

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.02.023

无人机动平台组合导航系统

程虹霞, 骆云志

(中国兵器工业第五八研究所 军品部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 以无人机动平台的组合导航系统为对象, 根据无人机动平台导航的高精度的使用要求, 运用导航定位系统整体设计思想, 对组合导航系统进行原理分析, 组建了机动平台组合导航系统的系统模型, 并基于联邦卡尔曼滤波的信息融合技术, 最终实现了无人机动平台组合导航系统的高精度数据融合导航。实验证明, 该导航系统性能良好, 能够满足无人机动平台的导航需要。

关键词: 无人机动平台; 组合导航; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A

Unmanned Mobile Platform's Integrated Navigation System

CHENG Hong-xia, LUO Yun-zhi

(Dept. of Armament Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: Taking integrated navigation system of unmanned mobile platform as the object. Bases high-precision request of platform navigation and adopting the whole system theory, the mathematical model of integrated navigation system is established after analyzing it principle. Realized unmanned mobile platform integrated navigation's high precision data fusion navigation using the kalman filtering technology. Experiment shows that the system has good performance, and meet the unmanned mobile platform's navigation.

Keywords: Unmanned mobile platform; Integrated navigation; Kalman filter

0 引言

高精度导航信息将使作战单位能按照指挥员的意图, 在准确的时间出现在精确的地点, 这是新型作战思想的要求^[1]。因此, 在高技术现代战争中, 如何提高导航系统的精度和可靠性成为一项具有重要现实意义的课题。目前, 尚没有导航方式能够同时满足精度与可靠性的要求^[2], 须进行组合导航。组合导航系统是将机动载体上的某些或全部导航设备组合成一个统一的系统, 利用两种或两种以上的设备提供多重信息, 构成一个多功能、高精度的冗余系统。组合导航系统有利于充分利用各导航系统进行信息互补与信息合作, 因而成为导航系统发展的方向。故对无人机动平台组合导航系统进行研究。

1 组合导航系统组成及原理

1.1 组合导航系统组成

采用系统化设计理念, 将信息融合技术和无人机动平台系统结构的设计相结合, 建立系统化的组合导航系统。组合导航系统的模块框图如图 1。

从图 1 中可看到, 组合导航系统由航迹推算系统、GPS 导航系统和避障子系统组成。而基于联合

卡尔曼滤波器的信息融合算法的设计, 是整个组合系统的核心部分, 用于实时地估计系统的误差状态, 然后依据最小均方误差估计的控制规律, 对惯性导航系统进行反馈修正, 从而提高系统的导航精度。

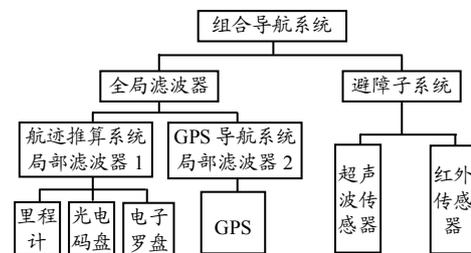


图 1 导航系统模块框图

1) 航迹推算导航

航迹推算导航设备由光电码盘、电子罗盘和里程计组成。由于无人机动平台的运动可认为是在非平整地面上的三维运动, 若平台的初始位置和所有时刻的位移已知, 则通过在初始位置累加位移向量的方法可计算出无人机动平台当前的位置。航迹推算导航系统具有自主性、保密性强, 只需利用自身惯性元件的观测量推导出位置、速度等导航参数, 抗无线电干扰能力强, 全天候, 机动灵活, 多功能, 但航迹推算系统存在误差随时间迅速积累增长, 不

收稿日期: 2009-09-17; 修回日期: 2009-12-08

基金项目: 国防基础科研项目

作者简介: 程虹霞 (1975-), 女, 安徽人, 工学硕士, 从事武器装备总体论证研究。

能长期工作, 初始对准时间长等问题, 靠提高航迹推算系统本身元器件精度, 只能有限程度的改善, 不能从根本上解决这些问题。

2) GPS 全球定位系统

GPS 全球卫星定位系统利用环绕地球的 24 颗卫星准确计算接收器所在位置。接收器中的计算机只要选取 4 颗或 4 颗以上卫星发出的信号进行分析, 就能确定接收器的位置。但在移动导航中, 移动 GPS 接收机定位精度受到卫星信号状况和道路环境的影响, 同时还受到时钟误差、传播误差、接收器噪声等诸多因素的影响, 因此, 单纯利用 GPS 导航存在着定位精度比较低、可靠性不高的问题。

