

高斯和估计 Kalman 滤波在多平台空战对抗评估数据预处理中的应用

侯西倩, 寇英信, 李战武, 徐安, 康志强

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 针对多平台空战对抗评估数据预处理中的过程积累误差问题进行研究。通过构建多平台空战对抗系统,分析不同平台间实时数据交互关系和相应的数据类型,采用最小二乘法和坐标变换实现不同平台间的时空配准,并对多平台空战对抗评估过程进行误差分析,将其状态误差和观测误差表示为高斯和形式,并选用 Kalman 滤波方法对过程积累误差进行滤波。实例仿真实验结果表明:经过滤波后的估计轨迹与真实轨迹之间的拟合效果较好,进一步完善了原有空战对抗数据预处理过程。

关键词 多平台空战对抗评估;数据预处理;时空配准;过程积累误差;高斯和估计 Kalman 滤波

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.03.006

中图分类号 V557 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)03-0025-05

Pre-processing of Multi-platform Air Combat Rivalry Evaluation Based on Gaussian Sum Estimate Kalman Filter

HOU Xiqian, KOU Yingxin, LI Zhanwu, XU An, KANG Zhiqiang

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: With the widely application of the Multi-platform and Multi-sensor in the Air Combat Rivalry Evaluation, the accomplishment of the better data Pre-processing of Multi-platform Air Combat Rivalry Evaluation will play a vital role in route selection, track fusion, evaluation and prediction of real-time and afterwards air combat training. Through building multi-platform air combat training evaluation system, the measuring data from varied platforms is analyzed. The Least Square method and coordinate transformation are adopted to realize the time and space registration between varied platforms, the process accumulated error is analyzed and disposed based on the Gaussian Sum Estimate Kalman Filter algorithm. Simulation analysis is done, the result shows that the matched curve between measurement track and real track is good in fitting result after filter processing, and the purpose of perfecting the Pre-processing of multi-platform air combat rivalry evaluation is achieved.

Key words: multi-platform air combat rivalry evaluation; data pre-processing; time and space registration; process accumulated error; Gaussian Sum Estimate Kalman Filter

收稿日期: 2015-01-08

作者简介: 侯西倩(1991—),女,山东郓城人,硕士生,主要从事火力指挥控制原理与技术研究.E-mail:783438669@qq.com

引用格式: 侯西倩,寇英信,李战武,等.基于高斯和估计 Kalman 滤波的多平台空战对抗评估数据预处理[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):25-29. HOU Xiqian, KOU Yingxin, LI Zhanwu, et al. Pre-processing of Multi-platform Air Combat Rivalry Evaluation Based on Gaussian Sum Estimate Kalman Filter [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(3): 25-29.

多平台技术(多传感器技术)在目标识别与跟踪方面具有“时空覆盖范围大、定位精度高、信息利用率高”优点。多平台空战对抗评估数据中主要存在着数据采集过程的量测误差、时空配准过程的配准误差和评估过程的观测误差。目前针对多平台下的空战对抗评估数据预处理^[1]过程的误差滤波方法研究越来越多。文献[1]提出了飞参数据趋势项分离、异常数据的识别定位、缺损数据的补正等预处理的方法,但侧重理论层面;文献[2]通过将模型的状态噪声和观测噪声表示成高斯和的形式,提出对应的扩展卡尔曼和滤波器以及高斯厄密特和滤波器,在保证较好精度的情况下,实现滤波的快速性;文献[3]将基于模板匹配姿态角量测的噪声视为非高斯情况,并将均方根容积卡尔曼滤波引入到高斯和滤波框架下,从而提高对非线性非高斯噪声的处理能力。本文分析各平台在数据采集、时空配准和评估中的过程积累误差,选用高斯和估计 Kalman 滤波模型,进而实现过程积累误差的估计与滤波,进一步完善原有的数据预处理过程。

1 多平台空战对抗系统

多平台空战对抗系统,可划分为感知系统、多源多平台融合系统和评估系统,其中感知系统主要包括机载航电平台、数据采集传输平台、地防平台。在多平台空战对抗过程中,不同平台之间进行着数据实时交互,并发挥着不同的作用。多平台数据实时交互关系见图 1。

