

文章编号: 1672-2892(2012)04-0401-05

GPS/DR 组合导航性能增强技术

湛 雷, 战兴群, 秦 峰, 张炎华

(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘 要: 为了提高全球定位系统(GPS)信号短时中断时地面车辆自主导航精确度, 提出了 GPS 信号中断时采用车辆不完全约束条件和里程仪速度信息作为量测, 辅助惯性导航系统实现车辆航位推算(DR)自主导航的方案; 推导了该方案的 GPS/DR 组合导航的卡尔曼滤波方程; 并进行了计算机仿真研究和地面车载试验, 结果显示 GPS 信号中断 90 s, DR 自主导航误差为 20 m, 能够满足部分地面车辆短时高精度自主定位要求。

关键词: 车辆航位推算; 里程仪; 惯性导航系统; 组合导航; 全球定位系统; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN911.72; V249.3

文献标识码: A

Performance improvement of GPS/DR integrated navigation system

ZHAN Lei, ZHAN Xin-qun, QIN Feng, ZHANG Yan-hua

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To improve the performance of autonomous vehicle navigation system, this paper proposes a car Global Positioning System/Dead Reckoning(GPS/DR) integrated navigation system utilizing car non-holonomic constraints and odometer speed information to assist strap-down Inertial Navigation System (INS) when GPS signal is blocked. The Kalman filtering dynamic model for the proposed car GPS/DR integrated navigation system is deduced. The simulation on computer and car experiment are performed to verify the proposed method. The results show that proposed method provides high position accuracy, meeting the requirement of some vehicle autonomous navigation. When GPS signal is blocked for 90 s, the maximized position error is 20 m in the turn and straight line area.

Key words: Dead Reckoning; odometer; Inertial Navigation System; integrated navigation; Global Positioning System; Kalman filter

由于全球定位系统(GPS)定位精确度高, 其在车辆定位导航中应用日趋广泛, 但当受到外界环境的干扰, 尤其是在高楼林立的城市, GPS 信号将很差甚至中断而无法定位。要得到连续可靠的定位信息, 就需要其他的辅助手段。车辆航位推算(DR)是一种自主式的车辆导航系统, 它根据车辆的初始位置和方位、速度传感器获得的车辆运行方向和距离, 推算车辆的当前位置。航位推算在短时间内能够保持较高的精确度, 但它仅能确定相对位置, 且所有传感器的误差均会造成位置误差的积累, 因此不能长时间使用。GPS 和 DR 存在很强的互补关系。一方面, GPS 提供的绝对位置信息可以为 DR 提供推算定位的初始值并进行误差校正; 另一方面, DR 的推算结果可用于补偿部分 GPS 定位中的随机误差, 从而平滑定位轨迹^[1]。经典的 GPS/DR 组合方法是用卡尔曼滤波将 GPS 与 DR 数据进行融合, 其 DR 导航系统有 2 种组成方式: 一种是由单轴速率陀螺和车辆里程仪信号组成^[2], 当 GPS 信号中断时, 该 DR 系统导航误差快速累积, 迅速发散, 精确度较低, 无法满足地面车辆短时高精度自主导航的要求; 另一种是由惯性测量单元(Inertial Measurement Units, IMU)和车辆里程仪(odometer)组成, 里程仪速度信息作为车辆载体坐标系(b 系)前向速度量测, 没有侧向和垂向速度约束。本文研究利用低成本 IMU 器件, 实现 GPS 信号中断时, 高精度的 DR 自主导航。为了提高 DR 自主导航精确度, 采用惯性测量单元(IMU)和车辆里程仪(odometer)信号组成 DR 导航系统, 在 GPS 信号中断时, 将里程仪速度信息作为车辆载体坐标系(b 系)前向速度量测; 同时利用车辆行驶不完全约束条件, 给出 b 系的侧向速度和垂向速度量测; 综合 b 系的速度量测, 辅助惯性导航系统(INS), 实现短时高精度 DR 自主导航。

1 GPS/DR 组合导航系统的数学模型

1.1 GPS/DR 组合导航系统算法流程图

GPS/DR 组合导航系统算法主要由捷联惯导解算和卡尔曼滤波算法组成。GPS 信号正常时, 由 GPS 辅助 INS, 实现 GPS/INS 组合导航; GPS 信号中断时, 由车辆里程仪速度信号和不完全约束条件组成量测, 辅助 INS, 实现 DR 自主导航^[3], 算法流程见图 1。图中, G_x, G_y, G_z 分别表示 x, y, z 方向上的陀螺测量值; A_x, A_y, A_z 分别表示 x, y, z 方向上的加速度计测量值。

