

信息融合体系结构优化数学原理

董志荣

(第七一六研究所 连云港 222006)

摘要: 本文首先进行了航迹融合与不融合体系结构性能比较,接着进行了量测融合与不融合、航迹—量测融合与不融合性能比较,最后给出了集中式体系结构性能不低于一般分布式体系结构性能的结论。

关键词: 航迹融合 航迹—量测融合 量测融合 体系结构优化

Optimal Mathematical Principles for Information Fusion Architectures

Dong Zhirong

(Jiangsu Automation Research Institute, LianYungang 222006)

Abstract: This paper firstly compared architectures performance for track fusion and track nonfusion. Secondly compared architectures performance for measurements fusion and measurements nonfusion, track-measurement fusion and nonfusion. Finally gived colletive architectures better performance than general distributive architectures.

Key words: track fusion, track-measurement fusion, measurement frsion, architectures optimization

1 航迹融合与不融合体系结构的性能比较

文献 1] 中 1.6 节定性地论述了多传感器融合比不融合好;文献 2] 中 1.1 节介绍文献 3] 时指出:文献 3] 已从理论证明了多传感器信息融合系统的性能不会低于传统的使用单一传感器的系统的性能。实际上在该论文第 3 节“用多传感器的满意性”中,用不长的文字,以负风险率作优化准则,对单传感器与多传感器数据融合,论证了多传感器数据融合的满意性,论证方法如下:

设 y_1 为原传感器集,其相应的目标状态估计为 $\hat{x}(y_1)$, $R[\hat{x}(y_1)]$ 为传感器集 y_1 对目标状态估计风险; y_2 为增加的传感器集,其相应的目标状态估计为 $\hat{x}(y_1, y_2)$, $R[\hat{x}(y_1, y_2)]$ 为传感器集 y_1 和 y_2 的对目标状态估计风险,论文指出下式显然成立:

$$\begin{aligned} \min_{\hat{x}(y_1)} R[\hat{x}(y_1)] &\geq \min_{\hat{x}(y_1, y_2)} R[\hat{x}(y_1, y_2)] \\ \hat{x}(y_1) &\quad \hat{x}(y_1, y_2) \end{aligned} \quad (1)$$

并在该论文第 4 节模型化问题中进行了数学分析。

文献 4] 指出:当考虑目标机动噪声引起互协方差^[5,6]的作用,航迹—航迹融合算法的性能可以显著改善^[7,8]。具体地证明了:当仅当互协方差矩阵为正定时,航迹对航迹正确互联的概率能够提高^[8]。

下面我们严格陈述上述命题,并给出简洁的严格数学证明。

命题 1 设任意两个搜索(警戒、侦察)传感器 S_1 和 S_2 , $\hat{x}(t)$ 和 $\hat{x}(t)$ 分别为 S_1 和 S_2 同时、同域、同目标维数的任意两条航迹,则融合航迹 $\hat{x}(t)$ 不低于被融合航迹的性能。

证明: 非常明显两传感器 S_1 和 S_2 的同时、同域、同目标维数是其信息融合的必要条件。在同时、同域、同目标维数条件下,由于目标运动公共动态噪声的影响,其融合航迹的误差协方差阵,不仅与被融合航迹误差协方差阵有关,而且与被融合航迹的互协方差阵有关。根据文献 6,9] 分别可以得出基于贝叶斯最小均方误差准则的近似融合公式和基于最大似然准

则的融合公式,其形式完全相同,它们是

$$\begin{cases} \hat{x} = \hat{x}^i + (p^i - p^{ij})^{-1}(p^i + p^j - p^{ij} - p^{ii})^{-1}(x^j - \hat{x}^i) \\ p = p^i - (p^i - p^{ij})^{-1}(p^i + p^j - p^{ij} - p^{ii})^{-1}(p^i - p^{ii}) \end{cases} \quad (2)$$

要证明融合航迹 $\hat{x}(t)$ 不低于被融合航迹的性能(比如被融合航迹 \hat{x}^i) ,则只要证明下式即可。

$$p \leq p^i \quad (3)$$

由式(2)与式(3),而只要证明:

$$(p^i - p^{ij})^{-1}(p^i + p^j - p^{ij} - p^{ii})^{-1}(p^i - p^{ii}) \geq 0 \quad (4)$$

