

文章编号: 2095-4980(2014)06-0821-05

# 基于最小风险准则的多传感器检测策略及应用

茅文深, 夏 宁, 刘文松\*

(中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京 210007)

**摘 要:** 基于带宽、延时、计算等因素, 传统多传感器检测以分布式为主, 其特点是单传感器根据局部观测做出二元判决并传输给融合中心进行融合。单站条件下, 高速通信网络和高性能服务器的应用逐步克服了制约集中式检测的约束, 通过融合单传感器的局部观测提升检测性能, 避免了大量原始信息的损失。基于最小风险准则推导了分布式检测与集中式检测的算法原理, 分析了两种策略在实施过程中的特点与难点, 结合单站条件下多雷达联合检测探讨了集中式检测在工程实现时所需考虑的因素。

**关键词:** 多传感器检测; 分布式; 集中式; 单站条件

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201406.0821

## Strategies analysis of multiple sensors detection based on minimal risk rule

MAO Wen-shen, XIA Ning, LIU Wen-song\*

(28th Institute of CETC, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** Distributed detection is studied and implemented mainly for the multiple sensors detection considering such factors as the bandwidth, time-delay, computation capability, etc. It is featured that the binary hypothesis test with which the fusion center makes a decision is performed based on the local observation of a single sensor. In a single station, the factors restricting the centralized detection are overcome by applying the high performance communication and the server, where the original observation of a single sensor without any loss can be transmitted to the fusion center to improve the detection performance. Based on the minimal risk rule, the theories of distributed detection and centralized detection are analyzed. The features and difficulties in implementation of both strategies are discussed. The fundamental factors in engineering of the centralized detection are studied combined with the multiple radars detection in the single station.

**Key words:** multiple sensors detection; distributed detection; centralized detection; single station

多传感器检测需考虑带宽、延时、计算等要素。传统条件下, 通信系统无法满足单传感器向融合中心传输原始观测时的带宽要求, 并且融合中心也无法负荷海量数据的实时检测, 不仅如此, 通信延时将导致检测算法的复杂度和存储量大为增加。因此多传感器检测以分布式为主。文献[1]最早将基于贝叶斯准则的二元假设检验应用到如图1所示的无中心站的并行结构中。此时, 所有单传感器的局部判决代价函数是相互耦合的, 阈值求解也是相互耦合的, 求解难度较高。以此为源头, 文献[2]研究了多类拓扑结构在贝叶斯准则下的分布式检测方法。文献[3]最早论述了基于单传感器二元局部判决对融合中心融合准则进行贝叶斯最小风险优化的理论。文献[4]研究了同时对单传感器和融合中心进行全局优化的基本理论与求解方法。文献[5-6]则研究了优化判决准则的搜索算法。

对图2所示的含中心站并行结构分布式检测, 单传感器的局部判决准则和融

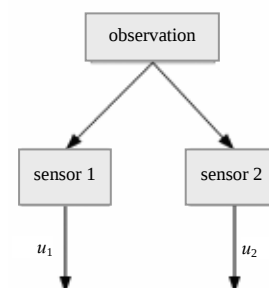


Fig.1 Distributed detection without center  
图1 无中心站分布式检测

收稿日期: 2014-04-14; 修回日期: 2014-05-21

基金项目: 总装“十二五”预研课题资助项目

\*通信作者: 刘文松 email:xss4@163.com

合中心的融合准则都是似然比形式。通过上节的文献综述, 基于最小风险准则有3种优化方式: a) 单传感器独立检测, 即给定局部判决准则, 优化融合中心的融合准则使得系统风险最小; b) 融合中心给定融合准则, 优化单传感器局部判决准则使得系统风险最小; c) 同时优化单传感器局部判决准则和融合中心融合准则, 使得系统风险最小。方案b) 中最优局部判决准则是相互耦合的, 耦合方程是最优局部判决所需满足的必要条件, 即方程组的解可能是局部最优, 需对多个局部最优逐一计算代价函数才能确定最优解。方案c) 需采用队判决理论中的PBPO(Person by Person Optimization)方法, 逐个阈值确定求解, 过程十分复杂, 已有文献提出了Gauss-Seidel循环坐标下降的算法和基于梯度的算法。从实施复杂度考虑, 方案a) 可操作性较高。

