

文章编号: 1002-0411(2003)06-0517-04

基于 NP 准则的水声信号检测系统信息融合

白银生¹, 赵俊渭¹, 相明²

(1. 西北工业大学声学工程研究所, 陕西 西安 710072; 2. 西安交通大学信控学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 多基阵数据融合技术在水声信号处理中具有重要意义, 本文给出了基于 Neyman-Pearson 准则的多传感器分布式水声检测信息融合系统, 研究了全局最优融合系统以及局部传感器的最优判决准则. 在假定各传感器检测独立的情况下, 对三传感器的情况进行了仿真. 结果表明, 检测系统的性能有明显提高.*

关键词: 多传感器; 分布式检测; 信息融合; 水声信号

中图分类号: TP13

文献标识码: B

INFORMATION FUSION OF UNDER WATER ACOUSTIC SIGNAL DETECTION BASED ON NP CRITERION

BAI Yin-sheng¹, ZHAO Jun-wei¹, XIANG Ming²

(1. Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract: The multi-sensor data fusion plays a valuable role in the underwater acoustic signal processing. In this paper, a multi-sensor distributed detection data fusion system based on Neyman-Pearson criterion is presented. The global optimal multi-sensor data fusion system and the local optimal decision rules are studied, respectively. On the condition that all sensors conduct the detection independently, simulations are carried out for triple-sensor data fusion, and the results show that the novel system has better performance.

Keywords: multi-sensor; distributed detection; information fusion; sonar signal

1 引言 (Introduction)

近年来,随着军事作业平台的多传感器系统的形成,多传感器信息成为研究的热点问题,其思想就是如何协调多传感器的信息而得到战场情况的最优估计.同样,随着潜艇降噪技术的发展,特别是核潜艇的出现,如何有效探测水下目标也已成为现代水声信号处理的一个重要研究课题.在水声信号检测过程中,经常需要多部探测设备共同完成对目标的探测任务.传统的处理方法是,各部探测设备独立地进行观测和判决,因此,对各探测设备的观测信息或处理结果,没有进行有效的综合.如果采用多传感器检测融合技术对各探测设备的探测信息进行融合,则可有效提高水声信号检测系统的作用距离和检测概率.数据融合系统本身具有良好的性能稳健性、宽广的时空覆盖区域、很高的测量维数和良好的目标空间分辨力,以及较强的故障容错与系统重构能力

等潜在特点.

2 分布式检测融合系统 (Distributed detection fusion system)

分布式水声检测融合系统如图 1 所示.融合系统由融合中心及 N 部传感器构成.各部传感器进行独立的检测和判决,并将判决结果 $u_i (i = 1, \dots, N)$ 送至融合中心, $u_i = 1$ 表示该传感器判断目标出现, $u_i = 0$ 表示该传感器判断没有目标.融合中心对多部传感器的判决进行融合,并给出最终的判决 u_0 .

设分布式并行多传感器检测融合系统由融合中心和 N 部传感器构成.我们考虑二元假设检验问题,用 H_0 表示零假设,用 H_1 表示备选假设.两个假设的先验概率分别为 $P(H_0) = P_0$, $P(H_1) = P_1$.用随机向量 Y_i 表示第 i 部传感器的观测,并用 y_i 表示 Y_i 的某一取值.记第 i 部传感器观测的条件概率密

* 收稿日期: 2002-09-17

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目 (514460401, 514401020)

度为 $f_{Y_i|H_j}(y_i|H_j)$, 式中 $j=0,1$. 用随机变量 U_i 表示第 i 部传感器的判决, 并用 u_i 表示 U_i 的某一取值, $u_i=0$ 表示该传感器的判决为 H_0 , $u_i=1$ 表示该传感器的判决为 H_1 . 根据各部传感器的判决 U_i , 可以构造一判决向量 $U=(U_1, U_2, \dots, U_N)$, 并用 $u=(u_1, u_2, \dots, u_N)$ 表示 U 的某一取值. 融合中心以判决向量 U 为观测量进行假设检验, 并形成最终的判决 U_0 . 用 P_{Di} 和 P_{Fi} 表示第 i 部传感器的检测及虚警概率. 融合系统的检测和虚警概率由 P_D^f 和 P_F^f 表示.