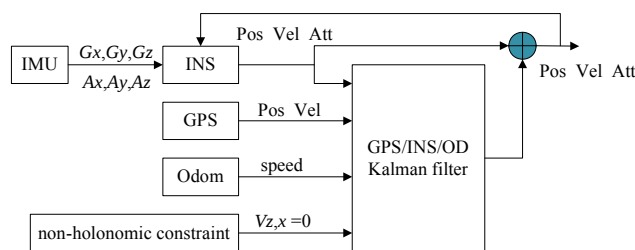


Fig.1 GPS/DR integration navigation algorithm diagram
图 1 GPS/DR 组合导航算法流程图

1.2 GPS/DR 组合导航系统状态方程

系统状态方程如下:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{W}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = [\varphi_e, \varphi_n, \varphi_u, \delta V_e, \delta V_n, \delta V_u, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]^T \quad (2)$$

式中: 状态变量 $\mathbf{X}$ 共 15 维; $\varphi_e, \varphi_n, \varphi_u$ 表示东北天方向的平台失准角; $\delta V_e, \delta V_n, \delta V_u$ 表示东北天方向的速度误差; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 分别表示经度、纬度和高度位置误差; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 表示沿载体系 (b 系) x, y, z 轴上的陀螺漂移^[4]; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 表示沿载体系 (b 系) x, y, z 轴上的加速度计零偏; 系统噪声 $\mathbf{W}(t)$ 为:

$$\mathbf{W}(t) = [\omega_x, \omega_y, \omega_z, a_x, a_y, a_z]^T \quad (3)$$

式中: $a_x, a_y, a_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别为加速度计和陀螺在载体坐标系 (b 系) 下的噪声, 假设是均值为 0、呈正态分布的白噪声。 $\mathbf{A}$ 为 15×15 维矩阵^[5]:

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{3 \times 3} & \mathbf{F}''_{3 \times 3} & \mathbf{E}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 6} \\ \mathbf{F}'_{3 \times 3} & \mathbf{F}'''_{3 \times 3} & \mathbf{E}'_{3 \times 3} & \mathbf{T}'_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{F}'_{3 \times 3} & \mathbf{E}''_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 3} & \mathbf{0}_{6 \times 3} & \mathbf{0}_{6 \times 3} & \mathbf{E}'''_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{E}$ 表示系数转换矩阵; $\mathbf{T}$ 表示旋转矩阵。

$\mathbf{B}$ 为 15×6 维矩阵:

$$\mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{9 \times 3} & \mathbf{0}_{9 \times 3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{C}_b^n$ 表示 b 到 n 坐标系的转换矩阵。

1.3 GPS/INS 组合导航系统量测方程

系统的量测方程如下:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (6)$$

式中外部量测量 $\mathbf{Z}$ 为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} V_{ie} - V_{ge} \\ V_{in} - V_{gn} \\ \lambda_i - \lambda_g \\ L_i - L_g \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $V_{ie}, V_{in}, \lambda_i, L_i$ 表示惯性导航系统 (INS) 解算出的东北向速度和经纬度; $V_{ge}, V_{gn}, \lambda_g, L_g$ 表示 GPS 给出的东北向速度和经纬度^[6]。量测矩阵为:

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{vel}(t) \\ \mathbf{H}_{pos}(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

量测噪声为:

$$\mathbf{w}(t) = \begin{bmatrix} w_{vel}(t) \\ w_{pos}(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $w_{\text{vel}}(t)$ 为速度观测噪声; $w_{\text{pos}}(t)$ 为位置观测噪声;

$$\mathbf{H}_{\text{vel}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 15} \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_{\text{pos}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 15} \quad (11)$$

1.4 DR(INS/OD)系统量测方程

DR 导航由 INS/OD 组合实现, 车辆里程仪提供的速度信息以及不完全约束条件共同组成系统量测信息, 辅助 INS 系统实现 GPS 信号中断情况下的高精度自主导航。