考虑到分布式检测毕竟是基于单传感器的局部观测做出二元判决, 传输给融合中心完成融合, 因此损失了大量的原始信息。而集中式检测是将单传感器的原始观测直接传输到中心站进行融合, 更能充分利用单传感器原始观测中的丰富信息, 减少高层信息融合时因特征提取所带来的信息损失。因此, 如何克服各类限制实施集中式检测也是一直以来研究的热点和难点。

本文基于最小风险准则, 就方案 a) 形式的多传感器分布式检测与集中式检测理论展开研究, 通过分析、比较算法性能、工程实施等因素, 论证集中式检测的优势。并结合单站条件下多雷达联合检测分析了制约检测性能的关键因素。

## 1 算法理论

### 1.1 分布式检测

定义 $H^0$ 和 $H^1$ 的先验概率分别为 $P^0$ 和 $P^1$ ,  $J(\mathbf{u}, H^j)$ 表示 $H^j$ 成立、单传感器二元判决为 $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_L\}$ 时, 融合中心判决结果为 $u_0$ 的代价函数。在贝叶斯准则下, 为使融合中心判决结果的代价期望 $E[J(\mathbf{u}, H^j)]$ 最小, 似然比检验表达式为:

$$\frac{P(u_1, u_2, \dots, u_L | H^1)}{P(u_1, u_2, \dots, u_L | H^0)} >_{H^0} \frac{P^0 J(1, H^0) - J(0, H^0)}{P^1 J(0, H^1) - J(1, H^1)} \quad (1)$$

最小风险准则满足 $J(0, H^0) = J(1, H^1) = 0$ 、 $J(1, H^0) = J(0, H^1) = 1$ , 并认为 $H^1$ 和 $H^0$ 出现的概率相等, 进一步可得:

$$\frac{P(u_1, u_2, \dots, u_L | H^1)}{P(u_1, u_2, \dots, u_L | H^0)} >_{H^0} 1 \quad (2)$$

方案 a) 中单传感器独立检测, 则公式(2)相应的对数似然比为:

$$\log \prod_{i=1}^L \frac{P(u_i | H^1)}{P(u_i | H^0)} >_{H^0} 0 \quad (3)$$

定义第 $i$ 个传感器的虚警概率为 $P_{fi}$ 、检测概率为 $P_{di}$ , 由上式左侧可得:

$$\sum_{k=1}^L \log \Lambda(u_k) = \sum_{i \in s_0} \log \frac{P_{di}}{P_{fi}} + \sum_{j \in s_1} \log \frac{1 - P_{dj}}{1 - P_{fj}} \quad i \neq j \quad (4)$$

式中: 单传感器似然比 $\Lambda(u_k) = P(u_k | H^1) / P(u_k | H^0)$ ; 集合 $s_0 = \{i : u_i = 0\}$ ,  $s_1 = \{j : u_j = 1\}$ 。

为便于算法实现, 式(4)可以写成如下形式:

$$\sum_{i=1}^L \log \Lambda(u_i) = \sum_{i=1}^L \left[ u_i \log \frac{P_{di}}{P_{fi}} + (1 - u_i) \log \frac{1 - P_{di}}{1 - P_{fi}} \right] = \sum_{i=1}^L \left[ u_i \log \frac{P_{di}}{P_{fi}} \frac{1 - P_{fi}}{1 - P_{di}} \right] - \sum_{i=1}^L \log \frac{1 - P_{di}}{1 - P_{fi}} \quad (5)$$

则基于最小错误准则的融合中心数据融合准则可表示为:

$$l_0 \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^L a_i u_i >_{H^0}^{H^1} \sum_{i=1}^L \log \frac{1 - P_{di}}{1 - P_{fi}} \stackrel{\text{def}}{=} \eta_0 \quad (6)$$

式中: 融合中心融合后的似然比为 $l_0$ ; 门限为 $\eta_0$ ; 融合权值 $a_i = \log \frac{P_{di}}{P_{fi}} \frac{1 - P_{fi}}{1 - P_{di}}$ 。据此, 完整的分布式检测系统架构