根据矩阵论中的一个命题(见文献[10]的 p.314):

如果 A 是 n 阶非负定阵, C 是 nxm 阶矩阵, 则 C'AC 为非负定阵。因为 $p^i - p^{ij}$ 为对称阵, 所以要证明式(4)成立, 只要证明下式成立即可。

$$(p^i + p^j - p^{ij} - p^{ii})^{-1} \geq 0 \quad (5)$$

由于:

$$\begin{aligned} p^i + p^j - p^{ij} - p^{ii} &= E\{(\hat{x}^i - \hat{x}^j)(\hat{x}^i - \hat{x}^j)'\} \\ &= E\{[(\hat{x}^i - \hat{x}) - (\hat{x}^j - \hat{x})][(\hat{x}^i - \hat{x}) - (\hat{x}^j - \hat{x})]'\} \end{aligned}$$

是方差阵, 而方差阵是非负的^[10], 所以:

$$p^i + p^j - p^{ij} - p^{ii} \geq 0 \quad (6)$$

由式(6)可得式(5), 证毕。

式(2)讨论:

(1) 当 $p^{ij} = p^{ji} = 0$ 时, 式(2)变为

$$\begin{cases} \hat{x} = \hat{x}^i + p^i(p^i + p^j)^{-1}(x^j - \hat{x}^i) \\ p = p^i - p^i(p^i + p^j)^{-1}p^i \end{cases} \quad (7)$$

若 $p^i > 0, p^j > 0$, 根据文献[11]的 p.384 则:

$$p^i + p^j > 0 \quad (8)$$

(2) 当 $p^i = p^j, p^{ij} = p^{ji} = 0$ 时, 则:

$$p = p^i(p^i + p^j)^{-1} = \frac{1}{2}p^i \quad (9)$$

即两同型传感器融合航迹误差协方差阵是被融合误差协方差阵之半。

2 量测融合与不融合、航迹—量测融合与不融合性能比较

在各种体系结构中,对信息融合来说,比较有意义的体系结构有:集中式、分级式、混合式和分布式。分散式结构无自动信息融合可言,完全靠人工综合。在集中式、分级式、混合式和分布式之间,有实际意义的比较是在集中式与分布式之间。为了集中式与分布式融合性能的比较,我们需要将分布式概念进一步明确化。我们将分布式分为两类:一类称一般分布式,意指在多传感器信息融合中,每个传感器的量测均在本地完成局部航迹处理,传感器之间一般只作航迹传输,不作大量的量测传输,在融合中心进行航迹融合,这种一般分布式在 C³I 系统中普遍采用;另一类称全分布式,意指在多传感器信息融合中,每个传感器的量测在本地完成局部航迹处理,并将航迹向融合中心传输的同时,仍把量测传输到融合中心参与航迹与航迹、量测与航迹甚至量测与量测融合,或者更扩大而言,任意两个传感器之间均既作航迹传输也作量测传输,每个传感器处都是一个融合中心。这种全分布式能做到航迹与量测资源共享。因此,要作集中式和分布式融合体系结构性能的比较,其实质是进行量测—量测、量测—航迹、航迹—航迹融合体系结构与单纯的航迹—航迹融合体系结构的性能比较。

这个问题,在文献[12]中指出^[9]:文献[6]推导的融合公式的性能(叫做“状态向量融合方法”)要逊于最优模式(叫做量测融合方法)。事实上,我们已经证明了融合航迹不低于不融合航迹的性能;下面我们可以证明:量测融合不低于量测不融合的性能。

命题 2 设任意两个搜索(警戒、侦察)传感器 S₁ 和 S₂, z_k¹ 和 z_k² 分别为 S₁ 和 S₂ 的同时、同域、目标同维的任意两个独立的量测, 则融合量测 \hat{z}_k 不低于被融合量测的性能。

