

基于降阶组合定位系统的矿井人员定位算法^{*}

罗宇锋 杨益龙

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 针对目前的由无线 Wi-Fi 定位系统与捷联惯导系统构成的组合定位系统复杂度高且工程实现较困难的问题,提出一种新的降阶微惯性测量装置(MIMU)及其降阶误差模型,并与 Wi-Fi 构成降阶的 10 维状态变量的组合定位系统。通过采用 1 个低精度微陀螺仪和 2 个低精度微加速度计作为惯性传感器设计简易 MIMU 的安装结构,将其与 Wi-Fi 定位系统组合,并用降阶卡尔曼滤波技术设计组合定位算法。仿真实验结果表明,该降阶组合定位系统定位响应速度快,定位精度高,在工程上也易于实现,适用于井下人员定位。

关键词: 人员定位; Wi-Fi; 微惯性测量装置; 降阶组合系统; 卡尔曼滤波

中图分类号: TD676 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Mine personnel position algorithm based on reduced-order integrated positioning system

Luo Yufeng Yang Yilong

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Focused on the issue that the integrated position system was made of Wi-Fi positioning system and strap-down inertial navigation system was very complex and difficult to implement in engineering, a new reduced-order ten d state variables integrated positioning system of a simple micro inertial measurement unit(MIMU) which was composed of the low precision micro inertial sensors and Wi-Fi was proposed. The simple installation structure of MIMU was designed by one low precision micro gyroscope and two low precision micro accelerometer inertial sensor pieces, then it was combined with Wi-Fi location system and Kalman filtering technology was applied to integrated navigation positioning algorithm. The simulation results show that the proposed reduced-order integrated positioning system positioning calculation dimension reduction reduces computational complexity and makes it easy to complement in engineering, meanwhile effectively improves the downhole positioning accuracy, which can be effectively applied to the underground personnel positioning problem.

Keywords: mine positioning; Wi-Fi; micro inertial measurement unit; reduced-order integrated positioning system; Kalman filter

1 引言

随着煤矿行业的高速发展^[1],煤矿安全问题越来越受到重视,如何在矿难发生后及时准确的进行救援工作,煤矿井下人员定位^[2]系统是亟待解决的安全问题之一。由于井下环境的复杂性,现有的无线定位技术普遍存在全局定位精度不高、实时性差、定位不具备连续性而且存在定位盲区等缺点,文献[3-7]中 Wi-Fi(wireless fidelity)具有带宽、无线电波覆盖范围广、传输速度快、易组网、成本低、兼容性好等优点,但其缺点也同样明显,用 Wi-Fi 进行井下人员定位并不能得到精确、实时连续的人员位置信息。文献[8]中捷

联惯性导航定位系统因其定位不需要依赖任何外界信息、隐蔽性好、抗辐射强、能够进行连续的三维空间定位等优点而广受关注,但缺点是定位误差会随着时间积累,长时间工作后会产生很大的定位误差以至于发散。其中 MIMU 是由微机电系统(MEMS)中的低精度微陀螺仪和低精度微加速度计^[9]组成的一种微型捷联惯性导航定位系统^[10]。文献[11]提出将 Wi-Fi 定位与 MIMU 定位进行组合,利用 Wi-Fi 提供的局部高精度位置信息作为外部量测输入,在人员运动过程中给定 MIMU 的位置初值并频繁校正 MIMU 的位置误差,以抑制其误差随时间的积累发散,从而有效地实现精确、连续、可靠的导航定位;但是其缺点也

收稿日期:2015-10

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61440007)、河南理工大学博士基金(B2010-44)资助项目

同样不可忽视:以 MIMU 完整的 18 维状态变量误差模型进行导航定位解算,会增加系统复杂度,且定位计算速度致使工程上难以实现,从而无法及时掌握井下人员位置信息。

为此本文提出一种新的由降阶 MIMU 与 Wi-Fi 构成降阶的 10 维状态变量的 MIMU/Wi-Fi 组合定位系统,并给出 MIMU 的降阶误差模型。该 MIMU 由 1 个低精度单自由度微陀螺仪和 2 个低精度单自由度微加速度计组成,忽略天向与载体运动方向垂直的角速度以及天向加速度。其优点是在不影响定位精度的前提下降低了系统复杂度,使结构更容易实现,并且降低了系统成本。再用降阶卡尔曼滤波算法实现两者的信息结合^[12]。通过仿真实验,验证了该 MIMU/Wi-Fi 降阶组合定位系统的优越性,能有效地解决井下人员定位问题。