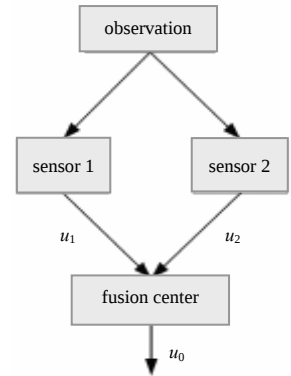


Fig.2 Distributed detection with center  
图 2 含中心站分布式检测

如图3所示。

式(6)表明：最小风险准则下最优融合方法是单传感器判决  $u_i$  的加权和，其权值依赖于传感器自身的虚警概率和检测概率。或者说，权值是判决质量的函数。

根据优化的融合方法，可得此时分布式检测系统的虚警概率和检测概率：

$$\begin{cases} P_F = f\left(\sum_{i=1}^n a_i u_i\right) \prod_{s_0} (1 - P_{fi}) \prod_{s_1} P_{fi} \\ P_D = f\left(\sum_{i=1}^n a_i u_i\right) \prod_{s_0} (1 - P_{di}) \prod_{s_1} P_{di} \end{cases} \quad f(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

### 1.2 集中式检测

集中式检测是对多雷达观测信号  $y_i$  融合后，对融合信号  $y_0$  进行检测。因此其信号估计和检测手段可归为传统理论范畴。假设融合后信号  $y_0$  的幅度为  $a_0$ ，在背景噪声  $n_0 \sim N(0, \sigma^2)$  下定性说明集中式检测的基本原理。此时，二元假设可以表示为：

$$\begin{cases} H^0: y_0 = n_0 \\ H^1: y_0 = n_0 + a_0 \end{cases} \quad (8)$$

则  $y_0$  的概率密度函数表示为：

$$\begin{cases} p(y_0 | H^0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{y_0^2}{2\sigma^2}\right) \\ p(y_0 | H^1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y_0 - a_0)^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

类似地，对上述公式求似然比并取对数得：

$$lr = y_0 \stackrel{\text{def}}{>} \frac{a_0}{2} \stackrel{\text{def}}{<} \gamma \quad (10)$$

此时，对数似然比满足如下分布：

$$\begin{cases} p(lr | H^0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{lr^2}{2\sigma^2}\right) \\ p(lr | H^1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(lr - a_0)^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases} \quad (11)$$

对于检测门限为  $\gamma = \frac{a_0}{2}$ ，2种错误判决概率  $P(H^1 | H^0)$  和  $P(H^0 | H^1)$  分别为：

$$P(H^1 | H^0) = \int_{\gamma}^{\infty} p(lr | H^0) dlr = \int_{\frac{a_0}{2}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{lr^2}{2\sigma^2}\right) dlr = \int_{\frac{a_0}{2\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds = Q[d/2] \quad (12)$$

$$P(H^0 | H^1) = \int_{-\infty}^{\gamma} p(lr | H^1) dlr = \int_{-\infty}^{\frac{a_0}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(lr - a_0)^2}{2\sigma^2}\right) dlr = \int_{-\frac{a_0}{2\sigma}}^{\frac{a_0}{2\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds = Q[d/2] \quad (13)$$

定义  $d^2 = a_0^2 / \sigma^2$  近似为信噪比， $Q(s_0) = \int_{s_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) ds$  是标准高斯分布从  $s_0$  到  $+\infty$  的右尾积分，该函数单调递减。此时，式(12)与式(13)都是  $Q(d/2)$ 。则对于最小错误准则有：

$$P_e = P^0 P(H^1 | H^0) + P^1 P(H^0 | H^1) = Q(d/2) \quad (14)$$

显然，随着信噪比的提升，错误风险越小，集中式检测性能越好。

在此基础上，继续讨论集中式检测时多传感器原始观测的融合方式。不失一般性，以两传感器信号融合为例。假设传感器1的目标幅值为  $a_1$ ，背景噪声符合均值为0，方差为  $\sigma_1^2$  的高斯分布  $n_1 \sim N(0, \sigma_1^2)$ 。类似地，传感器2的