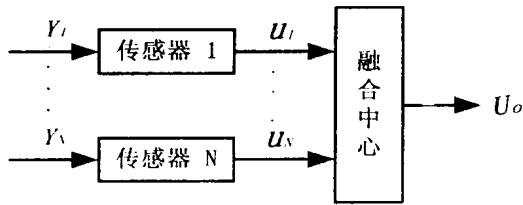


图1 分布式检测融合系统
Fig.1 Distributed detection fusion system

3 多传感器全局最优融合系统 (Global optimal fusion system of multi-sensors)

对分布式 NP (Neyman-Pearson) 检测融合系统而言, 系统的优化准则为: 在给定虚警概率的条件下, 使系统的检测概率达到最大. 因此, 与 Bayes 融合系统的优化问题不同, NP 融合系统的优化问题是一个在附加条件约束下的优化问题. 采用拉格朗日乘积因子法, NP 融合系统的优化问题可描述为: 在 $P_F^f = \alpha$ 的条件下, 使下面的目标函数取得最大值:

$$F = P_D^f - \lambda(P_F^f - \alpha) \quad (1)$$

融合系统的检测和虚警概率可以表示为:

$$P_D^f = \sum_u P(U_0 = 1 | u) P(u | H_1)$$

$$P_F^f = \sum_u P(U_0 = 1 | u) P(u | H_0)$$

将以上两式代入(1)式, 可得:

$$F = \sum_u P(U_0 = 1 | u) P(u | H_1) - \lambda \left(\sum_u P(U_0 = 1 | u) P(u | H_0) - \alpha \right)$$

$$= \sum_u P(U_0 = 1 | u) [P(u | H_1) - \lambda P(u | H_0)] + \alpha \lambda \quad (2)$$

则根据(2)式便可确定融合中心及各部传感器的最优判决规则.

设各部传感器的判决规则已经确定, 则对于任意给定的虚警概率 $\alpha, 0 < \alpha < 1$, 使系统检测概率达

到最大的最优融合规则为:

$$P(U_0 = 1 | u) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } \Lambda(u) > \lambda \\ \gamma, & \text{如果 } \Lambda(u) = \lambda \\ 0, & \text{如果 } \Lambda(u) < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Lambda(u) = P(u | H_1) / P(u | H_0)$, 融合中心的判决门限 λ 及随机化因子 γ 由给定的系统虚警概率决定:

$$\sum_{\Lambda(u) > \lambda} P(u | H_0) + \gamma \sum_{\Lambda(u) = \lambda} P(u | H_0) = \alpha \quad (4)$$

需要指出的是, 由于判决向量 u 取值的离散特性, 为了使融合系统可以工作在任意给定的虚警概率, 融合中心采用随机化判决规则是必要的. 下面, 我们给出在融合规则已经确定的条件下各部传感器的最优判决规则.

4 局部传感器的最优判决规则 (Optimum decision rule of local sensor)

设融合中心的判决规则已经确定, 则对于任意给定的虚警概率 $\alpha, 0 < \alpha < 1$, 使系统检测概率达到最大的各部传感器的最优判决规则为:

$$f_{Y_k|H_1}(y_k | H_1) \sum_{u_k} A(u_k) P(u_k | y_k, H_1) \geq_{H_0} \lambda \cdot$$

$$f_{Y_k|H_0}(y_k | H_0) \sum_{u_k} A(u_k) P(u_k | y_k, H_0) \quad (5)$$

式中

$$u_k = (u_1, \dots, u_{k-1}, u_{k+1}, \dots, u_N)$$

$$A(u_k) = P(U_0 = 1 | u_k, u_k = 1) -$$

$$P(U_0 = 1 | u_k, u_k = 0), k = 1, 2, \dots, N$$

为了获得融合系统的全局最优解, 需要根据各部传感器最优融合规则和全局最优融合规则联合求解最优融合规则及 N 部传感器的最优判决规则.

