JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY
第18卷第1期 1996年3月 Vol. 18 No. 3

大规模串行分布式检测的性能*

谢红卫

（国防科技大学自动控制系 长沙 410073）

摘 要 串行分布式(N=2, 3, 4)检测的最优协调门限组难以求取，因而只能就由少量传感器组成的小规模串行网，通过数值计算来考察检测性能。本文在一定条件下，给出了求取串行分布式检测性能的解析方法，进而可得到大规模串行分布式检测的性能，使我们能考察和了解检测性能在积累数增加时的变化趋势。

关键词 大规模，分布式检测，性能

分类号 TP274.4

The Performance of Large Scale Serial Distributed Detection Networks

Xie Hongwei

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract It is difficult to study the detection performance of a large scale serial distributed detection networks, The paper gives a simple analytical method to probe this problem under some conditions, To a great extent, this enables us to know how the detection performance varies when the networks becomes larger.

Key words large scale, distributed detection, performance

经典的信号检测问题，能将所有的原始采样(如一个检测周期内的多次采样)积累起来集中处理，检测判决机构为采样的似然比门限检验。采样的完整积累是一个技术难题，当考虑多传感器(如雷达)组网工作时，这种传输积累的困难就更加突出了。

基于此，文中提出并详细研究了分布式检测问题，即所谓的多传感器检测融合问题(Detection—Fusion for Multisensor)。通常研究的多传感器分布式检测模型，考虑多传感器(n 个)按串行或并行结构组网工作(见图 1)，认定每个传感器(记为 DM，Detection Maker)向系统内部传输的局部处理结果 u_1 为局部判决信息，即 $u_i=0$ 或 1(如表示无信

* 湖南省自然科学基金资助
1995年4月13日收稿

号或有信号）。串行工作流程为 DM_1 根据自身采样 y_i 和 u_{i-1}，作出局部判决 u_i 并为下一级所参考和利用，直至 DM_n 作出系统最终判决 u_f；并行工作流程为双层检测，DM_i 根据自身采样 y_i 作出局部判决 u_i，融合中心在信息集 $U=\{u_1, \cdots, u_n\}$ 的基础上作出系统最终检测判决。

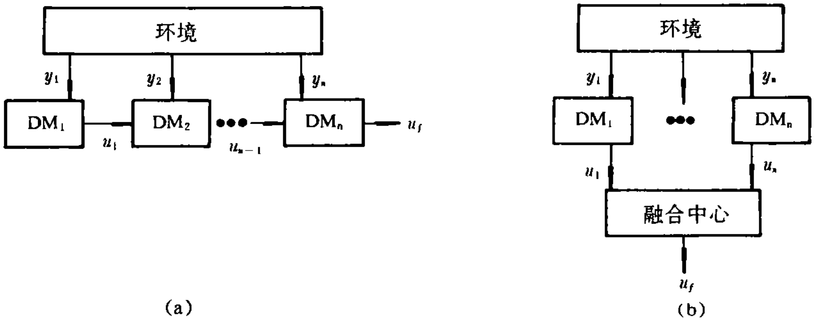


图 1　(a)串行检测网，(b)并行检测网

针对上述二类基本结构，最优设计的结果表明[1,2,3]：其最优检测判决机构仍为似然比门限检验。不过，在串行网中，DM_i 采用双门限工作，依 $u_{i-1}=0$ 或 1 而定；在并行网中，融合中心总体判决也采用似然比门限检验。问题的难点在于，最优组网工作时，各局部似然比检验的门限是彼此协调耦合的。协调门限组应满足一组难解的非线性方程组。