3) 超声及红外导航

超声波导航通过发射探头发射出超声波, 超声波在介质中遇到障碍物而返回到接收装置, 可利用渡越时间法计算出障碍物距离。使用超声波传感器采集环境信息时不易受到如天气条件、环境光照及障碍物阴影、表面粗糙度等外界环境条件的影响。红外传感器定位同超声波传感器一样, 具有灵敏度高、结构简单、成本低等优点。因为它们距离分辨率高, 而角度分辨率低, 因此在无人机动平台中, 将红外光电开关用作接近觉传感器, 探测临近或突发运动障碍, 便于平台躲避障碍。

将这三者组合, 高精度 GPS 信息作为外部量测输入, 在运动中实时修正航迹推算数据, 以控制其误差随时间而积累, 超声和红外导航用于修正航向, 提高了系统可靠性, 而短时间内高精度的航迹推算定位结果, 可解决 GPS 动态环境中的信号失锁和周期问题, 加强了系统的抗干扰能力。组合系统^[3]间的信息互相渗透, 有机结合, 起到性能互补的效果, 提升了导航系统的导航准确性、稳定性和可靠性。

1.2 组合导航原理

组合导航系统信息融合的本质, 是将航迹推算导航、GPS 导航和超声红外导航 3 个导航子系统所测量的信息进行互联与状态矢量估计。即利用里程计、光电码盘、GPS 接收机和电子罗盘等的量测作为多源信息, 组合导航系统根据这些信息给出关于导航参数误差的最优估计量, 从而提高系统精度及可靠性。无人机动平台组合导航原理如图 2。

基于联邦卡尔曼滤波器的信息融合中心用于实时地估计系统的误差状态, 然后依据最小均方误差估计的控制规律, 对惯性导航系统进行反馈修正, 从而提高整个系统的导航精度。

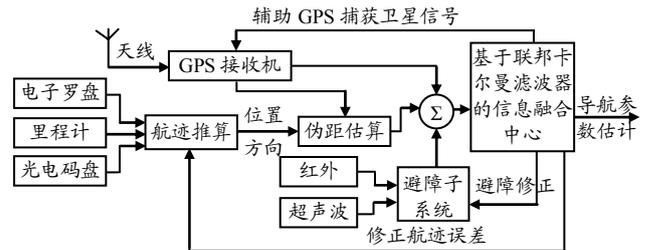


图 2 无人机动平台组合导航系统原理图

2 基于联邦卡尔曼滤波的组合导航方法

运用卡尔曼滤波及联邦滤波来设计机动平台的高精度组合导航系统。联邦滤波 (Federated Filtering) 理论^[4]是 Carlson 为了解决组合导航集中式卡尔曼滤波带来的问题而提出的分级式分散卡尔曼滤波算法, 该理论具有两级结构可产生全局最优或次优解, 设计灵活、计算量小、容错性能好, 是目前组合导航领域比较实用和广泛的算法。

1) 联邦卡尔曼滤波器结构

联邦滤波器由若干个子滤波器和一个主滤波器组成, 是一种具有两级数据处理的特殊的分散化滤波方法, 其特殊性在于联邦滤波器采用的是信息分配原理。组合导航方式下的滤波器结构如图 3。

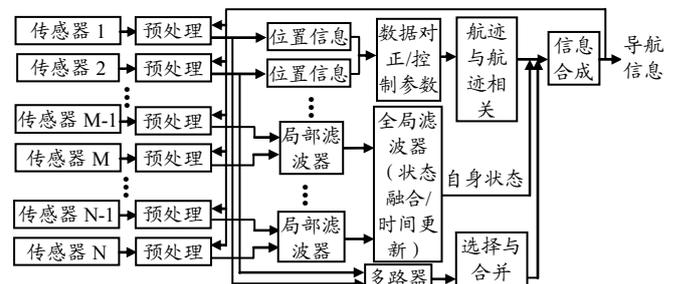


图 3 组合导航方式下联邦卡尔曼滤波器结构图

2) 基于联邦卡尔曼滤波器的无人机动平台组合导航滤波算法^[5-7]建立, 取无人机动平台组合导航系统的全局状态向量为:

$$X_g = [X_e, v_e, a_e, Y_n, v_n, a_n, Z_h, v_h, a_h, \varepsilon_e, \varepsilon_n]^T$$