当各部传感器的观测条件独立时, 传感器的最优判决规则可简化为简单的似然比门限判决. 因此, 求解各部传感器的最优判决规则, 就可简化为求解其最优判决门限. 且融合中心采用一给定的单调融合规则, 则对于任意给定的虚警概率 $\alpha, 0 < \alpha < 1$, 使系统检测概率达到最大的各部传感器的最优判决规则为似然比判决, 即:

$$\frac{f_{Y_k|H_1}(y_k | H_1)}{f_{Y_k|H_0}(y_k | H_0)} \geq_{H_0} T_k, k = 1, 2, \dots, N$$

而其最优判决门限为:

$$T_k = \lambda \frac{\sum_{\bar{u}_k} A(\bar{u}_k) P(\bar{u}_k | H_0)}{\sum_{\bar{u}_k} A(\bar{u}_k) P(\bar{u}_k | H_1)} \quad (6)$$

式中

$$\mathbf{u}_k = (u_1, \dots, u_{k-1}, u_{k+1}, \dots, u_N)$$

$$A(\mathbf{u}_k) = P(U_0 = 1 | \mathbf{u}_k, u_k = 1)$$

$$- P(U_0 = 1 | \mathbf{u}_k, u_k = 0)$$

$$P(U_0 = 1 | u_1, u_2, \dots, u_N) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } A(u_1, u_2, \dots, u_N) > \lambda \\ \gamma, & \text{如果 } A(u_1, u_2, \dots, u_N) = \lambda \\ 0, & \text{如果 } A(u_1, u_2, \dots, u_N) < \lambda \end{cases} \quad (7)$$

又,由于融合系统需要满足给定的虚警概率 α ,即满足下式:

$$P_F^f = \sum_u P(U_0 = 1 | \mathbf{u}) P(\mathbf{u} | H_0) = \alpha \quad (8)$$

这样,为了获得全局最优解,就需要联合求解由(6)~(8)式给出的 $N+2^N+1$ 个非线性耦合方程.我们采用数值迭代方法求解系统的全局最优解.

5 仿真实验 (Simulation experiments)

假设融合系统中各部传感器的观测是服从高斯分布的,且条件概率密度函数为:

$$f_{Y_i|H_1}(y_i | H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y_i - a_i)^2}{2}\right)$$

$$f_{Y_i|H_0}(y_i | H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_i^2}{2}\right)$$

下面,我们给出例子,研究独立传感器融合系统以及传感器判决规则独立设计的融合系统.考虑独

根据式(3)和式(6),联合求解最优融合规则及各部传感器的最优判决门限.

根据式(3),这 2^N 个条件概率应满足以下条件:

立传感器融合系统的全局最优解,容易验证,由于各部传感器的观测服从高斯分布,故传感器观测的似然比不含有概率性质.因此,根据文献[5],全局最优融合系统的融合规则为一确定性判决规则.

我们考虑三传感器融合系统,设 $a_1 = 2.0, a_2 = 1.8, a_3 = 1.6$,采用解耦方法给出系统的全局最优解,则融合系统的 ROC 曲线如图 2 所示.图中,实线代表融合系统的检测性能,虚线则代表各部传感器采用 NP 判决规则时的检测性能.由图 2 可以看出,最优融合系统的检测性能比单部传感器的检测性能有明显提高.固定 $P_F^f = 10^{-2}$, $a_2 = 2.0, a_3 = 1.8$,则融合系统检测概率随 a_1 的变化关系如图 3 所示.由图 3 可以看出,当 a_1 的取值远远高于 a_2 和 a_3 的取值时,融合系统的检测性能主要由传感器 1 的检测性能决定,且相对于传感器 1,融合系统的检测性能并无明显改进.但是,当 a_1 的取值远远低于 a_2 和 a_3

