

多传感器反馈分层融合算法性能研究

乔向东¹, 王宝树², 刘作良¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071)

摘要: Chang K. C. 于近期研究了两传感器非实时分层融合算法的稳态性能, 结果表明全反馈条件下的融合性能要劣于部分反馈, 特别当过程噪声较大时提高通信频率并不能改善全反馈算法的性能。与上述研究不同, 本文重点考察了融合系统中传感器数目对非实时有反馈分层融合算法性能的影响。研究结果表明: 当过程噪声较小时, 增加传感器的数目不仅不能改善全反馈算法的性能反而会使性能降低, 所得结论进一步推广和发展了 Chang K. C. 的研究成果。

关键词: 多传感器; 分层融合; 反馈

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2004)03-0028-05

由共同模型过程噪声或反馈产生的共同先验估计所导致的各传感器局部估计误差间的相关性及其对融合性能的影响, 是分布式融合算法研究的重点和难点。假设各局部状态估计误差之间统计独立, 文献[1]提出了简单融合算法。Bar-Shalom Y. 分析了模型过程噪声对融合估计误差协方差阵的影响并提出了互协方差组合融合算法^[2]。Chang K. C. 证明指出互协方差组合算法也仅是极大似然意义下的最优估计^[3]。文献[4]通过识别先验信息来避免先验信息对融合估计的双重影响并提出了分层融合算法。鉴于局部状态估计误差间的互协方差阵的计算较为复杂, 文献[5]提出了一种协方差交叉融合算法, 该算法摆脱了对互协方差阵的计算, 当局部状态估计满足一致性估计的条件时, 所得融合估计也为一致性估计。文献[6]首先定义了覆盖集中式、分布式的统一线性数据模型, 并提出了最优线性无偏估计融合算法, 当各传感器量测误差统计独立且传感器与融合中心实时通信时, 该算法与最优的集中式融合算法的性能是等价的。文献[7]对两传感器分层融合算法的稳态性能进行了研究, 并重点考察了通信频率及融合中心的反馈机制对融合性能的影响, 一个发现就是: 当过程噪声方差超过一定值后, 全反馈分层融合算法的性能很不稳定, 且增加通信频率也并未有所改善。既然此时增加通信频率没有作用, 那么, 假如我们固定传感器与融合中心的非实时通信频率, 全反馈分层融合算法的性能变化与传感器数目又有何种关系? 增加传感器的数目能否消除上述性能不稳定的现象? 这正是本文的研究目的。

1 多传感器分层融合算法

考虑 N 个传感器组成的分布式融合系统, 目标状态模型及各传感器的量测模型分别为

$$X_{k+1} = FX_k + Gv_k \quad (1)$$

$$Z_k^{(j)} = H^{(j)} X_k + w_k^{(j)} \quad j=1, \dots, N \quad (2)$$

X_k 为 k 时刻的目标状态向量, v_k 为零均值方差为 Q 的白高斯过程噪声向量, F 与 G 分别为状态转移矩阵和过程噪声控制矩阵; $w_k^{(j)}$ 为与 v_k 统计独立的零均值白高斯量测噪声, 方差为 $R_k^{(j)}$; $H^{(j)}$ 为量测矩阵。设 $\hat{X}_{k|k}^{(j)}$, $P_{k|k}^{(j)}$ 为传感器 j 的局部航迹状态估计及其协方差阵, 则分层融合算法如下

收稿日期: 2003-11-27

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(OOJS93.5.2 DZ0123)

作者简介: 乔向东(1970-), 男, 陕西佳县人, 讲师, 博士, 主要从事信息融合与信息安全研究;

王宝树(1940-), 男, 河南商丘人, 教授, 博士生导师, 主要从事信息融合与模式识别研究;

刘作良(1938-), 男, 四川内江人, 教授, 博士生导师, 主要从事信息融合与指挥自动化研究。

$$\mathbf{P}_{klk}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_{klk} = \mathbf{P}_{klk-n}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_{klk-n} + \sum_{j=1}^N \{ \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} \hat{\mathbf{X}}_{klk}^{(j)} - \mathbf{P}_{klk-n}^{(j)-1} \hat{\mathbf{X}}_{klk-n}^{(j)} \} \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{klk}^{-1} = \mathbf{P}_{klk-n}^{-1} + \sum_{j=1}^N \{ \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} \mathbf{P}_{klk-n}^{(j)-1} \} \quad (4)$$