当局部处理为“传真”处理，即传感器只起采样作用时，在并行场合，$u_i=y_i$，因此融合中心在 $U=\{y_1, \cdots, y_n\}$ 基础上作检测判决；在串行场合，$u_i=\{y_1, \cdots, y_i\}$，DM_n 也是在 $\{y_1, \cdots, y_n\}$ 基础上作判决，它们都等同于经典的集中式检测。由此可见，由于局部判决，DM_i 只用 $u_i=0$ 或 1 来描述采样 y_i，可形象地称 DM_i 只有“有限特征记忆”能力，丢失了细节信息，因而系统检测性能会有损失。这种模型研究的是在信息传输积累的难易程度与性能优劣之间取折衷。

分布式检测将带来性能损失。因此我们有必要研究分布式检测的性能，特别是性能随积累数(n，即传感器个数)增加时的变化趋势，以便考察损失的严重程度和趋势。遗憾的是，由于协调门限组难以求取，最优分布式检测的性能大多只能在 n 较小时($n=2, 3, 4$)，通过数值计算而获得[4,5]；而对性能在 n 增大时的变化趋势，我们几乎一无所知。

本文在一定条件下，给出了串行分布式检测性能随 n 变化的解析式，因而能获得 n 较大时的检测性能，对了解性能变化趋势起到窥豹一斑的效果。对并行检测网，有关结论可参见文献[6]。

1　最优串行分布式检测[3,4]

一般地，我们考察以下多传感器独立采样的检测问题：

$$
\begin{aligned}
&H^0:\ y_i \sim f^0(y_i)\\
&H^1:\ y_i \sim f^1(y_i) \qquad i=1, \cdots, n
\end{aligned}
\tag{1}
$$

$f^0()$，$f^1()$ 为条件概率密度函数，则最优串行分布检测的局部对数似然比检验为

$$
T_i(y_i)=\log\frac{f^1(y_i)}{f^0(y_i)} \underset{u_i=0}{\overset{u_i=1}{\gtrless}} \lambda_i^{(u_{i-1})}, \qquad i=1, \cdots, n \tag{2}
$$

其中门限 $\lambda_i^{(u_{i-1})}$ 依 $u_{i-1}=0$ 或 1 而取不同的值，$\lambda_1^1=-\lambda_1^0$。记 T_i 在 H^0 和 H^1 条件下的概率密度函数分别为 $g^0(t_i)$ 和 $g^1(t_i)$，则 u_i 在不同门限下的虚警概率和检测概率的差值为

$$\triangle F_i = P(u_i = 1|u_{i-1} = 1,\ H^0) - P(u_i = 1|u_{i-1} = 0,\ H^0)$$
$$= \int_{\lambda_i^0}^{\lambda_i^1} g^0(t_i)\mathrm{d}t_i, \qquad i = 2,\ \cdots,\ n \tag{3}$$
$$\triangle D_i = P(u_i = 1|u_{i-1} = 1,\ H^1) - P(u_i = 1|u_{i-1} = 0,\ H^1)$$
$$= \int_{\lambda_i^0}^{\lambda_i^1} g^1(t_i)\mathrm{d}t_i, \qquad i = 2,\ \cdots,\ n \tag{4}$$

关于协调门限组，若 H^0 和 H^1 的先验概率均为 0.5，取错判概率 P_e 为性能指标，u_i 的性能指标为

$$Pe(i)=0.5\times[P(u_i=1|H^0)+P(u_i=0|H^1)] \quad i=1,\ \cdots,\ n \tag{5}$$

则协调门限组应满足方程组

$$\lambda_i^{(u_{i-1})}=\log\frac{P(u_{i-1}|H^0)}{P(u_{i-1}|H^1)}+\log\frac{P(u_n=1|u_i=1,\ H^0)-P(u_n=1|u_i=0,\ H^0)}{P(u_n=1|u_i=1,\ H^1)-P(u_n=1|u_i=0,\ H^1)}$$
$$\lambda_1=\log\frac{P(u_n=1|u_1=1,\ H^0)-P(u_n=1|u_1=0,\ H^0)}{P(u_n=1|u_1=1,\ H^1)-P(u_n=1|u_1=0,\ H^2)} \tag{6}$$

