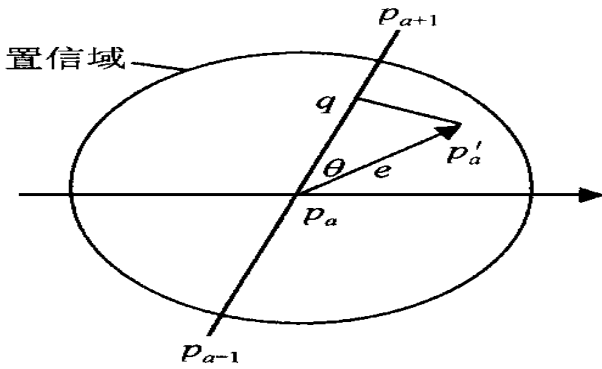


图 4 误差矢量分解

Fig. 4 Decomposition of error vector

$\overrightarrow{qp'_a}$ 可以消去。也就是说,可以把误差位置点 p'_a 归化到垂足 q 上。这样,真正的定位误差只是矢量 $\overrightarrow{p_aq}$ 的模,其物理意义可以直观地从图 5 看出。原定误差在一定置信水平下可表示为矩形区间 S_1 内的随机分布,而路段方向的误差矢量分量的随机分布区间只是 S_1 的子区间 S_2 。

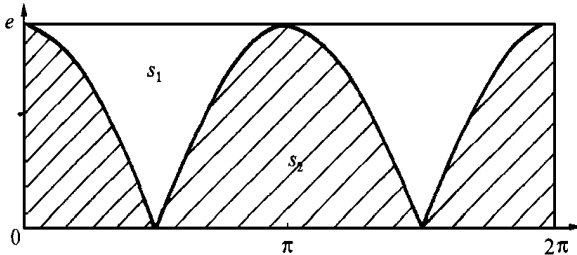


图 5 垂线改正前后定位误差区间

Fig. 5 Extent of positioning error before and after perpendicular correction

在已知定位误差 $p'_a = e$ 服从圆正态分布的前提下,可推导出误差矢量分量 $\overrightarrow{p_aq}$ 的模的数学期望为

$$E(|\overrightarrow{p_aq}|) = \frac{4 * \int_0^{\pi/2} e \cos \theta d\theta}{2\pi} \approx 0.6366e \quad (5)$$

即通过垂线改正,可进一步将 GPS 定位误差减少为原误差为 63.66%。

在车辆导航与监控系统的开发中,我们对每一个经过严格处理的 GPS 定位值,均利用 GIS 空间接近性分析算法实时寻找距离其最近的路段,并得到垂足位置,以此作为测量点位输入系统,支持系统的运行。

因此,若不考虑 GIS 数字地图数字化误差,经过上述各步骤处理后, GPS 定位测量结果与数字地图的配准误差如表 2。

表 2 处理后的 GPS 定位结果与数字地图配准误差
Table 2 Matching error of GPS data and digital map after processing

50%置信度(无差分)	$0.6366 * 40_m = 25.5_m$
95%置信度(无差分)	$0.6366 * 100_m = 62.7_m$
位置差分平均误差(估值)	$0.6366 * 25_m = 15.9_m$

5 结论

从上述研究过程中,得出以下结论:

(1) 车辆导航及监控应用中 GPS 定位测量结果与 GIS 数据库的配准误差由定位粗差、GPS 常规测量误差、WGS-84 与 GIS 数据库所依据的大地直角坐标系的转换误差、投影误差及 GIS 数字地图平面误差等 5 个部分组成。

(2) 粗差特征明显,易于识别与剔除。它只会在短时间内影响定位的连续性,而不会对定位的精度产生较大的不利影响,且可利用已获取定位数据进行短时的线性插值予以补偿。

(3) GPS 位置差分实时定位精度可达 25m 左右,且对 GPS 硬件无特殊要求,通讯量也比伪距差分减少很多。考虑到车辆导航及监控应用对无线实时通讯及 GPS 定位精度的要求,可以采用逆向位置差分技术取代常规的伪距差分以减少 GPS 常规测量误差。

(4) 忽略 GPS 定位结果的大地直角坐标转换,将会带来近 60m 的平均误差,这在一定程度上已大于 GPS 常规测量平均误差。采用布尔莎 7 参数转换模型可以有效地消除大地直角坐标转换误差,将 GPS 定位测量结果由 WGS-84 大地坐标系转至中国国家大地坐标系。

(5) 采用控制点仿射变换将大地坐标转换至平面坐标,误差可达 30m 以上,且随着区域的扩大而迅速扩大。在车辆导航及监控应用中,应采用正确的投影变换方法完成大地坐标转换。

(6) 考虑到车辆导航与监控应用的具体特征,利用 GIS 空间接近性分析中的实时垂线改正法可将配准误差进一步减小为 GPS 常规测量误差沿路段的分量误差,其均值仅为原测量误差的 63.66%。

参 考 文 献 (References)

Lewis, M., Brakcomb, J., Keller, J., *Converging Infrastructures: Intelligent Transportation and the National Information Infrastructure*. The U.S. Massachusetts: MIT Press, 1996.