式中, $\hat{\mathbf{X}}_{klk}$ 和 \mathbf{P}_{klk} 为融合状态估计及其误差协方差阵, $\hat{\mathbf{X}}_{klk-n}$ 和 \mathbf{P}_{klk-n} 为融合状态的 n 步预测估计及其协方差阵, $\hat{\mathbf{X}}_{klk-n}^{(j)} - \mathbf{P}_{klk-n}^{(j)-1}$ 为传感器 j 的 n 步预测估计及其协方差阵, n 为通信频率, $n=1$ 时传感器与融合中心为实时通信。

为了利用融合估计改善局部状态估计性能, 可将融合估计信息反馈至传感器, 包括全反馈和部分反馈 2 种反馈策略, 分别如下所示, $\forall j=1, \dots, N$

$$\hat{\mathbf{X}}_{klk-n}^{(j)} = \hat{\mathbf{X}}_{klk-n}, \quad \mathbf{P}_{klk-n}^{(j)} = \mathbf{P}_{klk-n} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{klk-n}^{(j)} = \hat{\mathbf{X}}_{klk-n} \quad (6)$$

文献 [8] 证明得出, 融合中心有无反馈并不影响实时分层融合算法的融合性能。

由于算法仅考虑了先验估计信息可能造成的误差相关性而忽略了模型过程噪声对误差相关性的贡献。因此, 仅当 $n=1$ 时或目标服从确定性状态转移模型时, 其航迹融合估计是最优的^[7], 其它情况下融合估计不仅是次优的而且融合估计的, 误差协方差并未准确反映算法的真实估计性能。

2 不同反馈策略下多传感器分层融合算法的稳态性能

文献 [7] 推导了两传感器全反馈分层融合算法的真实稳态估计协方差矩阵, 遗憾的是其计算结果并不能直接推广到传感器数目为任意值的情况。本节将首先对这一问题进行研究, 其次将讨论部分反馈条件下的相应的算法性能。

2.1 全反馈条件下 N 传感器分层融合算法稳态性能

由式 (1) 和式 (2) 可得, $\forall j=1, \dots, N$

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{F}^n \mathbf{X}_{k-n} + \sum_{i=1}^n \mathbf{F}^{n-i} \mathbf{G} \mathbf{v}_{k-n+i} \quad (7)$$

$$\mathbf{Z}_{k-n+i}^{(j)} = \mathbf{H}^{(j)} \mathbf{F}^i \mathbf{X}_{k-n} + \mathbf{w}_{k-n+i}^{(j)} + \sum_{h=1}^i \mathbf{H}^{(j)} \mathbf{F}^{i-h} \mathbf{G} \mathbf{v}_{k-n+h} \quad (8)$$

迭代传感器 j 的滤波方程并利用式 (5), 有:

$$\hat{\mathbf{X}}_{klk}^{(j)} = \mathbf{A}_n^{(j)} \hat{\mathbf{X}}_{k-nl k-n} + \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^{(j)} \mathbf{Z}_{k-n+i}^{(j)} \quad (9)$$

其中, $\forall i=1, \dots, n$

$$\mathbf{A}_0^{(j)} = \mathbf{I}, \quad \mathbf{A}_i^{(j)} = \mathbf{A}_{i-1}^{(j)} \mathbf{P}_{k-i+1, k-i+1}^{(j)} \mathbf{P}_{k-i+1, k-i}^{(j)-1} \mathbf{F}, \quad \mathbf{B}_i^{(j)} \mathbf{A}_{i-1}^{(j)} \mathbf{P}_{k-i+1, k-i+1}^{(j)} \mathbf{H}^{(j)} \mathbf{R}^{(j)-1} \quad (10)$$