2 解析结果

正如前所述，当为高斯分布、瑞利分布时，分布式检测难就难在方程组(6)没有一般解。文献[1]证明了，当 $f(y_1)$ 为常见分布时，(6)式只有唯一解，因此(6)式的解即为最优协调门限组。为避开数值求解，解析地求取 $Pe(i)$，我们必须得到(6)式的简单解。为此我们附加如下条件：

$$g^1(t_i) = g^0(-t_i) \tag{7}$$

即 T_i 的密度函数是关于 $t_i=0$ 对称的，(7)式在许多场合都能满足，如对检测问题：

$$H^0:\ y_i=-s_i+n_i$$
$$H^1:\ y_i=+s_i+n_i \tag{8}$$

其中 s_i 为已知信号、噪声 n_i 只需具有关于 0 对称的密度函数，(7)式即能成立。

在(7)式的条件下，我们可得到下列结果：

1) (6)式的解满足条件

$$\lambda_i^1=-\lambda_i^0$$
$$\lambda_1^1=-\lambda_1^0=0 \tag{9}$$

这是因为满足(9)式的 λ_i 的确满足(6)式。可验证如下：

首先经过细致的概率计算，有

$$P(u_n = 1|u_i = 1,\ H^1) - P(u_n = 1|u_i = 0,\ H^1)$$
$$= \prod_{k=i+1}^{n} \triangle D_k$$
$$P(u_n = 1|u_i = 1,\ H^0) - P(u_n = 1|u_i = 0,\ H^0)$$

$$= \prod_{k=i+1}^{n} \triangle F_k$$

当(7)、(9)满足时，由(3)、(4)可知

$$\triangle D_k = \triangle F_k$$

于是(6)变为：

$$\lambda_i^{(u_{i-1})} = \log \frac{P(u_{i-1} | H^0)}{P(u_{i-1} | H^1)}$$

$$\lambda_1 = 0 \tag{10}$$

再由(7)和(9)知：

$$P(u_1 = 1 | H^1) = P(u_1 = 0 | H^0) = 1 - Pe(1)$$

$$P(u_1 = 1 | H^0) = P(u_1 = 0 | H^1) = Pe(1)$$

进而有

$$P(u_i = 1 | H^1) = P(u_i = 0 | H^0) = 1 - Pe(i)$$

$$P(u_i = 1 | H^0) = P(u_i = 0 | H^1) = Pe(i) \tag{11}$$

因而(10)式真。

2)以 $\lambda_1 = 0$ 为起点，λ_i 及 $Pe(i)$ 有迭代公式

$$\lambda_i^0 = \log \frac{1 - Pe(i-1)}{Pe(i-1)} \tag{12}$$

$$Pe(i) = P(u_i = 1 | u_{i-1} = 0, H^0) + Pe(i-1) \triangle F_i \tag{13}$$

(11)、(12)、(13)的获取，都只须注意到恒等式[3]：

$$P(u_i = 1 | H^1) = P(u_i = 1 | u_{i-1} = 0, H^1) + P(u_{i-1} = 1 | H^1) \triangle D_i$$

$$P(u_i = 1 | H^0) = P(u_i = 1 | u_{i-1} = 0, H^0) + P(u_{i-1} = 0 | H^0) \triangle F_i \tag{14}$$

即可得到。

我们可通过(12)和(13)式，解析地得到(7)式条件下，最优串行分布式检测的性能，因而可考察大规模串行检测性能随 n 的变化趋势，而不遇上难以逾越的计算障碍。

3 实 例

考虑高斯噪声下，问题(8)的检测问题，设 $n_i \sim N(0, 1)$，则检验(2)可落实为

$$y_i \underset{u_i=0}{\overset{u_i=1}{\gtrless}} \pm \frac{1}{2S} \times \ln \frac{1 - Pe(i-1)}{Pe(i-1)} = \pm t_i \tag{15}$$

y_i 的条件密度满足(7)式，当 $u_{i-1} = 0$ 时，门限取正号；$u_{i-1} = 1$ 时，门限取负号。记 $\psi(t)$ 为标准正态分布的尾概率函数，(13)变为

