

# GPS/DR 原始观测值组合导航定位研究

于兴旺<sup>1</sup> 张小红<sup>1</sup> 刘经南<sup>2</sup> 赵莹<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 根据 GPS/DR 组合系统的导航定位原理, 推导了利用 GPS 原始观测值与 DR 航位推算信息进行组合的 Kalman 滤波模型, 并利用该滤波模型对 GPS/DR 原始观测数据进行航位解算。数据处理结果表明, 即使在只有两颗 GPS 观测卫星的情况下, 该滤波模型也可以充分利用 GPS 观测信息提高 DR 航位推算精度。

**关键词:** GPS/DR 组合; 原始观测值; Kalman 滤波

**中图分类号:** P228.42

GPS 导航定位需要接收机观测 4 颗以上卫星才能进行, 但是在城市、山区等遮挡严重的地方, 观测卫星可能少于 4 颗, 基于传统的导航定位模型无法进行实时导航定位<sup>[1]</sup>。在此情况下, 为了实现连续的车辆导航定位要求, GPS/DR 组合导航无疑成为最佳选择的方案之一。目前国内研究的 GPS/DR 组合导航模型主要是基于 GPS 的位置信息与 DR 的航位信息进行组合, 当 GPS 卫星数少于 4 颗时, 即切换到 DR 模式进行导航定位, 没有充分利用 GPS 的观测信息来抑制 DR 航位推算的误差积累<sup>[2]</sup>。因此, 本文提出了直接利用 GPS 伪距、多普勒信息与 DR 的航位信息进行组合的 Kalman 滤波模型, 并分别讨论了在 GPS 卫星数大于或小于 4 的情况下, GPS/DR 组合导航定位的精度。

## 1 GPS/DR 原始观测值组合 Kalman 滤波模型的建立

为了充分利用 GPS 的观测信息, 本文采用的 GPS/DR 组合模型为集中式 Kalman 滤波模型<sup>[2-4]</sup>, 主要包括状态方程与 GPS/DR 观测方程。GPS/DR 观测方程中的观测值包括 GPS 伪距观测值、多普勒观测值、车辆当前的东向速度与北向速度。

### 1.1 状态方程

对于运动的物体, Kalman 滤波模型可以采用常速模型和常加速模型<sup>[4,5]</sup>。本文采用常速模型, 滤波的状态方程为:

$$\mathbf{X}(k) = \boldsymbol{\phi}(k, k-1)\mathbf{X}(k-1) + \boldsymbol{\Gamma}(k, k-1)\boldsymbol{\Omega}_k \quad (1)$$

其状态向量为:

$$\mathbf{X}(k) = [x(k) \quad y(k) \quad z(k) \quad \delta t(k) \quad \dot{x}(k) \quad \dot{y}(k) \quad \dot{z}(k) \quad \dot{\delta t}(k)] \quad (2)$$

式中,  $x(k)$ 、 $y(k)$ 、 $z(k)$ 、 $\delta t(k)$  分别为当前历元的位置与接收机钟的钟差;  $\dot{x}(k)$ 、 $\dot{y}(k)$ 、 $\dot{z}(k)$ 、 $\dot{\delta t}(k)$  分别为当前历元的速度与接收机钟的钟速;  $\boldsymbol{\Omega}(k)$  为动态噪声向量;  $\boldsymbol{\phi}(k, k-1)$  为状态转移矩阵;  $\boldsymbol{\Gamma}(k, k-1)$  为动态噪声矩阵。

### 1.2 观测方程

分别建立 GPS 观测值、DR 观测值与状态向量之间的函数关系, 然后推导集中式 Kalman 滤波的观测方程。

#### 1.2.1 GPS 观测方程

导航型 GPS 接收机的观测值包含 GPS 伪距与多普勒观测值, SA 政策取消以后, 伪距单点定位的精度在 10 m 以内, 多普勒测速的精度可以达到 cm/s 级<sup>[6-9]</sup>。

GPS 伪距与多普勒观测方程:

$$L^i = R^i(t, t - \tau) + c \times [\delta t - \delta t^i] + I^i + T^i + \epsilon \tag{3}$$

$$\dot{L}^i = H^i(S^i - S) + \dot{\delta}t - \dot{\delta}t^i + \dot{I}^i + \dot{T}^i + \xi \tag{4}$$