将式 (5) 代入式 (3), 等式两边同时减去 $\mathbf{P}_{klk}^{-1} \mathbf{X}_k$, 并利用式 (9), 有

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{klk}^{-1} (\hat{\mathbf{X}}_{klk} - \mathbf{X}_k) &= -\mathbf{P}_{klk}^{-1} \mathbf{X}_k - (N-1) \mathbf{P}_{klk-n}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_{klk-n} + \sum_{j=1}^N \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} \hat{\mathbf{X}}_{klk}^{(j)} = \\ &= (N-1) \mathbf{P}_{klk-n}^{-1} \mathbf{F}^n (\mathbf{X}_{k-nl k-n} - \mathbf{X}_{k-n}) - \mathbf{P}_{klk}^{-1} \mathbf{X}_k - (N-1) \mathbf{P}_{klk-n}^{-1} \mathbf{F}^n \mathbf{X}_{k-n} + \\ &= \sum_{j=1}^N \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} [\mathbf{A}_n^{(j)} \hat{\mathbf{X}}_{k-nl k-n} + \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^{(j)} \mathbf{Z}_{k-n+i}^{(j)}] \end{aligned} \quad (11)$$

经过简单的数学运算, 并利用式 (8), 有:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{klk}^{-1} (\hat{\mathbf{X}}_{klk} - \mathbf{X}_k) &= \{ -(N-1) \mathbf{P}_{klk-n}^{-1} \mathbf{F}^n + \sum_{j=1}^N \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} \mathbf{A}_n^{(j)} \} (\hat{\mathbf{X}}_{k-nl k-n} - \mathbf{X}_{k-n}) + \sum_{j=1}^N \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} \mathbf{A}_n^{(j)} \mathbf{X}_{k-n} - \\ &= (N-1) \mathbf{P}_{klk-n}^{-1} \mathbf{F}^n \mathbf{X}_{k-n} + \sum_{j=1}^N \{ \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^{(j)} \mathbf{W}_{k-n+i}^{(j)} \} - \mathbf{P}_{klk}^{-1} \mathbf{X}_k + \\ &= \sum_{j=1}^N \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^{(j)} \mathbf{H}^{(j)} \mathbf{F}^i \mathbf{X}_{k-n} + \sum_{j=1}^N \mathbf{P}_{klk}^{(j)-1} \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i^{(j)} \sum_{h=1}^i \mathbf{H}^{(j)} \mathbf{F}^{i-h} \mathbf{G} \mathbf{v}_{k-n+h} \end{aligned} \quad (12)$$

文献 [7] 已经证明有如下等式成立:

$$A_n^{(j)} = - \sum_{i=1}^n B_i^{(j)} H^{(j)} F^i + F^n \quad (13)$$

利用上式和全反馈条件下的融合估计误差协方差计算公式,有:

$$P_{klk}^{-1} (\hat{X}_{klk} - X_k) = \{ - (N-1) P_{klk-n}^{-1} F^n + \sum_{j=1}^N P_{klk}^{(j)-1} A_n^{(j)} \} (\hat{X}_{k-nl k-n} - X_{k-n}) + \sum_{j=1}^N \{ P_{klk}^{(j)-1} \sum_{i=1}^n B_i^{(j)} w_{k-n+i}^{(j)} \} + \sum_{i=1}^n \{ \sum_{j=1}^N (P_{klk}^{(j)-1} \sum_{h=i}^n B_h^{(j)} H^{(j)} F^{h-i}) - P_{klk}^{(j)-1} F^{n-i} \} G v_{k-n+i} \quad (14)$$

定义

$$\Omega_x = \lim_{k \rightarrow \infty} \Omega_x(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} E [(\hat{X}_{klk} - X_k) (\hat{X}_{klk} - X_k)'] \quad (15)$$

由式(14)可得全反馈分层融合算法的稳态协方差矩阵服从如下离散 Lyapunov 方程,

$$\Omega_x = C_f \Omega_x C_f' + \Omega_f \quad (16)$$

其中

$$C_f = \lim_{k \rightarrow \infty} P_{klk} \{ - (N-1) P_{klk-n}^{-1} F^n + \sum_{j=1}^N P_{klk}^{(j)-1} A_n^{(j)} \} \quad (17)$$

$$\Omega_f = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n W_s^{(j)}(i) R^{(j)} W_s^{(j)}(i)' + \sum_{i=1}^n V_s^{(j)}(i) G Q G' V_s^{(j)}(i)' \quad (18)$$

$$W_s^{(j)}(i) = \lim_{k \rightarrow \infty} P_{klk} P_{klk}^{(j)-1} B_i^{(j)} \quad (19)$$

$$V_s^{(j)}(i) = \lim_{k \rightarrow \infty} P_{klk} \{ \sum_{j=1}^N (P_{klk}^{(j)-1} \sum_{h=i}^n B_h^{(j)} H^{(j)} F^{h-i}) - P_{klk}^{(j)-1} F^{n-i} \} \quad (20)$$