- 2 The U. S. Department of Transportation. What is ITS? <http://www.its.dot.gov/what.htm>, 1996.
- 3 The U. S. Department of Transportation. Questions and Answers Regarding the Intelligent Transportation Systems Program. <http://www.its.dot.gov/qa.web2.htm>, 1995.
- 4 Virginia Polytechnic Institute and State University. Enabling Technologies for Mayday Systems. 1996.
- 5 John T. Beadles. Introduction to GPS Apps-IVHS & Vehicle Tracking. <http://ares.redsward.com/gps/apps/applications/ivhs.htm>, 1997.
- 6 Translated by Wang Hetong. The Metropolitan Dynamic Guidance System in Chicago. *Technology News of Surveying and Mapping*, 1997, 20(2): 26-29. [王贺彤编译. 芝加哥城市道路动态导行系统. 测绘科技通讯, 1997, 20(2): 26-29.]
- 7 Corp Ten International. AUTOFIND. <http://www.corpten.com/page5.html>.
- 8 LOCSYS Corp. A Real-Time AVL Solution. <http://www.locsys.com>, 1988.
- 9 Beijing Daheng Corp. Daheng Vehicle Positioning Management System. [北京大恒公司. 大恒车辆定位管理系统.] <http://www.mapinfo.com.cn/rainbw31.htm>.
- 10 Beijing Guotong Information Technology Consulting Corp. Navmob Fleet Monitoring System. [北京国通信息技术咨询公司. Navmob 移动目标监控系统.] <http://www.guotong.com.cn/document/gps/sld005.htm>.
- 11 Beijing Jinghuida New Technology Corp. Vehicle Monitoring and Management System. [北京京惠达新技术公司. 车辆监控与管理系系统.] <http://www.jhdgps.com.cn/html/jhd-cn.html>.
- 12 Michael Kennedy. The Global Positioning System and GIS: An Introduction. USA, Michigan: Ann Arbor Press, Inc. 1996.
- 13 Liu Dajie, Shi Yimin, Guo Jingjun. Principles and Data Processing of GPS. Shanghai: Tongji University Press, 1996. [刘大杰, 施一民, 过静君. 全球定位系统的原理与数据处理. 上海: 同济大学出版社, 1996.]
- 14 Qian Tianjue, Qu Xuelin. GPS and Applications. Beijing: Haichao Press, 1993. [钱天爵, 瞿学林. GPS 全球定位系统及其应用. 北京: 海潮出版社, 1993.]
- 15 Beijing Jinghuida New Technology Corp. RDS/DGPS Precise Positioning System. [北京京惠达新技术公司. RDS/DGPS 精确定位系统] <http://www.jhdgps.com.cn/html/jhd-cn.html>.
- 16 David L. Wilson. An Accuracy Comparison of Assorted GPS Models and Comments on Averaging. <http://www.erols.com/dlwilson/>, 1997.
- 17 Zhu Huatong. The Establishing of Geographic Coordinate Systems. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1986. [朱华统. 大地坐标系的建立. 北京: 测绘出版社, 1986.]
- 18 Shen Yongnian. The Decomposition of Double Power Progression of Gauss-kruger Projection and Practical Functions. *Journal of Surveying and Mapping*, 1991, 20(2). [沈永年. 高斯-克吕格投影的双幂级数展开及实用计算式. 测绘学报, 1991, 20(2):]

作者简介

陆锋, 男, 生于 1970 年 1 月, 1991 年毕业于武汉测绘科技大学航测与遥感系摄影测量与遥感专业, 现在中国科学院遥感应用研究所攻读博士学位, 主要从事城市地理信息系统应用研究。

Matching Error Analysis of GPS Positioning and Digital Maps in Vehicle Guidance and Monitoring

LU Feng, CUI Wei-Hong

(Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101)

Abstract The matching error of GPS positioning results and GIS digital maps in vehicle guidance and monitoring applications are analyzed in this paper. According to the error sources and the procedure of data processing, the matching error is divided into five parts. It is detailed in this paper the possible error extents of the coarse error, conventional error, and the incorrect coordinate transformation and projection methods. The error processing methods are discussed concerning the steps respectively. Furthermore, a map matching method is put forward to improve the matching results, and the effect is discussed. The presented methods minimize the matching error of GPS positioning and GIS digital maps in vehicle guidance and monitoring with the basic hardware platforms available.

Key words Vehicle Guidance and Monitoring, GPS, Digital Map, Matching Error