式中,  $L^i$  为伪距观测值;  $\dot{L}^i$  为多普勒观测值;  $R^i(t, t - \tau)$  为当前历元卫星发射时刻卫星位置到接收机间的距离;  $\delta t$  为接收机钟差;  $\dot{\delta}t$  为接收机钟速;  $\delta t^i$  为卫星钟差;  $\dot{\delta}t^i$  为卫星钟速;  $I^i$  为电离层延迟;  $\dot{I}^i$  为电离层延迟速度;  $T^i$  为对流层延迟;  $\dot{T}^i$  为对流层延迟速度;  $H^i$  为卫星到接收机的方向余弦;  $S^i$  为卫星速度;  $S$  为接收机速度;  $\epsilon$  为伪距观测噪声;  $\xi$  为多普勒观测噪声;  $c$  为光速。本文的数据处理忽略了电离层与对流层的影响。

式(3)线性化后与式(4)组合,可以得到滤波的观测方程:

$$\mathbf{Y}_{K_{\text{gps}}} = \mathbf{H}_{K_{\text{gps}}} \times \mathbf{X}_K + \mathbf{V}_{K_{\text{gps}}} \tag{5}$$

式中,

$$\mathbf{H}_{K_{\text{gps}}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{K_{ca}} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{H}_{K_{dl}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_{K_{ca}} = \mathbf{H}_{K_{dl}} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & -c \\ l_2 & m_2 & n_2 & -c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_m & m_m & n_m & -c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_{K_{\text{gps}}} = \begin{bmatrix} Y_{K_{ca}} \\ Y_{K_{dl}} \end{bmatrix}, Y_{K_{ca}} = L_K - h_{K_{ca}}(X_k^*) +$$

$$H_{K_{ca}} X_k^*, Y_{K_{dl}} = \dot{L}_K - H_{K_{dl}} \times S_K$$

$$h_{K_{ca}}(X_k^*) =$$

$$\sqrt{(x^i - x_k^*)^2 + (y^i - y_k^*)^2 + (z^i - z_k^*)^2} + c\delta t_k^*$$

$X_k^* = X_{k/k-1}$ ;  $(x^i, y^i, z^i)$  为卫星位置;  $(x_k^*, y_k^*, z_k^*)$  为一步预测的状态向量的位置;  $\delta t_k^*$  为一步预测的接收机钟差;  $L_K$  为经过卫星钟差改正后的伪距观测值;  $\dot{L}_K$  为其对应的经过卫星钟速改正后的多普勒观测值;  $(l, m, n)$  为卫星到接收机的方向余弦。

### 1.2.2 DR 观测方程

由于 GPS/DR 组合滤波中状态向量处于

$$\mathbf{Y}_{K_{\text{dr}}} = \begin{bmatrix} \Delta S \times \sin\theta \\ \Delta S \times \cos\theta \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{K_{\text{dr}}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\lambda \times \Delta t & \cos\lambda \times \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\phi \cos\lambda \times \Delta t & -\sin\phi \sin\lambda \times \Delta t & \cos\phi \times \Delta t & 0 \end{bmatrix}$$

由以上对 GPS/DR 滤波观测方程的建立可知,当采用集中式滤波模型时,由式(5)与式(9)可得集中式滤波的观测方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{K_{\text{gps}}} \\ \mathbf{Y}_{K_{\text{dr}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{K_{\text{gps}}} \\ \mathbf{H}_{K_{\text{dr}}} \end{bmatrix} \times \mathbf{X}_K + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{K_{\text{gps}}} \\ \mathbf{V}_{\text{dr}}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

由式(10)可知,即使 GPS 卫星观测数为 2 时,  $\mathbf{Y}_{K_{\text{gps}}}$  为 4 维观测向量,结合 DR 的 2 维观测向量  $\mathbf{Y}_{K_{\text{dr}}}$ ,此时式(10)满足滤波的可观测性条件,可

WGS-84 坐标系下,而 DR 系统推算是在当地水平坐标系下进行,因此,必须对两个坐标系统进行转换。对于 GPS/DR 组合导航,设当地水平坐标系的原点与陀螺安装的位置一致,WGS-84 参考椭球的子午圈方向、卯酉圈方向和法线方向为当地水平坐标系的 3 个坐标轴方向,当法线方向指向天顶的时候,当地水平坐标系也称为东北天坐标系。本文采用东北天坐标系作为 DR 系统航位推算的坐标系,它和 WGS-84 坐标之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = \mathbf{R}_e^l \times \begin{bmatrix} X_Q - X_P \\ Y_Q - Y_P \\ Z_Q - Z_P \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中,  $(N, E, U)$  为东北天坐标系的坐标;  $(X_Q, Y_Q, Z_Q)$  为地面点在 WGS-84 坐标系下的坐标;  $(X_P, Y_P, Z_P)$  为东北天坐标系原点在 WGS-84 坐标系下的坐标。

$$\mathbf{R}_e^l = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\phi \cos\lambda & -\sin\phi \sin\lambda & \cos\phi \\ \cos\phi \cos\lambda & \cos\phi \sin\lambda & \sin\phi \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中,  $\lambda, \phi$  分别为大地经度与大地纬度<sup>[10-12]</sup>。