各式的极值求解只需将涉及的各类协方差阵的稳态值代入即可。

2.2 部分反馈条件下 N 传感器分层融合算法稳态性能

在融合中心存在部分反馈条件下,分层融合算法的融合公式为

$$P_{klk}^{-1} \hat{X}_{klk} = P_{klk-n}^{-1} \hat{X}_{klk-n} + \sum_{j=1}^N \{ P_{klk}^{(j)-1} \hat{X}_{klk}^{(j)} - P_{klk-n}^{(j)-1} \hat{X}_{klk-n}^{(j)} \} \quad (21)$$

$$P_{klk}^{-1} = P_{klk-n}^{-1} + \sum_{j=1}^N \{ P_{klk}^{(j)-1} - P_{klk-n}^{(j)-1} \} \quad (22)$$

鉴于改变传感器的数目只需调整式(23)和式(24)中的 N 值,因此可直接将文献[7]关于两传感器部分反馈分层融合算法的真实稳态性能的研究成果推广到传感器数目为任意 N 值的情况下,有如下离散 Lyapunov 方程

$$\Omega_x = C_p \Omega_x C_p' + \Omega_p \quad (23)$$

其中

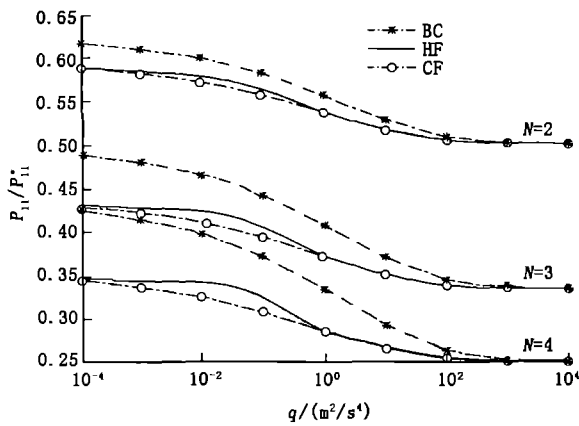
$$C_p = \lim_{k \rightarrow \infty} P_{klk} [\sum_{j=1}^N (P_{klk}^{(j)-1} A_n^{(j)} - P_{klk-n}^{(j)-1} F^n) + P_{klk-n}^{-1} F^n] \quad (24)$$

$$\Omega_p = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n W_s^{(j)}(i) R^{(j)} W_s^{(j)}(i)' + \sum_{i=1}^n V_s^{(j)}(i) G Q G' V_s^{(j)}(i)' \quad (25)$$

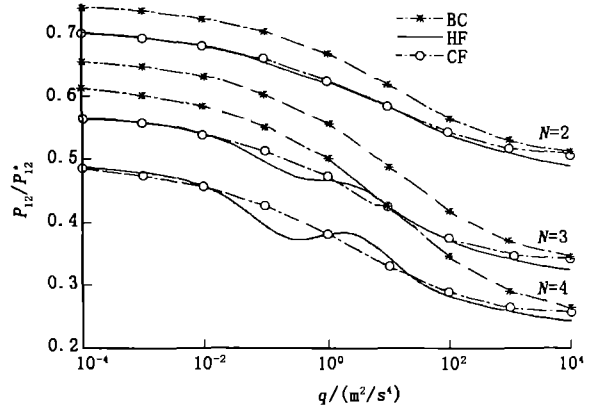
上式中 $W_s^{(j)}(i)$ 和 $V_s^{(j)}(i)$ 与式(19)和式(20)定义完全相同。