2 井下组合定位系统的结构设计

传统 MIMU 系统由 3 个方向上 3 个单自由度微陀螺仪和 3 个单自由度微加速度计组成并按要求组合成一个硬件整体^[13-14],分别测量 3 个正交方向上的角速度和加速度,再配备导航计算机和相应的导航解算软件即可实现导航定位。基于井下巷道纵横数千米的特点,可以认为人员在井下同一层面行走过程中是平坦的而且人员的天向速度、俯仰角、倾斜角为 0°。因此提出一种新的对传统三自由度陀螺仪和三自由度加速度计进行简化的降阶 MIMU/Wi-Fi 组合定位系统。在简化的 MIMU 中,采用低精度的 MPU-6050 模块,包含一个单自由度微陀螺仪,其敏感轴沿着人员行进的方向安装,来测量人员行进的角速度 ω_{br} ;两个微硅加速度计 a_1 和 a_2 ,分别排列在硬件整体中的纵、横平面上,其敏感轴分别指向载体坐标系 O_{cb} 轴和 O_{cb} 轴,以此来测量纵向和横向的加速度信息 f_x 和 f_y 。Wi-Fi 采用免费的 2.4 GHz 工作频段,有很高的数据传输速度,传输距离达到 100 m,并且可以与多种设备兼容,因此选择用 Wi-Fi 定位系统的输出对 MIMU 定位系统进行误差校正。

在 MIMU/Wi-Fi 组合定位系统中,先由微陀螺仪和微加速度计测量人员运动的角速度和加速度,角速度信息经 MIMU 导航解算一次积分,得到井下人员运动方向上的姿态;加速度信息经 MIMU 导航解算两次积分,可以得到井下人员的速度和即时位置信息 Z_m ;同时通过 Wi-Fi 定位系统计算到此时此刻精确的局部的的位置信息 Z_w ,然后将 MIMU、Wi-Fi 各自输出的定位参数 Z_m 和 Z_w 相减作为量测信息,送入卡尔曼滤波器进行递推估计获得定位误差的最优误差估计值,再利用该最优误差估计值对 MIMU 系统进行误差校正,将校正后 MIMU 输出的导航参数作为组合定位系统的输出,如图 1 所示。

3 MIMU 定位解算方程及降阶误差模型

3.1 MIMU 定位解算方程

对于降阶 MIMU 定位系统,不失一般性,选取地理坐

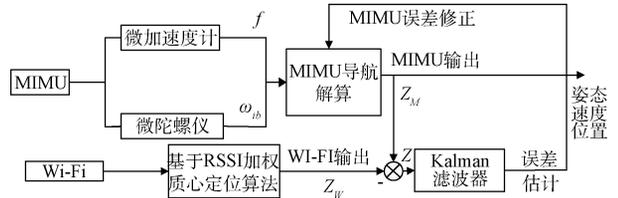


图 1 组合定位系统结构图

标系作为导航坐标系即指北方位系统,根据式(1)微陀螺仪和微加速度计的输出生息能得到井下人员的即时速度和位置信息:

$$\begin{cases} \dot{V}_e = T_{11}f_x + T_{12}f_y + (2\omega_{ie}\sin L + \frac{V_e}{R_n}\tan L)V_n \\ \dot{V}_n = T_{21}f_x + T_{22}f_y - (2\omega_{ie}\sin L + \frac{V_e}{R_n}\tan L)V_e \\ \dot{L} = \frac{V_n}{R_m} \\ \dot{\lambda} = \frac{V_e}{R_n\cos L} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_{11} 、 T_{12} 、 T_{21} 、 T_{22} 为姿态矩阵里面的元素,姿态矩阵的初始值由系统初始对准得到,然后再通过四元数更新计算得到实时变化的姿态矩阵 T 。这样一来就能解算出井下人员即时东向速度 V_e 、北向速度 V_n 以及所处的纬度 L 和经度 λ 。

3.2 MIMU 的降阶误差模型

MIMU 完整的误差模型需要考虑陀螺仪 3 个方向的刻度因子误差、未对准误差以及加速度计 3 个方向上的刻度因子误差、MIMU 自身 3 个失准角、3 个速度误差、3 个位置误差,共有 18 维状态变量,对于工程实现来说,在计算速度和复杂度上都不允许。通过对 MIMU^[15] 和 Wi-Fi 系统性能和误差源的分析,本文采用 10 维状态变量的降阶卡尔曼滤波器开环校正算法对系统进行算法实现,选择的误差状态量为姿态误差 Φ_e 、 Φ_n 、 Φ_u ,速度误差 δV_e 、 δV_n ,位置误差 δL 、 $\delta \lambda$,陀螺仪随机常值误差 ϵ_{rz} ,陀螺仪白噪声 ω_{gz} ,加速度计随机常值误差 ∇_{ai} ,加速度计白噪声 ω_{ai} 。误差模型建立如下:

