

文章编号:1671-8860(2009)02-0236-04

文献标志码:A

GPS/DR 原始观测值组合导航定位研究

于兴旺¹ 张小红¹ 刘经南² 赵莹¹

(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

中图法分类号: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^[1]。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^[2]。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卫星数大于或少于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^[2-4],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^[4,5]。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:

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

式中, $x(k)$ 、 $y(k)$ 、 $z(k)$ 、 $\dot{\delta t}(k)$ 分别为当前历元的位置与接收机钟的钟差; $\dot{x}(k)$ 、 $\dot{y}(k)$ 、 $\dot{z}(k)$ 、 $\dot{\dot{\delta t}}(k)$ 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^[6-9]。

GPS 伪距与多普勒观测方程:

收稿日期:2008-12-07。

项目来源:国家863计划资助项目(2006AA12Z325);武汉市晨光计划资助项目(200850731375);国家创新研究群体科学基金资助项目(40721001)。

$$L^i = R^i(t, t - \tau) + c \times [\delta t - \delta t'] + I^i + T^i + \epsilon \quad (3)$$

$$\dot{L}^i = H^i(S^i - S) + \dot{\delta}t - \dot{\delta}t' + \dot{I}^i + \dot{T}^i + \xi \quad (4)$$

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; δt 为接收机钟差; $\dot{\delta}t$ 为接收机钟速; $\delta t'$ 为卫星钟差; $\dot{\delta}t'$ 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; ϵ 为伪距观测噪声; ξ 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:

$$\mathbf{Y}_{K\text{gps}} = \mathbf{H}_{K\text{gps}} \times \mathbf{X}_K + \mathbf{V}_{K\text{gps}} \quad (5)$$

式中,

$$\mathbf{H}_{K\text{gps}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{Kca} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{H}_{Kd} \end{bmatrix}$$

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

$$\mathbf{Y}_{K\text{gps}} = \begin{bmatrix} Y_{Kca} \\ Y_{Kd} \end{bmatrix}, Y_{Kca} = L_K - h_{Kca}(X_K^*) +$$

$$H_{Kca} X_k^*, Y_{Kd} = \dot{L}_K - H_{Kd} \times S_K$$

$$h_{Kca}(X_k^*) =$$

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

$X_k^* = X_{k/k-1}$; (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; δt_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

$$\mathbf{Y}_{K\text{dr}} = \begin{bmatrix} \Delta S \times \sin\theta \\ \Delta S \times \cos\theta \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{K\text{dr}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{K\text{gps}} \\ \mathbf{Y}_{K\text{dr}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{K\text{gps}} \\ \mathbf{H}_{K\text{dr}} \end{bmatrix} \times \mathbf{X}_K + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{K\text{gps}} \\ \mathbf{V}_{K\text{dr}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

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:

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

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。

$$\mathbf{R}_e^L = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ \cos\phi\cos\lambda & \cos\phi\sin\lambda & \sin\phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, λ, ϕ 分别为大地经度与大地纬度^[10-12]。

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, Δt 的值等于 GPS 采样时间间隔, ΔS 为 Δt 时间内里程计给出的距离值, $\Delta E, \Delta N$ 为 Δt 时间内车辆在东方向与北方向距离的变化值, θ 为陀螺仪获得的方位角。可以建立如下关系式:

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

式(8)简化为:

$$\mathbf{Y}_{K\text{dr}} = \mathbf{H}_{K\text{dr}} \mathbf{X}_K + \mathbf{V}_{\text{dr}} \quad (9)$$

式中,

$$\begin{bmatrix} -\sin\lambda \times \Delta t & \cos\lambda \times \Delta t & 0 & 0 \\ -\sin\phi\cos\lambda \times \Delta t & -\sin\phi\sin\lambda \times \Delta t & \cos\phi \times \Delta t & 0 \end{bmatrix}$$

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历程与1 000~1 600历程车辆静止,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,此历程(本文实验的数据为第760个历程)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

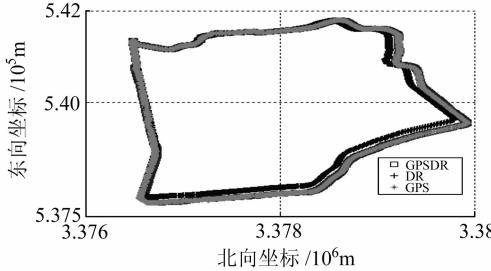


图1 车辆轨迹图

Fig. 1 Car Trajectory

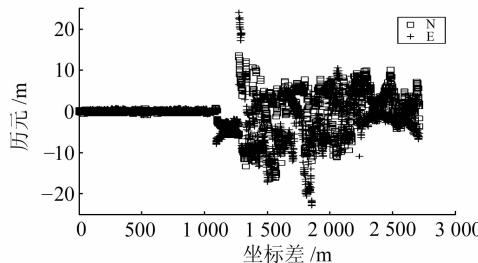


图3 3颗卫星DR组合与GPS SPP差值

Fig. 3 Difference Between Three 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历程),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,

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个历程数据与DR数据组合滤波,GPS数据1 200历程以后的数据分别取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。

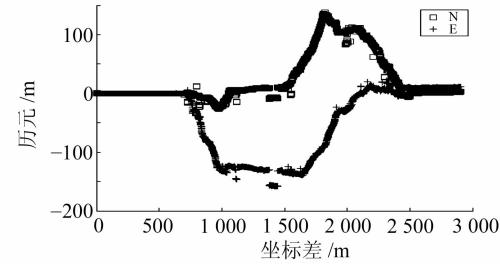


图2 DR与GPS SPP差值

Fig. 2 Difference Between DR and SPP

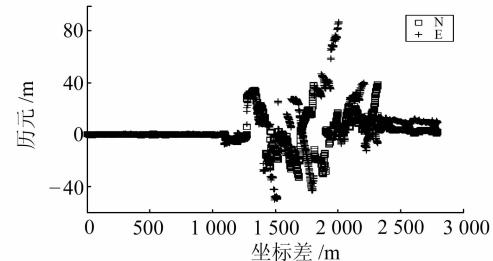


图4 2颗卫星DR组合与GPS SPP差值

Fig. 4 Difference Between Two Satellites Integrated DR and SPP

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, Meas-
- urements, 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 Xingwang¹ ZHANG Xiaohong¹ LIU Jinnan² ZHAO Ying¹

(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