3 仿真

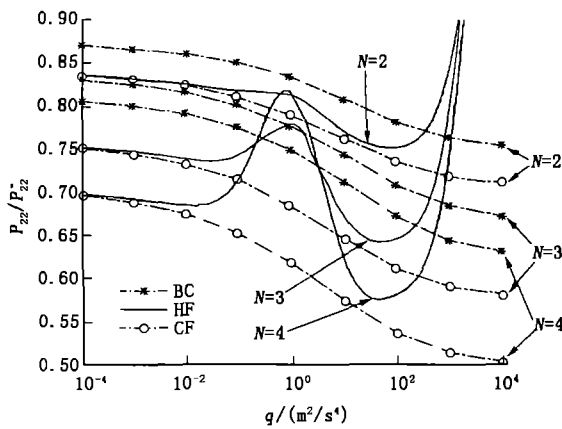
假设目标做匀速运动,过程噪声方差 $q \in [10^{-4}, 10^4]$, 传感器数目 N 分别取 2、3、4, 各传感器的观测误差统计独立且均为零均值、方差 $R=1$ 的白噪声。采样周期 $T=1s$, $n=2$, 对应的目标机动指数 $\lambda \in [0.01, 100]$ 。图 1 给出了全反馈分层融合(HF, $n=2$)算法的稳态协方差矩阵 P 与单传感器稳态协方差矩阵 P^* 对应元素的比值及两矩阵对应协方差椭圆面积的的比值 A/A^* 。图 2 给出了部分反馈分层融合($n=2$)算法的相应结果,限于篇幅,这里仅给出了 P_{22}/P_{22}^* 和 A/A^* 。另外,还对互协方差组合航迹融合算法(BC)和集中式融合算法(CF)的融合性能进行了仿真。



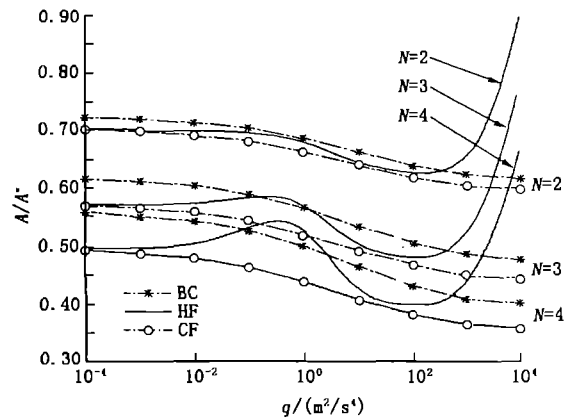
(a) P_{11}/P_{11}^*



(b) P_{12}/P_{12}^*

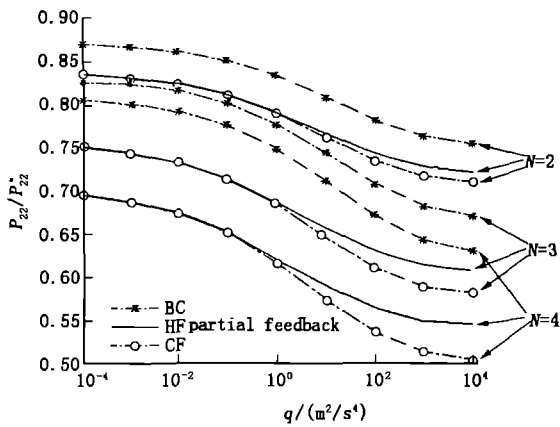


(c) P_{22}/P_{22}^*

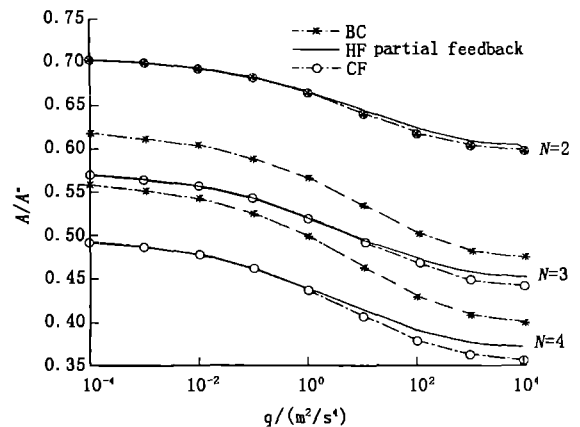


(d) A/A^*

图1 全反馈分层融合 (n=2) 算法融合估计性能评估



(a) P_{22}/P_{22}^*



(b) A/A^*

图2 部分反馈分层融合 (n=2) 算法融合估计性能评估

依据仿真结果, 可以得出如下结论:

1) 当固定通信频率, 增加传感器数目时, 全反馈非实时分层融合算法的性能当过程噪声相对较小 (而不是较大) 时, 就已经不稳定, 且传感器数目越大性能起伏的幅度就越大, 特别速度融合估计性能表现尤为明显。例如, 在 $q=1$ 附近, 4 传感器的速度融合估计性能甚至劣于 2 传感器的, 即增加传感器反而会使速度估计性能下降。该结论进一步补充、完善了文献 [7] 的研究结果

2) 当过程噪声方差超过一定值后, 不同传感器数目的全反馈非实时分层融合算法的整体性能均急剧下降, 融合已不能带来任何效益, 这一点也就是文献 [7] 的所得。

3) 部分反馈算法的性能要好于全反馈算法的性能。尽管随着传感器数目的增加, 部分反馈非实时分层融合算法较实时(最优)算法的性能下降幅度也有所增加, 但算法的融合性能仍基本保持稳定。

4 结论

文献 [7] 考察了传感器与融合中心的通信频率对非实时有反馈分层融合算法稳态性能的影响, 本文研究了此时传感器数目与算法融合性能的关系, 上述结论也进一步推广了文献 [7] 的研究结果, 从另一侧面验证了融合信息的质量比数量更为重要的论断。

参考文献

- [1] Bar - Shalom Y, Forfman T E. Tracking and Data Association [M]. San Diego CA: Academic Press, 1988.
- [2] Bar - Shalom Y, Campo L. The Effect of The Common Process Noise on The Two - Sensor Fused - Track Covariance [J]. IEEE Trans On AES, 1986, AES - 22: 803 - 805.
- [3] Chang K. C., Saha R H, Bar - Shalom Y. On Optimal Track - to - Track Fusion [J]. IEEE Trans On AES, 1997, 33 (4): 1271 - 1276.
- [4] Bar - Shalom Y, Li X R. Estimation and Tracking: Principles, Techniques and Software [M]. Dedham, MA: Artech House, 1993.
- [5] Hall D L, Linas J. Handbook of Multisensor Data Fusion [M]. Boca Raton, WA: CRC Press, 2001.
- [6] Li X R, Zhw Y M, Han C Z. Unified Optimal Linear Estimation Fusion - Part I: Unified Model and Fusion Rules [A]. Proceedings of 3rd International Information Fusion Conference. Paris, France: ISIF [C]. 2000; MoC2 - 10 - Moc2 - 17.
- [7] Chang K C, Zhi T, Saha, R H. Performance Evaluation of Track Fusion with Information Matrix Filter [J]. IEEE Trans On AES, 2002, 38 (2): 455 - 466.
- [8] 何友, 王国宏, 陆大铨, 等. 多传感器信息融合及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [9] 李教, 敬忠良, 王安. 多平台多传感器多源信息融合中的时空对准研究 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3 (5): 56 - 60.

(编辑: 门向生)

A Study of Performance of Multi - sensor Hierarchical Fusion Algorithm with Feedback

QIAO Xiang - dong¹, WANG Bao - shu², LIU Zuo - liang¹

(1. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Of late years, steady performance of two sensor hierarchical fusion algorithm with non - full - rate communication was evaluated by Chang K. C., the result indicates that the performance of the algorithm with complete feedback is not so good as that of the algorithm with partial feedback and moreover, in the case of complete feedback, the increment of data rate does not improve the performance. In the research, more attention is paid to the effect of the number of sensors on the steady performance of the algorithm with different feedback mechanism. It shows that for the algorithm with complete feedback, in the case of process noise being relatively small, the increase in the number of sensors does not improve but worsens the performance. This conclusion is an extension and development of the work by Chang K. C.

Key words: multi - sensor; hierarchical fusion; feedback mechanism