证明 由文献[12]或式(2)(3),可以给出融合量测及其协方差公式为

$$\begin{cases} \hat{z}_k = z_k^i + R_k^i(R_k^i + R_k^j)^{-1}(z_k^j - z_k^i) \\ \hat{R}_k = [(R_k^i)^{-1} + (R_k^j)^{-1}]^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

其中: R_kⁱ、R_k^j 是量测向量 z_kⁱ、z_k^j 的协方差矩阵, \hat{R}_k 为 \hat{z}_k 的协方差矩阵。

不失一般性,我们证明融合量测 \hat{z}_k 不低于 z_kⁱ 性

能。

由式(10)的第 2 个式子,可以得出:

$$\hat{R}_k^{-1} - (R_k^i)^{-1} = (R_k^j)^{-1} \quad (11)$$

因为当 $R_k^i > 0$ 时,因 $(R_k^i)^{-1} > 0$,所以:

$$\hat{R}_k^{-1} > (R_k^i)^{-1} \quad (12)$$

则:

$$\hat{R}_k < R_k^i \quad (13)$$

而当 $R_k^i = 0$ 时,由式(10)的第 1 个式子得:

$$\hat{z}_k = z_k^j \quad (14)$$

所以 \hat{z}_k 误差协方差阵等于 z_k^j 误差协方差阵,即:

$$\hat{R}_k = R_k^j = 0 \quad (15)$$

综合式(13)和(15)可得:

$$\hat{R}_k \leq R_k^i \quad (16)$$

证毕。

命题 3 设任意两个搜索(警戒、侦察)传感器 S_1 和 S_2 传感器航迹直接融合量测,则融合后的航迹 \hat{x}_{kk}^f 不低于融合前航迹 x_{kk-1}^f 的性能。

证明 由文献[13],其基本思路是以公共的动态方程为基础,将传感器 S_1 和 S_2 量测组成扩维的量测方程(量测噪声也扩维),可以得到融合航迹 x_{kk}^f 和融合协方差公式:

$$\begin{cases} \hat{x}_{kk}^f = \hat{x}_{kk-1}^f + k_k^f [z_k - H_k \hat{x}_{kk-1}^f] \\ k_k^f = \hat{p}_{kk-1}^f H_k^f [H_k \hat{p}_{kk-1}^f H_k^f + R_k]^{-1} \\ \hat{p}_{kk}^f = [I - k_k^f H_k] \hat{p}_{kk-1}^f \\ \hat{p}_{kk-1}^f = \Phi \hat{p}_{k-1}^f \Phi' + \Gamma Q_{k-1} \Gamma' \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)第 3 个式子有:

$$\hat{p}_{kk-1}^f - \hat{p}_{kk}^f = k_k^f H_k \hat{p}_{kk-1}^f \geq 0 \quad (18)$$

则

$$\hat{p}_{kk}^f \leq \hat{p}_{kk-1}^f \quad (19)$$

证毕。

3 集中式与一般分布式融合体系结构性能比较

由前两节我们已经证明了:

- (1) 航迹—航迹融合比不融合体系结构“好”;
- (2) 量测融合比不融合性能“好”;
- (3) 航迹—量测融合比不融合“好”。

由于集中式融合既包括量测—量测融合,又包括航迹—量测融合,实质是数据互联。而一般分布式只作航迹传输,不作大量的量测传输,在融合中心进行航迹融合,这样在融合中心一般不再进行航迹与其他站量测的融合,更不做融合中心的量测与其他站量测的融合,由以上命题完全可以得出:集中式融合比一般分布式融合体系结构“好”。我们把此结论归纳成如下命题:

命题 4 设任意两个搜索传感器 S_1 和 S_2 在量测同时、目标同域和同维、完全通信(同步、无误码、不破损)的条件下,集中式融合比一般分布式融合体系结构“好”。