式中, X_e 、 Y_n 、 Z_h 分别为无人平台东向、北向和高度的位置分量; v_e 、 v_n 、 v_h 分别为无人平台东向、北向和高度方向的速度分量; a_e 、 a_n 、 a_h 分别为无人平台东向、北向和高度方向的加速度分量; ε_e 和 ε_n 分别为 GPS 各种误差源引起的东向位置误差和北向位置误差。

先由航迹推算局部滤波器和 GPS 导航局部滤波器处理各传感器系统的数据并给出状态估计 \hat{X}_i , 和估计误差的协方差阵 P_i , 其状态估计 \hat{X}_i 可表示:

$$\hat{X}_i = \begin{bmatrix} \hat{X}_{ci} \\ \hat{X}_{bi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， \hat{X}_{ci} 是航迹推算局部滤波器和 GPS 导航局部滤波器共有的公共状态 X_c 的估计； \hat{X}_{bi} 是第 i ($i=0,1$) 个局部滤波器的专用状态估计。然后各局部滤波器的局部状态估计 \hat{X}_i 和协方差阵只被送入全局滤波器，并同全局滤波器的状态估计 \hat{X}_m 和协方差矩阵 P_m 一起按式 (2) 和式 (3) 进行融合，得到全局最优估计 \hat{X}_g 和协方差矩阵 P_g 。

$$\hat{X}_g = P_g \left[\sum_{i=1}^N P_i^{-1} \hat{X}_i + P_m^{-1} \hat{X}_m \right] \quad (2)$$

$$P_g = \left[\sum_{i=1}^N P_i^{-1} + P_m^{-1} \right]^{-1} \quad (3)$$

在全局最优估计值 \hat{X}_g 产生后，与被乘以一个放大系数 β_i^{-1} ($\beta < 1$) 的协方差矩阵 P_g 一起回馈给局部滤波器，以重置局部滤波器的估计值，即：

$$\hat{X}_i = \hat{X}_g, \quad P_i = \beta_i^{-1} P_g \quad (4)$$

同时，全局滤波器的估计值和预测误差的协方差矩阵也可重置为 \hat{X}_g 和全局协方差矩阵的 β_m^{-1} ($\beta < 1$) 倍，即 $\beta_m^{-1} P_g$ 。这里的 $\beta_i, i=1,2,\dots,N,m$ 称为信息分配系数。它是严格按照信息分配原则来确定的，即满足： $\sum_{i=1}^N \beta_i + \beta_m = 1$ 。由于全局滤波器不进行滤波运算，只完成子系统的信息综合，则 $\beta_m = 0$ 。而系统的全局估计为各局部滤波器的加权和，即

$$\hat{X}_g = \beta_1 X_{1k} + \beta_2 X_{2k}, \quad \beta_1 + \beta_2 = 1 \quad (5)$$

通过选取不同的信息分配系数 β_i ，使联邦卡尔曼滤波器的全局状态向量输出具有较好的综合性能和较高的定位精度与容错能力。对于局部滤波器 i ，如果其状态向量 X_i 的估计质量越差，其对应的误差方差阵 P_i 就越大；反之，则 P_i 就越小。因此取：

$$\beta_1 = P_k P_{1k}^{-1}, \quad \beta_2 = P_k P_{2k}^{-1} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5) $\beta_1 + \beta_2 = 1$ ，可得

$P_k^{-1} = P_{1k}^{-1} + P_{2k}^{-1}$ ，将 $\beta_1 = P_k P_{1k}^{-1}$ 和 $\beta_2 = P_k P_{2k}^{-1}$ 代入式

$$(5) \quad \hat{X}_g = \beta_1 X_{1k} + \beta_2 X_{2k}, \quad \text{得到} \quad \hat{X}_g = P_k P_{1k}^{-1} X_{1k} +$$