GPS 信号中断时, 依据车辆行驶不完全约束条件, 认为车辆侧向速度(V_x)和垂向速度(V_z)为 $0^{[7-8]}$; 里程仪提供车辆前向速度 V_{od} ; 则不完全约束和里程仪速度共同组成量测量 $[0, V_{\text{od}}, 0]^T$, 量测方程为^[9-10]:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \delta V_x^b \\ \delta V_y^b \\ \delta V_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\text{INS}x}^b - 0 \\ V_{\text{INS}y}^b - V_{\text{od}} \\ V_{\text{INS}z}^b - 0 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \gamma \quad (12)$$

式中: $V_{\text{INS}x}^b, V_{\text{INS}y}^b$ 和 $V_{\text{INS}z}^b$ 为载体在 INS 坐标系下的 x, y 和 z 坐标值; 量测噪声 γ 是零均值的白噪声; 量测矩阵 $\mathbf{H}$ 为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} V^u C_n^b(1,2) - V^n C_n^b(1,3) & -V^u C_n^b(1,1) + V^e C_n^b(1,3) & V^n C_n^b(1,1) - V^e C_n^b(1,2) & C_n^b(1,1) & C_n^b(1,2) & C_n^b(1,3) & 0_{1 \times 9} \\ V^u C_n^b(2,2) - V^n C_n^b(2,3) & -V^u C_n^b(2,1) + V^e C_n^b(2,3) & V^n C_n^b(2,1) - V^e C_n^b(2,2) & C_n^b(2,1) & C_n^b(2,2) & C_n^b(2,3) & 0_{1 \times 9} \\ V^u C_n^b(3,2) - V^n C_n^b(3,3) & -V^u C_n^b(3,1) + V^e C_n^b(3,3) & V^n C_n^b(3,1) - V^e C_n^b(3,2) & C_n^b(3,1) & C_n^b(3,2) & C_n^b(3,3) & 0_{1 \times 9} \end{bmatrix}_{3 \times 15} \quad (13)$$

式中 V^u, V^n 和 V^e 分别为天向、北向和东向速度。

2 GPS/DR 组合导航系统仿真研究

仿真过程以上述算法为基础, 车辆运动参数设置如下: 车辆沿 S 型路线行驶, 车辆前向速度为 10 m/s, 航偏角幅度为 30° , 摇摆周期为 200 s。惯性参数设置如下: 初始纬度为 30.00° ; 初始经度为 120.00° ; 陀螺零位漂移为 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 50^\circ/\text{h}$; 加速度计零位偏差为 $\nabla_x = \nabla_y = \nabla_z = 2 \times 10^{-4} g$; 地球重力加速度为 $g = 9.780\ 50\ \text{m/s}^2$; 地球自转角速率为 $\omega_{\text{ie}} = 7.272\ 20 \times 10^{-4}\ \text{rad/s}$ 。

仿真时间设置为 30 min, 人为设置 3 次 GPS 信号中断, 每次 GPS 信号中断持续 60 s。其余 GPS 信号正常时, 利用 GPS 输出的速度信息和位置信息每隔 1 s 对惯性导航系统进行一次校正, 仿真结果见图 2 和图 3; 从图 2 可知,

当 GPS 信号中断时, 用车载里程仪速度信息和不完全约束条件作为量测, 辅助惯性导航系统实现较高精度的 DR 自主导航, 60 s 内其东向位置误差低于 8 m, 北向位置误差低于 10 m; 从图 3 可知, 当载体近似直线运动时, 其位置误差较小; 当载体以较大角度转向时, 其位置误差较大, 总体来看 DR 自主导航运动轨迹与真实运动轨迹相近, 能够满足大多数地面车辆短时间内较高精度自主导航的要求。

3 车载试验结果

地面车载试验在上海市紫竹科技园区内进行, 使用依维柯汽车作为运动载体, 连续行驶约 50 min, 行驶速度约 40 km/h, 汽车行驶过程中实时采集汽车里程仪速度信息、IMU(3D Gyro and Acc)信息和 GPS 数据, 进行事后数据处理, 处理结果见图 4~图 7。

图 4 中汽车搭载 IMU、GPS 和 Odometer 数据采集设备从起点 A 出发, 连续行驶至终点 O 结束; 行驶路径为 A(Start)→B→C→D→J→I→M→E→F→G→H→M→I→J→O(End)。图 4 中绿线部分表示 GPS 独立导航和 INS 初始对准阶段; 蓝线部分表示 GPS/DR 组合导航阶段; 红线部分表示 GPS 信号中断(60 s~90 s), DR 自主导航阶段。