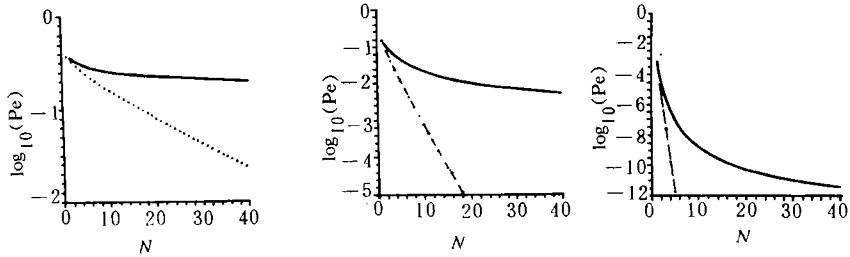
$$Pe(i) = \psi(s + t_i) + Pe(i-1)(\psi(s - t_i) - \psi(s + t_i)) \tag{16}$$

一旦 s 取定(信噪比因而给定)，由上式即可求得最优串行检测性能。为衡量性能损失，同时计算了集中式最优检测的性能，它们是

$$\Lambda_{opt}(\overline{Y}) = \sum_{i=1}^{n} y_1 \underset{H^0真}{\overset{H^1真}{\gtrless}} 0 \tag{17}$$

$$Pe(n) = \psi(s\sqrt{n}) \tag{18}$$

对 $s=\sqrt{10}$，1，$\frac{1}{\sqrt{10}}$，所得计算结果如图 2 所示，纵轴为 $\log_{10}Pe$



(a)$s=\sqrt{10}$　(b)$s=1$　(c)$s=1/\sqrt{10}$

图 2　Gauss 信道信号检测错判概率

……：集中式；——：分布式

从计算结果可以看出，串行分布式检测多次积累后，性能损失较大。这主要是由于串行工作时，u_i 序列彼此相关，它对 u_{i+1} 有较大的参考作用，而对若干级后的 u_{i+k}，其参考借鉴作用被削弱。系统总体判决将主要取决于后端各传感器的采样信息，并行工作模式则能克服这一缺陷。

4 结　论

本文给出了在一定条件下，求取串行分布式检测性能的解析方法，因而可以考察大规模串行分布式检测的性能，了解检测性能随积累数增大的变化趋势。典型计算表明，串行分布式检测的积累损失随着积累数的增大而迅速增长。和并行结构相比，串行结构更应考虑文献[7，8]所研究的多比特信息分布式检测工作模式。

参考文献

1 谢红卫.分布式检测优化理论研究:[学位论文]. 长沙：国防科技大学．1993

2 Chair Z，Varshey P K. Optimal Data Fusion in Multiple Sensor Detection Systen，IEEE Trans. on AES，1986，AES－22(1)

3 Xie Hongwei，Wang Hao. Optimization for the Design of Distributed Detection，Proc. of 2nd ICSSE，Beijing，1993

4 Reibman A R，Nolte L W. On Determining the Design of Fusion Detection Networks. Proc. of 27th Conf. on Decision and Control. Austin，1988

5 Swaszek P E. On the Performence of Serial Networks in Distributed Detection，IEEE Trans. on AES，1993，29(1)

6 Xie Hongwei. The Reasonability Conditions for the Identical Thresholds Assumption in I. I. D. Parallel Distributed Detection. Proc. of MFI'94，Las Vegas，1994

7 谢红卫．多比特信息分布式检测．国防科技大学学报，1995，(1)：8～15

8 Kam M，Zhu X. Simple Local Partition Rules in Multi-bit Decision Fusion. Proc. of MFI'94，Las Vegas，1994

（责任编辑　卢天贶）