$$\dot{\Phi}_e = -\frac{\delta V_n}{R_M} + (\frac{V_e}{R_N}\tan L + \omega_{ie}\sin L)\Phi_n - (\frac{V_e}{R_N} + \omega_{ie}\cos L)\Phi_u + \epsilon_{rz} \quad (2)$$

$$\dot{\Phi}_n = \frac{\delta V_e}{R_N} - \omega_{ie}\sin L\delta L - (\frac{V_e}{R_N}\tan L + \omega_{ie}\sin L)\Phi_e - \frac{V_n}{R_M}\Phi_u + \epsilon_{rz} \quad (3)$$

$$\dot{\Phi}_u = \frac{\delta V_e}{R_N}\tan L + (\frac{V_e}{R_N}\sec^2 L + \omega_{ie}\cos L)\delta L + (\frac{V_e}{R_N} + \omega_{ie}\cos L) + \frac{V_n}{R_M}\Phi_n + T_{33}\epsilon_{rz} - T_{33}\omega_{gz} \quad (4)$$

$$\delta \dot{V}_e = \frac{V_e}{R_N}\tan L\delta V_e + (2\omega_{ie}\sin L + \frac{V_e}{R_N}\tan L)\delta V_n +$$

$$(2\omega_{ie} \cos LV_n + \frac{V_e V_n}{R_N} \sec^2 L) \delta L - (T_{21} f_x + T_{22} f_y) \Phi_u + T_{11} \nabla_{ax} + T_{12} \nabla_{ay} + T_{11} \omega_{ax} + T_{12} \omega_{ay} \quad (5)$$

$$\delta \dot{V}_n = -(\frac{2V_e}{R_N} \tan L + 2\omega_{ie} \sin L) \delta V_e - (2\omega_{ie} \cos LV_e + \frac{V_e^2}{R_N} \sec^2 L) \delta L + (T_{11} f_x + T_{12} f_y) \Phi_u + T_{21} \nabla_{ax} + T_{22} \nabla_{ay} + T_{21} \omega_{ax} + T_{22} \omega_{ay} \quad (6)$$

$$\delta L = -\frac{\delta V_n}{R_M} \quad (7)$$

$$\delta \lambda = \frac{\delta V_e}{R_N} \sec L + \frac{V_e}{R_N} \sec L \tan L \delta L \quad (8)$$

4 组合定位系统的降阶卡尔曼滤波算法

采用间接卡尔曼滤波算法设计降阶组合定位系统,如图1所示。首先建立组合定位系统的状态方程,因Wi-Fi局部定位误差一般在1m以内,所以将其考虑为零均值的白噪声过程,不需要对其进行误差建模,因此,不将Wi-Fi的定位误差列入组合系统的状态向量,仅将其作为量测量来处理,于是选取MIMU系统导航参数的误差量作为系统状态量。组合定位系统的状态变量为:MIMU平台姿态角误差 Φ_e 、 Φ_n 、 Φ_u ,MIMU东向和北向速度误差 δV_e 、 δV_n ,MIMU的经、纬度误差 $\delta \lambda$ 、 δL ,陀螺常值漂移 ϵ ,加速度计误差 ∇_{ax} 、 ∇_{ay} ,则组合定位系统状态向量 X 为:

$X = [\Phi_e \Phi_n \Phi_u \delta V_e \delta V_n \delta L \delta \lambda \epsilon \nabla_{ax} \nabla_{ay}]$ 。状态方程可表示为: $\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t)$ 。 $F(t)$ 为组合系统的状态矩阵, $G(t)$ 为系统噪声阵, $W(t)$ 为系统过程白噪声向量。

Wi-Fi与MIMU组合时,选择位置组合方式,将MIMU输出的位置误差与Wi-Fi局部定位位置误差的差值作为组合定位系统的量测量,即某一时刻 t 量测量 $Z(t) = [\lambda_m - \lambda_w \quad L_m - L_w]^T$,其中 λ_m 和 L_m 为MIMU导航解算得出的经纬度; λ_w 和 L_w 分别为Wi-Fi定位得到位置坐标经过转换而得到的经纬度。则量测方程可表示为: $Z(t) = H(t)X(t) + V(t)$, $H(t)$ 为观测矩阵, $V(t)$ 为观测白噪声向量。 $W(t)$ 和 $V(t)$ 为互不相关的零均值白噪声, $Q(t)$ 为系统噪声的方差强度阵,要求为非负定阵, $R(t)$ 为量测噪声的方差强度阵,要求为正定阵。