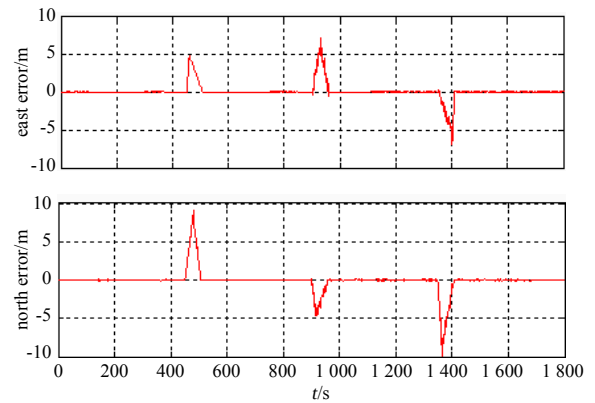


Fig.2 Position error

图2 位置误差

图5给出了汽车由I点逆时针行驶至J点, GPS信号中断90 s的DR自主导航轨迹与真实轨迹(CORS差分GPS)对比图,由图可知拐角处定位误差较直线段定位误差大,DR自主导航结果与真实轨迹相近。图5中蓝色为精确路径,红色为里程表辅助的DR路径。

图6给出了汽车行驶路径的GPS定位结果的地图显示,图中细直线段为GPS信号中断阶段,中断阶段的DR自主导航定位结果在图7中以细线段表示。由图7可知GPS信号中断阶段,DR定位结果与汽车实际行驶路径基本一致,定位结果显示汽车在路面上正常行驶,没有驶离路面,定位精确度满足实际需求。

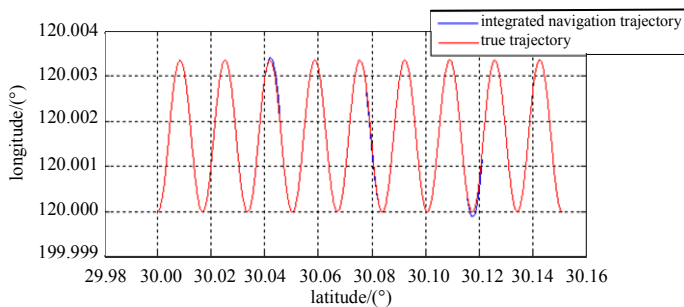


Fig.3 Position curves

图3 定位结果

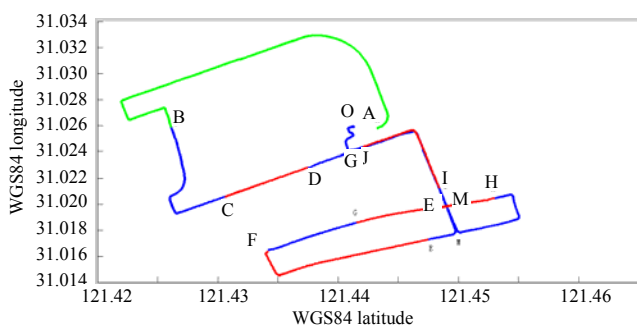


Fig.4 Car driving trajectory

图4 汽车行驶轨迹图

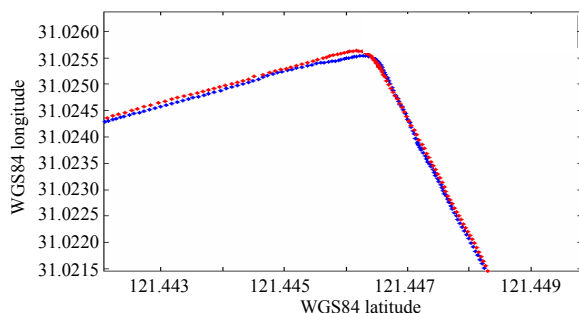


Fig.5 Position curves in the turning area

图5 转角处定位结果对比图



Fig.6 GPS position curves in the map

图6 地图显示GPS定位结果图



Fig.7 GPS/DR position curves in the map

图7 地图显示GPS/DR组合导航定位结果图

4 结论

本文研究了基于Kalman filter的车载GPS/DR组合导航理论,采用INS与Odometer组成DR自主导航系统,提出了GPS信号中断时以车辆里程仪速度信息和不完全约束条件作为量测,辅助INS实现DR自主导航方案;研究并给出了GPS/DR组合导航系统的状态方程和量测方程;计算机仿真结果显示GPS信号中断60 s,DR自主导航水平定位误差低于15 m;车载试验数据处理结果显示GPS信号短时中断(60 s~90 s),DR自主导航水平定位精确度较高,定位误差低于20 m,能够满足部分地面车辆短时高精度自主导航要求。