$P_k P_{2k}^{-1} X_{2k}$ ，可得 $\hat{X}_g = P_k (P_{1k}^{-1} X_{1k} + P_{2k}^{-1} X_{2k})$ 。即，

$$X_g = (P_k^{-1})^{-1} (P_{1k}^{-1} X_{1k} + P_{2k}^{-1} X_{2k}), \quad \text{由于},$$

$P_k^{-1} = P_{1k}^{-1} + P_{2k}^{-1}$ ，因此可得到：

$$\hat{X}_g = (P_{1k}^{-1} + P_{2k}^{-1})^{-1} (P_{1k}^{-1} X_{1k} + P_{2k}^{-1} X_{2k}) \quad (7)$$

式 (7) 完成了子系统的信息综合，输出全局状态向量 \hat{X}_g 。

3 实验结果

采用 matlab 进行仿真实验。假设无人机动平台以 $10\sqrt{2}$ m/s 的速度，沿 45° 航向角匀速直线运动，运动里程为 300 s。采样周期 1 s，设置信息分配系数 $\beta_1 = 0.7325, \beta_2 = 0.2675, X_0 = [0,10,0,0,10,0,0,0,0,0]^T$ 。

根据以上参数进行仿真，在单独使用 GPS 定位时东向误差如图 4(a) 可知，GPS 误差波动大，单独使用 GPS 无法完成无人平台的定位；单独使用航迹推算系统推算位置时的东向误差为如图 4(b) 所示，航迹推算系统推算的航位开始有较小的误差，随着时间推移误差累积，致使推算越来越偏离真实值；使用组合导航之后，系统充分把 GPS 和航迹推算系统的优点结合起来，使误差大大减少，见图 4(c)。

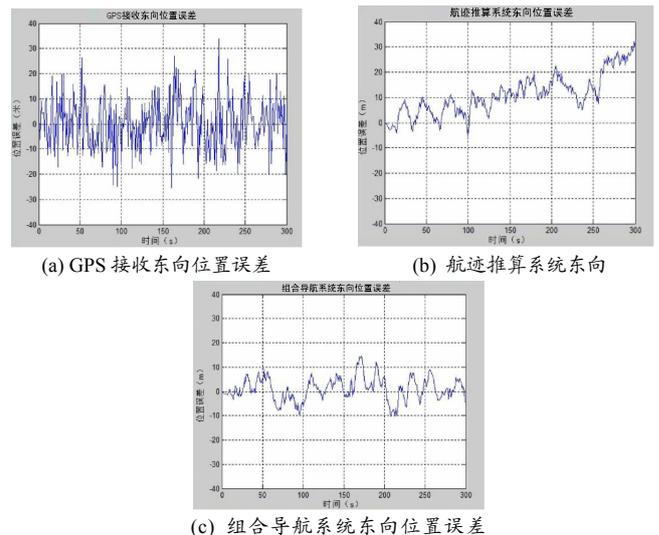


图 4 实验结果图

4 结束语

通过将各导航传感器量测向量构成的多个量测子空间，按照组合导航系统要求的最优准则，将测

量数据间或测量数据与系统已有知识之间的互联关系, 一次性或分多次向导航系统全局性空间投影, 形成系统的状态估计, 得到更全面、可靠的导航信息。实验证明, 将组合导航技术用于无人机动平台, 其性能良好, 能满足无人机动平台的导航需要。

参考文献:

[1] 曹建平, 周恒军. 现代战争给通信对抗带来的思考[J]. 海军航空工程学院学报, 2000, 15(9): 387-388.

[2] 李鸣. 航空工程手册:航电综合类[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[3] Ching-Chih Tsai, Hung-Hsing Lin, Szu-Wei Lai.

Multisensor 3D Posture Determination of a Mobile Robot Using Inertial and Ultrasonic Sensors[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2005, 42(2): 317-335.

[4] Carlson EA, Beraducci M P. Federated Kalman filter Simulation Results [J] Navigation, 1994, 41(3): 297-321

[5] Fernando Lizarralde, Nunes Eduardo V L, Liu Hsu, Wen J T. Mobile Robot Navigation using Sensor Fusion[J]. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2003, 17(6): 458-463.