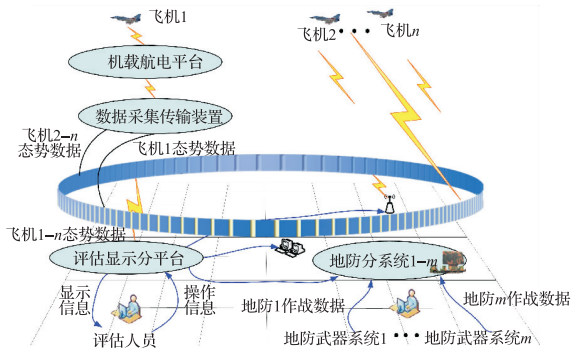


图 1 多平台空战对抗数据实时交互示意图

Fig.1 Sketch map of multi-platform air combat rivalry data real-time interaction

各平台之间进行实时交互的数据主要包括:

1)机载航电平台空战对抗数据:指用于载机指挥引导、飞行、目标探测、武器控制与制导、自卫电子对抗、系统工作状态等航电数据,见图 2。

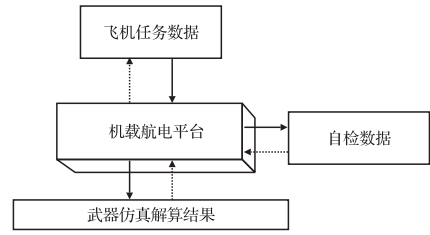


图 2 机载航电平台空战对抗数据种类

Fig.2 Air combat rivalry data type of airborne avionics platform

2)数据采集传输平台空战对抗数据:包括机载航电平台下传的飞机任务数据和武器仿真计算数据、接收的其他参训飞机态势数据等,见图 3。

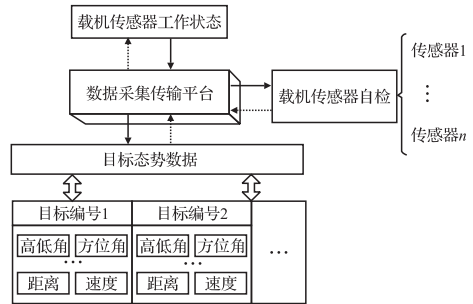


图 3 数据采集传输平台空战对抗数据种类

Fig.3 Air combat rivalry data type of data acquisition and transmission platform

3)地防平台空战对抗数据:指地防空战对抗数据和本地武器仿真计算数据,用于记录该武器系统的指控、搜索、指挥、制导等客观数据,以及与该武器系统发生攻防关系的飞机态势数据,见图 4。

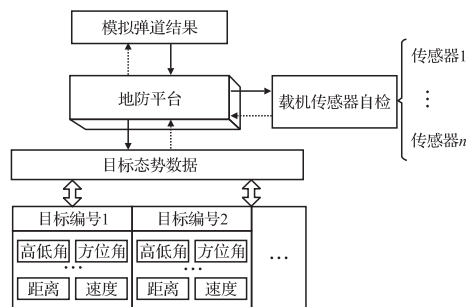


图 4 地防平台空战对抗数据种类

Fig.4 Air combat rivalry data type of ground air defense platform

2 多平台空战对抗数据配准

作为多平台空战对抗评估数据预处理的一个重要环节,数据配准主要完成不同类别、方位、时间的多个平台采集数据的整理和预加工,使其变换到相同的时空参照系中。多平台空战对抗数据配准可分为 2 个过程:时间配准和空间配准。

2.1 时间配准

在处理多平台空战对抗评估数据时间配准时,一般将各平台数据统一到扫描周期较长的一个平台上。常用的方法有最小二乘准则和内插外推法^[5]。

本文采用最小二乘准则,选取 2 个不同采样周期的平台,通过整合采样周期较小的平台量测值,消除由时间偏差引起的目标状态量测的不同步性,进而达到多平台数据的时间配准。

设两平台采样周期之比为 n ,即表示在长采样周期平台连续 2 次更新目标状态之间,短采样同期平台采集到 n 次量测值,用 $\mathbf{Z}_n = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ 来表示 $k-1$ 至 k 时刻短采样周期平台的 n 个位置量测数据集合,假设用 $\mathbf{U} = [z, \dot{z}]^T$ 表示 \mathbf{Z}_n 经时间配准后的数据值以及其导数构成的列向量,是一个量测值集合。则:

$$\mathbf{Z}_n = \mathbf{W}_n \mathbf{U} + \mathbf{V}_n \quad (1)$$

式中: \mathbf{V}_n 表示均值为零,方差为融合前短采样同期平台采集到的位置量测误差的协方差阵,而 $\mathbf{W}_n = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ (1-n)T & (2-n)T & \dots & (n-n)T \end{bmatrix}^T$ 。