通过上述分析,获得了组合定位系统的状态方程和量测方程,它是一个零均值白噪声激励的线性随机连续控制系统,要运用卡尔曼滤波需将其离散化^[16],设置好初值 X_0 、 P_0 ,然后根据 $t-1$ 刻的量测值以及卡尔曼滤波5个基本方程就能递推计算获得第 t 时刻的系统误差状态最优估计 X ,再用获得的最优估计值 $X(t)$ 及时对MIMU系统误差进行反馈校正,便得到MIMU/Wi-Fi组合定位系统的精确定位信息。

5 仿真研究

5.1 仿真参数设置及结果

假设井下某一人员的初始速度为0 m/s,初始位置为东经121°23',北纬45°42',人员所在高度始终认为是0 m。为使MIMU和Wi-Fi输出便于处理,使其采样周期和卡尔曼滤波周期均为0.1 s,仿真时间1 000 s,陀螺仪漂移0.1°/h,加速度计零偏10g~4g;设MIMU真实初始位置误差为0.02',初始速度误差为0 m/s,初始姿态角误差为0.6°,Wi-Fi的水平位置误差均方根为0.086。

为了充分检验本文所研究的井下人员降阶MIMU/Wi-Fi组合定位系统的性能,并且更能直观地看到定位误差精度,本文对MIMU导航定位系统和降阶MIMU/Wi-Fi组合定位系统分别用MATLAB进行航迹仿真实验,如图2~7所示。

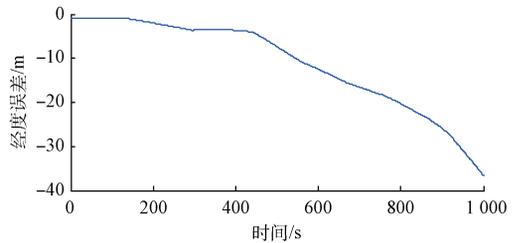


图2 MIMU定位经度误差

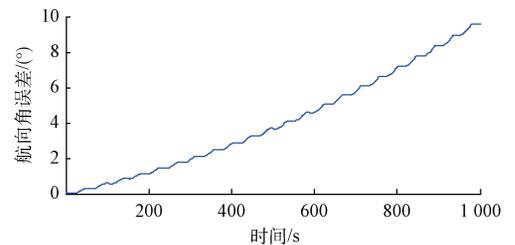


图3 MIMU定位航向角误差

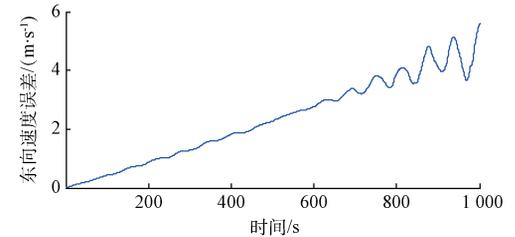


图4 MIMU东向速度误差

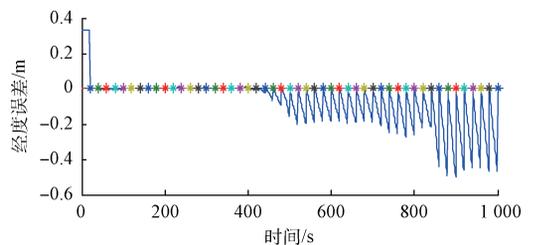


图5 MIMU/Wi-Fi组合定位系统经度误差

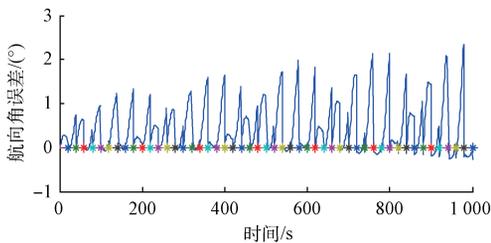


图 6 MIMU/Wi-Fi 组合定位系统航向角误差

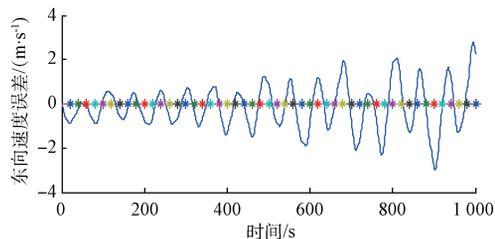


图 7 MIMU/Wi-Fi 组合定位系统东向速度误差

5.2 仿真结果分析

从图 2~4 可以看到,由于惯性器件自身误差的影响,经过 1 000 s 的仿真时间,其定位误差随着时间的积累而增大且呈现发散的趋势,经度误差累计达到 36 m,航向角误差达到 9.8° ,速度误差达到 5.8 m/s,这么大的定位误差是没办法进行导航定位的。所以 MIMU 导航定位系统难以完成长时间、高精度的井下人员定位工作。