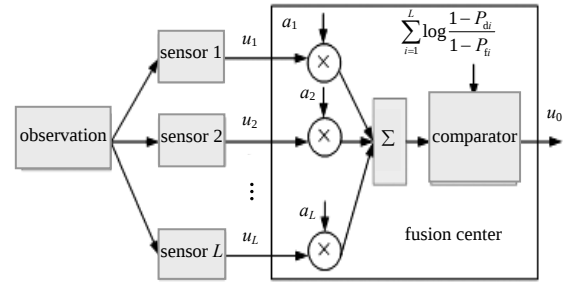


Fig.3 Structure of distributed detection

图3 分布式检测系统架构

目标幅值为 $a_1$ , 噪声 $n_2 \sim N(0, \sigma_2^2)$ 。按照式(15)融合时, 可保证融合信号 $y_0$ 信噪比优于任一单传感器:

$$y_0 = a_1 y_1 + a_2 y_2 \quad (15)$$

最优融合时, 考虑到单传感器观测相互独立, 可根据高斯分布的矩母函数特性求得:

$$n_0 \sim N(0, a_1^2 \sigma_1^2 + a_2^2 \sigma_2^2), \quad a_0 = \begin{cases} 0 & H^0 \\ a_1^2 + a_2^2 & H^1 \end{cases} \quad (16)$$

工程实施中, 目标幅值很难获取为先验信息。此时, 用加融合更具有一般性:

$$y_0 = y_1 + y_2 \quad (17)$$

加融合时, 类似地有:

$$n_0 \sim N(0, \sigma_1^2 + \sigma_2^2), \quad a_0 = \begin{cases} 0 & H^0 \\ a_1 + a_2 & H^1 \end{cases} \quad (18)$$

据此给出加融合时集中式检测的系统架构如图4所示, 与图3相比系统复杂度更低。

### 1.3 性能分析

通过前两节的分析, 可知分布式检测和集中式检测具有以下特点和不同:

1) 集中式检测基于多传感器的联合原始观测进行融合、判决; 分布式检测基于单传感器的局部观测做出局部判决, 然后融合中心对局部判决进行融合。

2) 在最小风险准则下, 集中式检测基于传统检测理论; 而分布式检测则是基于单传感器的局部判决对融合中心的融合准则进行优化。

3) 集中式检测在最优融合时需要目标幅值作为先验信息, 在加融合时无需先验信息; 而分布式检测则需要单传感器的检测概率 $P_{di}$ 和虚警概率 $P_{fi}$ 作为先验信息, 而这与目标信噪比、背景噪声分布类型等一系列因素有关。相比而言, 加融合集中式检测所需先验信息更少, 更易工程实施。

4) 集中式检测单传感器传输原始观测, 所需带宽大, 要求融合中心处理性能强; 分布式检测单传感器传输二元判决, 所需带宽小, 要求融合中心处理性能适中。

5) 在足够的先验信息下, 集中式检测最优融合总体上优于分布式检测; 而集中式检测加融合则在信噪比相差较大时, 低于较优传感器, 高于较劣传感器。

6) 集中式检测要求单传感器观测相互独立; 分布式检测要求单传感器独立进行局部检测。

在高斯噪声背景下, 两部相同的传感器分别执行集中式检测、分布式检测、单传感器检测时, 接收机性能曲线如图5所示。总的来说, 无论是算法性能还是工程实施, 最小风险准则下集中式检测相对于分布式检测更具优越性。

## 2 基于单站条件的多雷达检测

以单站条件下多雷达联合检测为例, 探讨多传感器集中式检测时所必须考虑的工程因素。首先分析通信带宽和处理能力。假设雷达天线的转速一般在 10 s/r, 探测距离为 200 km, 按照 13 位方位码、60 m 距离分辨力进行量化, 则天线机械扫描一圈即产生近 24 MB 的视频信号。不仅如此, 为实现有效的信息互补, 会在单站内部署多部波段不同、位置临近的雷达。传统情况下, 若直接传输原始视频信号, 则无论是通信带宽还是融合中心处理能力都无法满足。所以, 一般的单雷达根据局部观测独立执行检测跟踪, 丧失了多雷达信息互补的优势。随着工程技术的发展, 已实现了通过高速光纤将多部雷达的观测信号传输至融合中心集中处理。同时, 大量的刀片服务

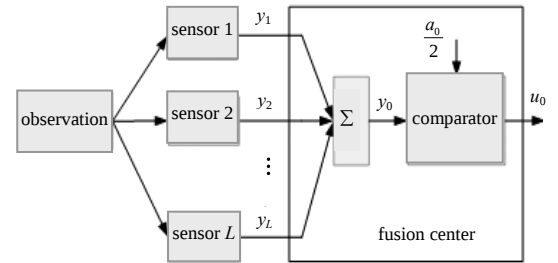


Fig.4 Structure of centralized detection for SUM fusion  
图 4 加融合时集中式检测系统架构

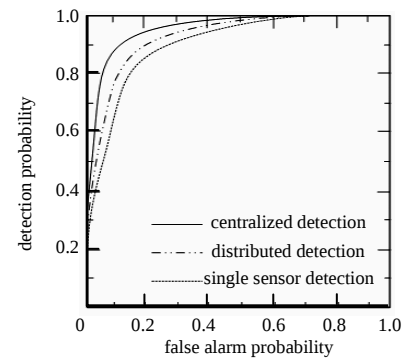


Fig.5 ROC comparison between centralized detection, distributed detection and single sensor detection.