由最小二乘准则可知,选取如下目标函数

$$\mathbf{J} = \mathbf{V}_n^T \mathbf{V}_n = [\mathbf{Z}_n - \mathbf{W}_n \mathbf{U}]^T [\mathbf{Z}_n - \mathbf{W}_n \mathbf{U}] \quad (2)$$

使上述目标函数值最小,则可得:

$$\mathbf{U} = [\dot{z}, z] = (\mathbf{W}_n^T \mathbf{W}_n)^{-1} \mathbf{W}_n^T \mathbf{Z}_n \quad (3)$$

相应的误差协方差阵为 $\mathbf{R}_U = (\mathbf{W}_n^T \mathbf{W}_n)^{-1} \sigma_r^2$, 式中: σ_r^2 表示时间配准前的位置量测噪声方差。由此可实现多平台空战对抗数据时间配准。

2.2 空间配准

在多平台空战对抗中,各平台所处空间方位各不相同,选取的基准坐标系也各不相同,一般包含载机笛卡儿坐标系、载机极坐标系、地心坐标系和大地坐标系^[6]。选用地心坐标系作为整个平台空间配准的基准坐标系,通过坐标平移与旋转,使其他平台所处坐标系向地心坐标系转换,将多平台空战对抗评估量测数据变换到同一个时空参照系中。

3 误差分析

由于多平台空战对抗评估数据测量过程存在初始误差,在非线形参数转换过程中会引入新的误差,导致初始误差发生改变。误差的存在会造成同一目标在不同平台的航迹之间存在较大的过程积累偏差^[8-9],为多平台空战对抗预处理的后续航迹关联与融合过程带来模糊和困难,因此在数据配准后必须对其进行误差分析和误差处理。常用的估计方法有

最小二乘法、极大似然法、卡尔曼滤波、BLUE、EKF 和 UKF 等^[9]。本文将过程积累误差量化为高斯和的形式,并选用 Kalman 滤波方法进行误差处理。

3.1 高斯和估计模型

在多平台空战对抗过程中,将数据预处理过程中的干扰视为非高斯、均值不一定为零的干扰,故可将过程积累误差表示成高斯和的形式,并由此可以推导出满足高斯和形式的状态预测与更新。

假设某系统的状态和观测模型为:

$$\mathbf{x}_{k+1} = f_{k+1}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_k = h_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k, k = 0, 1, \dots, N \quad (5)$$

式中: f 和 h 表示非线性函数;状态误差 \mathbf{w}_k 和观测误差 \mathbf{v}_k 均为非高斯误差。

k 时刻状态的后验分布为:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_{k-1}) = \int p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) p(\mathbf{x}_{k-1} | \mathbf{y}_{k-1}) d\mathbf{x}_{k-1} \quad (6)$$

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_k) = \frac{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k) p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_{k-1})}{\int p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k) p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_{k-1}) d\mathbf{x}_k} \quad (7)$$

令 $N(\mathbf{x}; a_i, B_i)$ 表示均值为 a_i 、方差为 B_i 的正态(高斯)分布密度,则空战对抗过程的状态误差和配准估计中的观测误差分布可分别表示为:

$$p(\mathbf{w}_k) = \sum_{l=1}^{L_k} \gamma_k^{(l)} N(\mathbf{w}_k; \omega_k^{(l)}, \mathbf{Q}_k^{(l)}) \quad (8)$$

$$p(\mathbf{v}_k) = \sum_{j=1}^{J_k} \beta_k^{(j)} N(\mathbf{v}_k; \nu_k^{(j)}, \mathbf{R}_k^{(j)}) \quad (9)$$

式中: $\sum_{l=1}^{L_k} \gamma_k^{(l)} = \sum_{j=1}^{J_k} \beta_k^{(j)} = 1$; $p(\mathbf{x})$ 表示误差的高斯和形式。

3.2 Kalman 滤波器算法

考虑各平台在 k 时刻的量测,结合构建的状态噪声与观测噪声的高斯和模型,可以应用 Kalman 滤波器对平台的偏差向量进行估计,即可得到如下公式:

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = \mathbf{x}_{k-1|k-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{P}_{k-1|k-1} \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_{k|k} = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (12)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{A}_k^T (\mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{C}_k)^{-1} \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I}_4 - \mathbf{K}_k \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{C}_k = \mathbf{A}_k \sum \mathbf{A}_k^T$ 。

4 实例分析

结合上述高斯和 Kalman 滤波模型,在三维坐标系中对多平台空战对抗数据配准进行 200 次蒙特

卡洛法仿真。

设置初始条件如下:设地面平台的地理位置坐标为(108.9° 46.3° 250m),载机平台的初始地理坐标为(L₀,B₀,H₀)=(110.1° 41.8° 7 500 m),目标机平台的初始地理坐标为(112.4° 44.3° 3 000 m),目标相对于载机在地心坐标系下作曲线运动。设初始状态、状态噪声和观测噪声分别为两个高斯分布的叠加,即:

$$\begin{cases} p(x_0) = \alpha_1 N(x_{01}, P_{01}) + \alpha_2 N(x_{02}, P_{02}) \\ p(w_t) = \gamma_1 N(m_{Q1}, Q_1) + \gamma_2 N(m_{Q2}, Q_2) \\ p(v_t) = \beta_1 N(m_{R1}, R_1) + \beta_2 N(m_{R2}, R_2) \end{cases}$$

$\alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.7; \gamma_1 = 0.6, \gamma_2 = 0.4; \beta_1 = 0.4, \beta_2 = 0.6; x_{01} = 0, x_{02} = 0; m_{Q1} = 0.4, m_{Q2} = 0.3; m_{R1} = 3, m_{R2} = 2; P_{01} = 9, P_{02} = 12; Q_1 = 7, Q_2 = 10; R_1 = 4, R_2 = 6;$ 由生成的观测数据轨迹和配准效果见图 5。

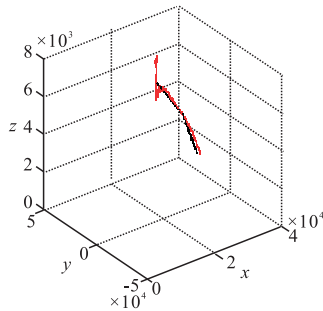


图 5 真实轨迹与估计轨迹对比图

Fig.5 Picture of comparison between real track and estimated track

从图中可以明显看出在经过目标配准过程后,目标的估计轨迹拟合效果随时间增大越来越好。由于图中滤波前后 2 条轨迹比较相近,其差别可具体参考目标轨迹绝对位置误差曲线图,见图 6。

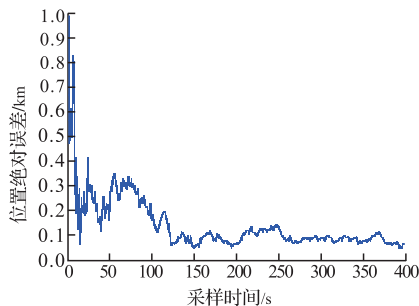


图 6 目标轨迹绝对位置误差曲线

Fig.6 Plot of absolute position error of target trajectory

图中可见,目标机动轨迹经高斯和估计 Kalman 滤波后得到较好的效果,位置绝对误差曲线随着观测时间的增加而趋于收敛,即估计轨迹与真实轨迹之间的位置误差逐渐减少,满足实际火控计算的精度需求。

通过实例分析可以得出,在多平台空战对抗评

估数据预处理过程中,经高斯和估计 Kalman 滤波处理后的估计轨迹与真实轨迹在一定精度范围内吻合,这表明评估数据预处理过程中的过程积累误差可以通过滤波处理得到有效控制,本文方法可行。

5 结语

随着多平台、多传感器在空战对抗评估中的不断运用,如何实现较好的多平台空战对抗评估数据预处理,对于后期开展实时或事后的航迹选择、航迹融合及效果评估与预测发挥着重要作用。通过分析不同平台下采集到的量测数据,采用最小二乘法和坐标变换实现了不同平台间量测数据的时空配准,并基于高斯和估计 Kalman 滤波算法实现了过程积累误差的分析和处理。由仿真分析表明,经滤波后的估计轨迹与真实轨迹吻合,实现了进一步完善原有空战对抗评估数据预处理过程的目的。