从图 5~7 可以看到,该降阶 MIMU/Wi-Fi 组合定位系统中,Wi-Fi 定位系统以其精确局部定位结果对 MIMU 进行修正,使 MIMU 的定位误差获得了显著的收敛且定位误差减小。每当 MIMU 定位误差增大并出现发散时,Wi-Fi 利用其高精度局部定位结果通过降阶卡尔曼滤波使 MIMU 定位误差减小收敛而且降阶后响应速度很快。图中星号点表示通过轨迹仿真每隔 20 s 用 Wi-Fi 得到的高精度定位结果经卡尔曼滤波算法修正 MIMU 定位误差所得到的定位误差结果。经度误差每次经过修正后都能基本上归零,而且在未修正的 20 s,内误差最多仅在 0.5 m 以内;航向角误差经过修正后能使其发散趋势回到 0,而且在未修正的 20 s 内误差最多仅为 2.3° ;速度误差同样经过修正后能使其发散趋势回归到 0,且在未修正的 20 s 内误差最多为 ± 2.8 m/s。由此可见,该降阶 MIMU/Wi-Fi 组合定位系统,在减小维数降低系统复杂度后,响应速度加快且定位精度依然很高。

6 结 论

针对目前井下人员定位系统的不足之处,运用化繁为简的思想,提出了一种新的简易 MIMU 系统并给出降阶误差模型与无线 Wi-Fi 构成的降阶组合定位系统,并用降阶卡尔曼滤波算法实现两者的信息融合,在导航解算时忽略

高度、天向速度及加速度的影响,实现了定位精度与实际工程的契合。通过仿真实验验证,该降阶组合定位系统在确保人员定位精度的同时,极大地简化了系统,降低了成本,使其在工程上更容易实现,适用于井下人员定位。

参考文献

- [1] 孙继平. 煤矿安全生产理念研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 313-316.
- [2] 杨维, 冯锡生, 程时昕, 等. 新一代全矿井无线信息系统理论与关键技术[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 506-509.
- [3] 沈田, 温斌. 基于 RSSI 距离区间映射的加权知心定位算法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(5): 42-44.
- [4] 杨玺, 刘军, 阎芳. 基于序列加权的无线传感器网络定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1155-1160.
- [5] BAHL P, PADMANABHAN V N. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system[C]. Proceedings of the IEEE Computer and Communications Societies, 2000: 775-784.
- [6] 郑学伟. 基于权值参数的 WiFi 定位算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3): 35-37.
- [7] 詹杰, 刘宏立, 刘述钢, 等. 基于 RSSI 的动态权重定位算法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 83-87.
- [8] 吕阵, 刘丹, 李春光. 基于捷联惯性导航的井下人员精确定位系统[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1149-1152.
- [9] 将庆仙. 关于 MEMS 惯性传感器的发展及在组合导航中的应用前景[J]. 测绘通报, 2006(9): 5-9.
- [10] 刘安鹏, 苑伟政, 常洪龙. 基于 MIMU 的微型组合导航系统研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 322-328.
- [11] 罗宇锋, 刘勇, 王红旗, 等. 基于 MIMU/Wi-Fi 的井下人员三维全局定位[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(4): 113-116.
- [12] 秦永元, 张洪斌, 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: 238-285.
- [13] 张海鹏, 房建成. 微型飞行器的 MIMU 系统结构设计方法[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1249-1255.
- [14] 蔡挺, 刘明雍, 黄博. 基于中心微分 Kalman 滤波的重力/惯性组合导航[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1): 22-24.
- [15] 周文君, 刘进, 雷宏杰. 一种面向捷联惯导系统设计/验证的仿真平台设计[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(6): 11-14.
- [16] 王惠南, 吴智博. 采用卡尔曼滤波器的 GPS/INS 姿态组合系统的研究[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(3): 1-7.

作者简介

罗宇锋, 1964 年出生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为组合导航制导, 智能控制, 无线传感器网络等。

杨益龙(通讯作者), 1989 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为组合导航, 无线传感器网络。

E-mail: yangyilonghn@126.com