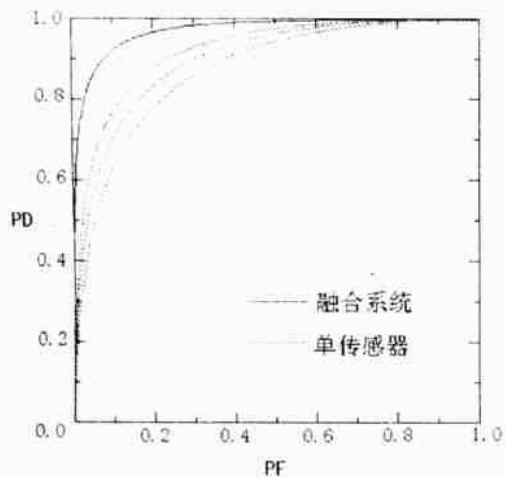


图 2 融合系统的 ROC 曲线

Fig. 2 ROC of fusion system

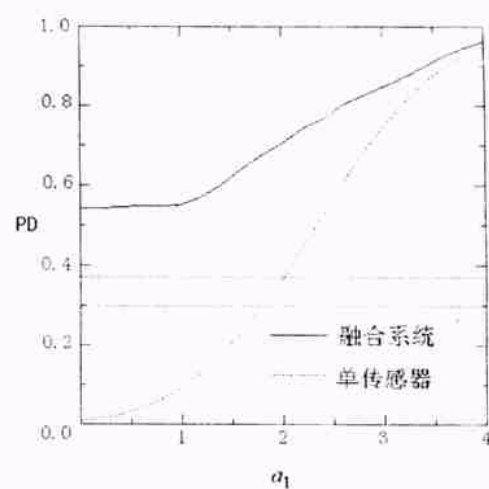


图 3 系统检测概率随 a_1 的变化关系

Fig. 3 Relationship between detection probability and a_1 fusion center

的取值时,融合系统的检测性能仍然明显优于各部传感器的检测性能.此时,融合系统的这一检测性能主要是由传感器 2 及传感器 3 的检测性能决定的.

6 结束语 (Conclusion)

本文给出了分布式多传感器检测融合算法,并对双传感器服从高斯分布的情况进行了仿真,结果表明融合检测性能优于单传感器的检测性能.数据融合技术在水声探测系统中的应用将有效提高其检测性能.

参 考 文 献 (References)

- [1] Thomopoulos S C A, Viswanathan R, Bougoulas D K. Optimal decision fusion in multiple sensor systems [J]. IEEE Trans. on AES, 1987, **23**(5): 644 ~ 653.
- [2] Lee C C, Chao J J. Optimum local decision space partitioning for distributed detection [J]. IEEE Trans. on AES, 1989, **25**(4): 536 ~ 544.

- [3] Blum R S. Distributed detection of narrowband signals [J]. IEEE Trans. on Info. Theory, 1995, **41**(2): 519 ~ 523.
- [4] Thomopoulos S C A, Viswanathan R, Bougoulas D K. Optimal distributed decision fusion [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Elect. Syst., 1989, **25**(5): 761 ~ 765.
- [5] Willett P, Warren D. The suboptimality of randomized tests in distributed and quantized detection systems [J]. IEEE Trans. on Info. Theory, 1992, **38**(2): 355 ~ 361.
- [6] Xiang M, Zhao J W. On the performance of distributed Neyman-Pearson detection systems [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 2001, **31**(1): 78 ~ 83.

作者简介

白银生(1960 -),男,博士生.研究领域为信号信息处理,信息融合技术,雷达技术.

赵俊渭(1935 -),男,教授,博士生导师.研究领域为水声信号处理,声呐技术,信息融合等.

相 明(1966 -),男,博士后.研究领域为计算机技术,信号处理,数据融合技术等.

(上接第 516 页)

参 考 文 献 (References)

- [1] 黄乃康. CAPP 技术发展现状与趋势 [EB/OL]. www.icad.com.cn, 2001.
- [2] Sundblad S, Sundblad P. Designing for scalability with Microsoft Windows DNA [EB/OL]. http://www.amazon.com, 2000.
- [3] 刘东生,等. 可重用构件的合成技术 [J]. 计算机应用研究, 1999, (7): 52 ~ 54.
- [4] 蔡立钢,等. 基于 Web 的 CAPP 若干关键技术 [J]. 中国机械工程, 2002, **13**(5): 516 ~ 519.
- [5] 吴冬梅,等. 基于 XML 的制造业产品结构的有效实现 [J]. 组

合机床与自动化加工技术, 2002, (10): 15 ~ 19.

- [6] 方 剑,等. 基于 Web 的产品结构管理技术 [J]. 机械科学与技术, 2002, **21**(1): 140 ~ 143.

作者简介

张士杰(1949 -),男,研究员.主要从事人工智能、CIMS、CAPP 等研究.

张福顺(1975 -),男,工程师.主要从事 CIMS、CAPP 等研究.

宋来刚(1978 -),男,硕士研究生.主要从事 CAPP 研究.