由 DR 航位推算系统的原理可知,DR 系统获得的是里程信息与角度变化信息,在短时间(如 1 s)内,可以认为车辆的方位角不变(不考虑车辆拐弯的情况),  $P(t), P(t + \Delta t)$  是相邻两个历元的位置点,  $\Delta t$  的值等于 GPS 采样时间间隔,  $\Delta S$  为  $\Delta t$  时间内里程计给出的距离值,  $\Delta E, \Delta N$  为  $\Delta t$  时间内车辆在东方向与北方向距离的变化值,  $\theta$  为陀螺仪获得的方位角。可以建立如下关系式:

$$\begin{bmatrix} \Delta S \times \sin\theta \\ \Delta S \times \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta U \end{bmatrix} + \mathbf{V}_{\text{dr}} \tag{8}$$

式(8)简化为:

$$\mathbf{Y}_{K_{\text{dr}}} = \mathbf{H}_{K_{\text{dr}}} \mathbf{X}_K + \mathbf{V}_{\text{dr}} \tag{9}$$

式中,

以实现 Kalman 滤波导航定位解算。

## 2 实验结果分析

实验车上的 DR 部分由 1 个陀螺仪与里程计组成,陀螺仪漂移为 3 °/h,里程计一个脉冲等效距离为 0.4 m。车上另有一台 JAVAD GPS 接收机,且与陀螺、里程计时间对准。GPS 数据采样

率为 1 s,DR 数据采样率为 0.05 s,其轨迹如图 1 所示。观测前 700 历元与 1 000~1 600 历元车辆静止,DR 的初始信息由 GPS 提供。Kalman 滤波的过程噪声设置为 40 m,GPS 观测噪声设置为 10 m,DR 观测噪声设置为 2 m。为了分析 DR 航位推算精度,实际数据处理过程中,当 GPS 获得的速度大于 5 m/s 时,此历元(本文实验的数据为第 760 个历元)GPS 获得的位置与方位角即认为是 DR 的初始位置与初始方位角,然后由 DR 直

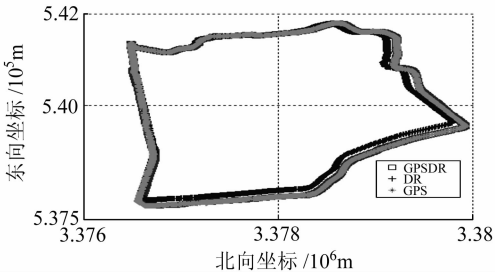


图 1 车辆轨迹图  
Fig. 1 Car Trajectory

接推算,其结果与 GPS 单点定位滤波结果(无 DR 观测信息且观测卫星数大于 4)的差值如图 2 所示。为了分析 GPS 原始观测信息对 DR 航位推算精度的影响,GPS 观测的前 1 200 个历元数据与 DR 数据组合滤波,GPS 数据 1 200 历元以后的数据分别取 2 颗与 3 颗卫星,然后与 DR 数据组合滤波。其滤波结果与单点定位滤波结果(无 DR 观测信息且观测卫星数大于 4)差值如图 3、图 4 所示。

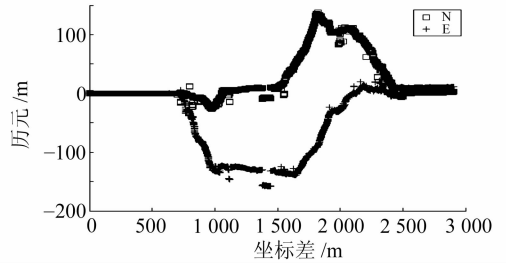


图 2 DR 与 GPS SPP 差值  
Fig. 2 Difference Between DR and SPP

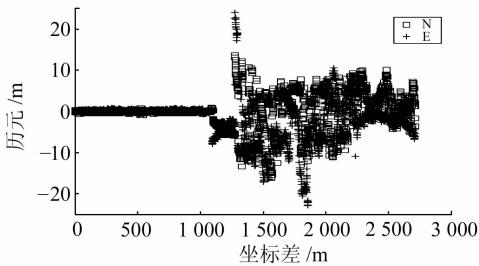


图 3 3 颗卫星 DR 组合与 GPS SPP 差值  
Fig. 3 Difference Between Three Satellites Integrated DR and SPP

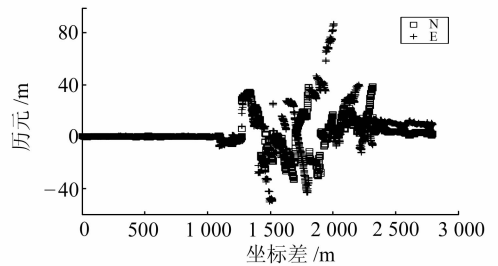


图 4 2 颗卫星 DR 组合与 GPS SPP 差值  
Fig. 4 Difference Between Two Satellites Integrated DR and SPP