[6] Atanas Georgiev, Allen P K. Localization Methods for a Mobile Robot in Urban Environments. IEEE transactions on robotics, 2004, 20(5): 851-864.

[7] 宋国栋. 移动机器人组合导航系统设计与应用的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 15-21.

(上接第 59 页)

4.3 综合电子对抗系统作战能力评估模型

根据综合电子对抗系统基本作战模式, 系统的作战能力与每个子系统均有密切关系, 任何一个子系统的作战能力差都会影响到整个系统。因此, 综合电子对抗系统的作战能力由侦察发现能力 U_1 、信息传输能力 U_2 、指挥控制能力 U_3 、进攻能力 U_4 、和作战适应能力 U_5 以甲类模型聚合, w_i 为构成该指标的第 i 个下层指标 U_i 的权重系数:

$$U = \prod_{i=1}^5 \sqrt[5]{(1+U_i)^{5w_i}} - 1$$

基于图 2 的综合电子对抗系统作战能力评估指标体系与作战任务, 二级指标以如下思路进行聚合: 侦察发现能力、信息传输能力和指挥控制能力均由对应三级指标以甲类模型聚合, 进攻能力和作战适应能力由对应三级指标以乙类模型聚合。以电子对抗系统的性能参数/战技指标的取值作为底层输入, 可

逐层计算各级上层指标值。直至计算到最顶层, 得出综合电子对抗系统作战能力的最终评估值。

5 结束语

该研究只考虑了 2 种模型, 还不能完全地反映客观实际。接下来, 将进一步研究综合电子对抗系统的作战机理, 以提炼出更多的指标聚合模型。

参考文献:

[1] 汪致远, 童志鹏. 现代武器装备知识丛书, 电子战和信息战技术与装备[M]. 北京: 原子能出版社、航空工业出版社、兵器工业出版社, 2003: 28-68.

[2] 罗鹏程, 傅攀峰, 周经伦. 武器装备体系作战能力评估框架[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 72-75.

[3] 赵焕臣. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

[4] 陈健, 张锡恩, 李忠民, 等. 导弹装备权重计算方法选取研究[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(增刊): 43-45.

[5] 宋道军, 张安. 空袭突防作战中雷达对抗作战效能评估研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 125(4): 991-993.

[6] 李智生, 李钊. 基于随机服务系统的雷达对抗效能评估[J]. 无线电工程, 2006, 36(11): 56-58.

(上接第 66 页)

参考文献:

[1] D.G.Kallgren, J-W Smaal, M.Gerbrands, M.Andriess. An Architecture for Internet Protocol over HF: Allied High-Frequency Wide-Area Networking using STANAG 5066 [R]. NC3A, Netherlands: NATO/PFP UNCLASSIFIED-APPROVED FOR INTERNET TRANSMISSION (RTO-IST-054), IEEE Military Communication Conference,2005.

[2] NATO Standardization Agreement 5066: Profile for High Frequency (HF) Radio Data Communications, version 1.2, NATO Standardization Activity reference 0114-C3/5066, 27 January 2004.

[3] 王金龙, 王呈贵, 吴启晖, 等. Ad Hoc 移动无线网络[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

[4] Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T. et al. Optimized link

state routing protocol for ad hoc networks[C]. In: Proceedings of the 2001 International Multi-Topic Conference (IEEE INMIC 2001). Lahore, Pakistan: IEEE, 2001: 62-68.

[5] Johnson DB, Maltz DA, Broch J. DSR: The dynamic source routing protocol for multiple wireless ad hoc networks[C]. USA: Addison-Wesley, Ad Hoc Networking, 2001: 139-172.

[6] W. Richard Stevens. TCP/IP Illustrated Volume 1: The Protocols[M]. 范建华, 等. 译. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[7] B.Crow et al. Investigation of the IEEE 802.11 Medium Access Control (MAC) Sublayer Functions[C]. Kobe, Japan: Proc. INFOCOM 97, 1997(4):126-133.

[8] E.E. Johnson, et al. Routing in HF Ad-Hoc WANs[C]. Monterey, Canada: Proceedings of MILCOM 2004, 2004: 1040-1046.