4 小 结

本文证明了“航迹—航迹融合比不融合体系结构“好”,量测融合比不融合体系结构“好”,航迹—量测融合比不融合“好”,集中式融合比一般分布式融合体系结构“好”。

上述结论是在量测同时、目标同域和同维、完全通信(同步、无误码、不破损)条件下获得的。

参 考 文 献

- 1 Hall D L. Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion, Artech House INC, 1992.
- 2 杨静宇、鄢永革、刘雷健、李根深.《战场数据融合技术》.兵器工业出版社,1994.
- 3 Richardson J M Marsh K A. Fusion of Multisensor Data, International Journal of Robotics Research Vol. 7(6), 1988. pp. 78 - 96.
- 4 Saha R K Chang K C. A Efficient Algorithm for Multisensor Track Fusion, IEEE Trans. On Vol. AES - 34(1), 1998, pp. 200 - 210.
- 5 Bar - shalom Y, On the Track to Track Correlation Problem, IEEE Trans. On Automatic Control, Vol. AC - 26, No. 2, 1981, pp. 571 - 572.

得系统更容易且可靠实现。

5 结 语

LED 像素的复合应用,有效地解决了提高 LED 显示屏体解析度和降低成本这一最大的矛盾,将极大地提高全彩色 LED 显示屏的性能价格比。同时,必将极大地推动全彩色 LED 显示屏在国内的普及和应用。

参 考 文 献

- 1 杨永德等编.《光电技术实用电路精选》.成都科技大学出版社,1996.
- 2 刘振玉编.《光电技术》.北京理工大学出版社,1990.
- 3 史锦珊等编.《光电子学及其应用》.机械工业出版社,1991.
- 4 W. T. BANQ(美国).《光导体光检测器》.电子工业出版社,1992.
- 5 陈永普编.《新编 555 集成电路应用 800 例》.电子工业出版社,2000.
- 6 Bar-shalom Y, Campo L the Effect of the Common Process Noise on the Two Sensor Fused-Track Covariance, IEEE Trans. on Vol. AES-22(6), 1986, pp. 803-805.
- 7 Saha R K Track-to-Track Fusion with Dissimilar Sensors, IEEE Trans. on Vol. AES-33(3), 1996, pp. 1021-1029.
- 8 Saha R K Effect of Common Process Noise on Two-Sensor Track Fusion, AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 19(4), 1996, pp. 829-835.
- 9 Chang K C, Saha R K Bar-shalom Y. on Optimal Track-to-Track Fusion, Vol. AES-33(4), 1997, pp. 1271-1276.
- 10 李树英、吴捷.《动态系统滤波方法》.广东科技出版社,1983.
- 11 B. D. O 安德森.《最优滤波》.国防工业出版社,1983.
- 12 Roecker J A, Mcgille C D. Comparison of Two-Sensor Tracking Methods Based on State Vector Fusion and Measurement Fusion, IEEE Trans. on Vol. AES-24(4), 1988, pp. 447-449.
- 13 Haimovich A M, Yosko J, Greenberg R J, Parisi M A, Becker D Fusion of Sensors with Dissimilar Measurement/Tracking Accuracies, IEEE Trans. on Vol. AES-29(1), 1993, pp. 245-250.
- 14 Castalla F R Theoretical Performance of Multisensor Track-to-Track Correlation Technique, IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, Vol. 143(6), 1995, pp. 281-285.
- 15 Deb S, Pattipati K R and Bar-Shalom Y A Multisensor-Multitarget Data Association Algorithm for heterogeneous Sensors, IEEE Trans. Vol. AES-29(2), 1993, pp. 560-568.
- 16 Blair W D and Rice T R, Alouani A T and Xia P. Asynchronous Data Fusion for Target Tracking with a Multi-Tasking Radar and Optical Sensor, SPIE Vol. 1482, Acquisition, Tracking and Pointing V(1991), pp. 234-245.

作者简介:刘德全,男,1972 年出生,工程师。1994 年毕业于华东船舶工业学院计算机科学与工程系,同年分配到中国船舶重工集团公司第七研究院第七一三研究所工作。现主要从事电子显示屏的研究与开发、网络规划与设计、应用软件的开发等工作。

(上接第 33 页)

作者简介:董志荣,男,1937 年出生。716 所科技委主任,研究员,博士生导师。研究领域:武器系统工程、C³I 系统理论、工程数学。已发表论文 90 余篇,出版著作七本。