需要指出的是,由于篇幅有限,对于过程积累误差中各误差源对收敛速度和误差精度的影响未做出详细的对比研究,下一步将在本文基础上就各误差源对高斯和估计 Kalman 滤波模型的收敛速度和精度的影响进行深入研究。

参考文献(References):

[1] 邸亚洲,秦永元,尚希良. 基于多项式回归算法的飞参数据预处理研究[J]. 测控技术,2008, 27(4):21-22.
DI Yazhou, QIN Yongyuan, SHANG Xiliang. Research on Data Pre-Processing of Flight Data Recorder System Based on Polynomial Regression[J]. Measurement and Control Technology, 2008, 27(4):21-22. (in Chinese)

[2] 林青,尹建君,张建秋,胡波. 非线性非高斯模型的高斯和滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12):2493-2499.
LIN Qing, YIN Jianjun, ZHANG Jianqiu, HU Bo. Gaussian Sum Filtering Methods for Nonlinear Non-Gaussian Models[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12):2493-2499. (in Chinese)

[3] 单甘霖,张凯,吉兵. 基于高斯和均方根容积卡尔曼滤波的姿态角辅助目标跟踪算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(7):1529-1534.
SHAN Ganlin, ZHANG Kai, JI Bing. Pose Angle Aided Target Tracking Algorithm Based on Gaussian Sum Square-Root Cubature Kalman Filter [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(7):1529-1534. (in Chinese)

[4] 丛伟,景博. 美国空军空战训练系统的发展历程和启示[J]. 电光与控制, 2011, 18(7):55-59.

- CONG Wei, JING Bo. Development and Revelation of USAF Air Combat Training System[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(7): 55-59. (in Chinese)
- [5] Blair W D, Rice T R, Alouani A T, Xia P. A Synchronous Data Fusion for Target Tracking with A Multitasking Radar and Optical Sensor[C]//In Proceedings of the 1991 SPIE Conference on Acquisition, Tracking and Pointing V. Orlando, FL, USA, 1991.
- [6] 李教. 多平台多传感器多源信息融合系统时空配准及性能评估研究[D]. 西安:西北工业大学, 2003.
- LI Jiao. Temporal and Spatial Alignment and Performance Assessment for Multi-Platform Multi-Sensor and Multi-Source Information Fusion System [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [7] 田雪怡. 多传感器数据关联与航迹整合技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.
- TIAN Xueyi. The Technology Research of Multi-Sensor Data Association and Track Fusion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [8] Dhar S. Application of A Recursive Method for Registration Error Correction in Tracking with Multiple Sensors[C]//In Proceedings of the 1993 American Control Conference. San Francisco, CA, 1993.
- [9] 贺席兵. 信息融合中多平台多传感器的时空对准研究[D]. 西安:西北工业大学, 2001.
- HE Xibing. Research on Space and Time Registration of Multi-Platform Multi-Sensor in Information Fusion [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2001. (in Chinese)
- (编辑:徐敏)

.....

(上接第 25 页)

- [9] 赵伟, 伞冶. 基于 q -高斯的模糊神经网络在飞机作战效能评估中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 674-678.
- ZHAO Wei, SAN Ye. Fuzzy Neural Network Based On q -Gaussian and Its Application in Operational Effectiveness Evaluation of Planes[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(6): 674-678. (in Chinese)
- [10] 陈向勇, 井元伟, 李春吉. 基于 Lanchester 方程的作战混合动态系统最优变招控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(6): 773-777.
- CHEN Xiangyong, JING Yuanwei, LI Chunji. Optimal Variable Tactic Control of Warfare Hybrid Dynamic System Based on Lanchester Equation[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(6): 773-777. (In Chinese)
- [11] 杨磊. 战术数据链协同分层模型及效能评估方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
- YANG Lei. Research on Tactical Data Link Interoperable Layered Model and Efficiency Evaluating Method [D]. Chanshan: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [12] 朱宝璠, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2版. 北京:航空工业出版社, 2006:63-64.
- ZHU Baoliu, ZHU Rongchang, XIONG Xiaofei. Aircraft Effectiveness Evaluation [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006:63-64. (in Chinese)
- [13] 黄俊, 孙义东, 武哲, 等. 战斗机对地攻击作战效能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(3): 354-357.
- HUANG Jun, SUN Yidong, WU Zhe, et al. Operational Effectiveness Analyses of Air-to-ground Strike for Battle-plane[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3): 354-357. (in Chinese)
- (编辑:徐敏)