图 5 集中式检测、分布式检测、单传感器检测 ROC

器以及并行计算技术的应用,使得融合中心的吞吐能力和处理能力也不再是瓶颈。可以说,单站条件下多雷达集中式检测的基本条件已经满足。

其次,岸基对海脉冲搜索雷达一般具有低分辨力、非相参、窄带特性,接收机包络线性检波后背景杂波一般服从瑞利分布。考虑到多部雷达独立观测且位于不同的波段,可以认为多雷达的观测信号是独立的。可以说,此时多雷达的观测信号是独立同分布的,易于分析融合后的信号分布类型及参数,方便了检测器的设计。

第三,探讨观测信号的相对同步对检测性能的影响。由于多部雷达独立运行,天线起始方位和转速均不相同,导致同一目标的观测信号不同步。不仅如此,由于雷达具有非相参的特性,也无法通过后期的加改装来同步。但考虑到海上目标的慢动特性以及雷达天线扫掠过同一目标时的时间差,则可以发现这样的客观事实:在两部雷达天线扫掠的时间差内,目标位移较小。进一步考虑雷达的低分辨率特性,则目标甚至可以认为是相对静止的。或者,可以提高两部雷达天线的转速来获得目标的相对静止<sup>[7-8]</sup>。因此,在处理海上目标时可以认为观测信号是相对同步的,仅对目标边缘没有重合的部分,检测性能会有一定损失。

最后,还必须考虑探测空间配准对检测性能的影响。这主要与雷达布站、天线架高、半功率水平波束宽度、带宽等一系列雷达参数有关。工程实践中,还与操作员对定时器、方位码的调节有一定关系。需要根据具体条件具体分析。可以说,多雷达集中式检测最终性能既与算法处理有关,也与正确关联的概率有关。

### 3 结论

本文系统地研究了基于最小风险准则的集中式检测和分布式检测算法的性能和特性,论证了集中式检测的优越性。以单站条件下的多雷达检测为例,探讨了集中式检测在该领域的可行性以及在工程实施过程中的难点和未来发展的方向。

#### 参考文献:

- [1] Tenney R R, Sandell N R. Detection with distributed sensors[J]. IEEE Trans. on AES, 1981, 17(4): 501-510.
- [2] Ekchian L K, Tenney R R. Detection networks[C]// Proceedings of the 21st IEEE Conference on Decision and Control. Florida: [s.n.], 1982: 686-691.
- [3] Chair Z, Varshney P K. Optimum data fusion in multiple sensor detection systems[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronics System, 1986, 22(1): 98-101.
- [4] Hoballah I Y, Varshney P K. Distributed Bayesian signal detection[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1989, 35(5): 995-1000.
- [5] Tsitsiklis J N. On threshold rules in decentralized detection[C]// Proceedings of 25th IEEE Conf. on Decision and Control. Athen, Greece: [s.n.], 1986: 232-236.
- [6] Tang Z B, Pattipati K R, Kleinman D L. An algorithm for determining thresholds in a distributed detection problem[J]. IEEE Trans. on SMC, 1991, 21(1): 231-237.
- [7] Multiple radar signal fusion and detection based on cross cumulant[J]. Signal Processing, 2006, 22(4): 480-485.
- [8] WANG C, HU W D, DU X Y, et al. Application of signal level fusion for detection of low-velocity small target[J]. Modern Radar, 2006, 28(6): 41-65.

#### 作者简介:



茅文深(1963-),男,江苏省南京市人,高级工程师,主要研究方向为雷达总体、计算机科学.email:xss4@163.com.

夏宁(1983-),男,江苏省南京市人,工程师,主要研究方向为雷达系统装备研制.

刘文松(1983-),男,江苏省徐州市人,工程师,主要研究方向为图像编解码芯片设计、多雷达检测技术.