本文的单点定位滤波的位置精度在 10 m 范围内,速度精度为 cm/s 级,这个精度已经满足一般车辆导航定位要求,因此,以它解算的结果作为参考值。本文实验数据中的 GPS 观测卫星数都大于 4,为了分析 GPS 卫星观测数小于 4 的情况,人为提取其中的 2 颗或 3 颗观测卫星。由图 2 可以看出,由于陀螺与加速度计存在系统误差,随着时间的增加,推算的位置误差增大。由于文中的车辆轨迹是一个闭合路线,当车辆行驶方向相反时,由陀螺系统误差引起的位置误差会向相反方向累加,因此,DR 航位推算的结果会出现闭合的情况。由图 3 与图 4 可以看出,当 GPS 观测卫星数大于 4 时(1~1 200 历元),GPS/DR 组合定位的精度与单点定位滤波的精度相当,其主要原因是 DR 获得的速度精度并不优于 GPS 多普勒测速获得的速度精度。因此,当卫星数大于 4 时,

GPS/DR 组合并不能提高 GPS 的定位精度,但两者都明显高于 DR 推算的精度。当 GPS 观测卫星少于 4 颗时(人为选取其中的 2 颗或 3 颗卫星),利用 GPS 的原始观测信息与 DR 组合定位可以有效抑制 DR 航位推算的误差积累,且 GPS 观测卫星数为 3 时组合定位精度优于 GPS 观测卫星数为 2 时的组合定位精度,其原因主要是由于 3 颗卫星形成的几何强度比 2 颗卫星的要好,而且 GPS 的观测值精度比 DR 航位推算精度要高。

### 3 结 语

本文提出了基于原始观测值的 GPS/DR 组合导航定位的 Kalman 滤波模型,用该模型对实际采集数据进行处理,结果表明:当卫星数大于 4

时, GPS/DR 组合定位的结果与 GPS 单点定位滤波结果相当, 但两者都明显优于 DR 航位推算的结果; 当 GPS 观测卫星数小于 4 时, 利用 GPS 的原始观测信息可以提高 DR 航位推算的精度, 抑制其误差积累, 且 GPS 观测卫星数为 3 时组合定位的精度优于 GPS 观测卫星数为 2 时组合定位的精度。

### 参 考 文 献

- [1] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001
- [2] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京: 测绘出版社, 2006
- [3] Grewal M S. Kalman Filtering: Theory and Practice [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001
- [4] 万德钧, 房建成, 王庆. GPS 动态滤波的理论、方法及其应用[M]. 南京: 江苏科技出版社, 2002
- [5] 卡普兰·赫加蒂, 寇艳红. GPS 原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007
- [6] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [7] Misra P. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance [M]. Lincoln, M A: Ganga-Jamuna Press, 2001
- [8] Serrano L, Kim D, Langley R B. A Single GPS Receiver as a Real-Time, Accurate Velocity and Acceleration Sensor [C]. ION NTM 2004, San Diego, CA, 2004
- [9] Zhang J, Zhang Kefei, Grenfell R, et al. Short Note: On the Relativistic Doppler Effect for Precise Velocity Determination Using GPS [J]. Journal of Geodesy, 2006, 80(2): 104-110
- [10] 孙红星. 差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004
- [11] Gebre-Egziabher D. Design and Performance Analysis of a Low-Cost Aided Dead Reckoning Navigation [D]. Palo Alto, California: Stanford University, 2004
- [12] Grewal M S. Global Positioning Systems Inertial Navigation and Integration [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2007

第一作者简介: 于兴旺, 博士生, 研究方向为 GNSS 多频多系统高精度组合导航定位。

E-mail: xwy027@126.com

## GPS /DR Original Observation Integrated Navigation and Positioning

YU Xingwang<sup>1</sup> ZHANG Xiaohong<sup>1</sup> LIU Jinnan<sup>2</sup> ZHAO Ying<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Based on the navigation theory of GPS/DR integrated system, a Kalman filtering model, which integrates the GPS original observation and dead-reckoning information, was presented. Then, we used it to deal with the GPS/DR original data. Experimental results indicate that even only two GPS satellites in view, the GPS observation can be used by this filtering model to improve the positioning precision of dead-reckoning system.

**Key words:** GPS/DR integrated; original observation; Kalman filtering

**About the first author:** YU Xingwang, Ph. D candidate, majors in GNSS multi-frequency multi-system high precision integrated navigation and positioning.

E-mail: xwy027@126.com