参考文献:

- [1] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (XIE Gang. Principle and Design of GPS receiver[M]. Beijing:Electronic and Industry Press, 2009.)
- [2] 刘勇,赵红庆,寇烈,等. 捷联惯导系统/GPS/里程仪组合导航的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006,26(2):47-56. (LIU Yong, ZHAO Hongqing,KOU Lie,et al. A study on SINS/GPS/OD combined navigation system[J]. Journal of Missile and Guidance, 2006,26(2):47-56.)

- [3] Sun Haipeng, Niu Xiaoji, Tang Rui, et al. Improve the performance of low cost GPS/INS system by using 5D IMU[C]// CPGPS 2010 Navigation and Location Services: Emerging Industry and International Exchanges. Shanghai: [s.n.], 2010: 598–604.
- [4] 董绪荣, 张守信, 华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998. (DONG Xurong, ZHANG Shouxing, HUA zhongchun. Principle and application of GPS/INS integrated navigation[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998.)
- [5] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (QIN Yongyuan. Inertial Navigation[M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [6] 秦永元, 张洪铁, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998. (QIN Yongyuan, ZHANG Hongtie, WANG Shuhua. Kalman filter and Integrated Navigation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998.)
- [7] 刘志俭, 胡小平, 贺汉根. GPS 定姿系统/捷联惯性导航系统组合技术研究[J]. 航天控制, 2003(1): 27–31. (LIU Zhijian, HU Xiaoping, HE Hangan. Research on SINS/GPS attitude determination system[J]. Journal of Aerospace Control, 2003(1): 27–31.)
- [8] 张博, 杨春, 解楠. GPS C/A 码平均相关捕获算法的 FPGA 设计[J]. 信息与电子工程, 2009, 7(1): 1–3. (ZHANG Bo, YANG Chun, XIE Lan. FPGA design of averaging correlation for GPS C/A code acquisition[J]. Information and Electronics Engineering, 2009, 7(1): 1–3.)
- [9] Niu Xiaoji, Han Shaowei. Improving the performance of portable navigation devices by using partial IMU based GPS/INS integration technology[C]// Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008). Savannah, GA: [s.n.], 2008: 2130–2136.
- [10] 祝刚, 魏可惠. 基于预测滤波的航天器 GPS 定位实时性处理方法[J]. 信息与电子工程, 2006, 4(1): 41–44. (ZHU Gang, WEI Kehui. Real time processing method in GPS positioning of spacecraft based on the predictive filter[J]. Information and Electronic Engineering, 2006, 4(1): 41–44.)

作者简介:



湛 雷(1983–), 男, 湖北省孝感市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为 GNSS 接收机及 GNSS/INS 组合导航. email: zhanlei_1983@sina.com.

战兴群(1970–), 男, 哈尔滨市人, 教授, 主要研究方向为卫星导航与组合导航.

秦 峰(1986–), 男, 安徽省芜湖市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为 GNSS/INS 超紧组合导航.

张炎华(1935–), 男, 上海市人, 教授, 主要研究方向为惯性导航与组合导航.

(上接第 400 页)

- [7] Kschischang F R, Frey B J, Loeliger H A. Factor graphs and the sum-product algorithm[J]. IEEE Trans. on Inform. Theory, 2001, 47(2): 520–548.
- [8] Sarvotham S, Baron D, Baraniuk R G. Compressed sensing reconstruction via belief propagation[R]. Technical Report ECE-0601, 2006.

作者简介:



汪振兴(1986–), 男, 山东省聊城市人, 在读硕士研究生, 研究方向为压缩感知与认知无线电. email: xing.fleissig@gmail.com.

杨 涛(1970–), 男, 陕西省汉中市人, 副教授, 主要从事宽带无线通信理论、认知无线电理论及信号处理的研究.