

doi: 10.7690/bgzdh.2018.12.016

## 混合信源的分布式检测融合算法及数值仿真

顾进<sup>1</sup>, 诸雪征<sup>2</sup>, 聂坤林<sup>1</sup>

(1. 陆军防化学院研究生管理大队, 北京 102205; 2. 陆军防化学院防化装备系, 北京 102205)

**摘要:** 针对点源信源和远程遥测信源混合部署的检测融合问题, 对混合信源的分布式检测融合算法进行研究。分析混合信源检测融合的特点, 研究基于 Neyman-Pearson 准则的异步检测融合算法, 构建数值仿真实验环境, 并对提出的算法进行数值验证。验证结果表明: 混合信源的分布式检测融合方法能够大幅降低漏警率, 提高了报警精度。

**关键词:** 混合信源; 分布式检测; 数据融合; 数值仿真

**中图分类号:** TP15 **文献标志码:** A

### A Distributed Detection Fusion Algorithm and Numerical Simulation of Mixed Information Source

Gu Jin<sup>1</sup>, Zhu Xuezheng<sup>2</sup>, Nie Kunlin<sup>1</sup>

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China;*

2. *Department of Defense Equipment, Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China*)

**Abstract:** Point at the detection fusion problem of the mixed deployment of point information source and remote information source, the distributed detection fusion algorithm of mixed source was studied. The paper analyzed the characteristic of mixed source data fusion, studied the algorithm of asynchronous detection fusion based on Neyman-Pearson criterion. A numerical simulation experimental environment was constructed to test the algorithm. The verification results showed that the distributed detection fusion algorithm of mixed information source greatly reduced the missing alarm rate and improved warning accuracy.

**Keywords:** mixed information source; distributed detection; data fusion; numerical simulation

## 0 引言

分布式检测融合方法可以提高对毒剂检测的精度, 有效降低报警器本身误差对判决结果的影响<sup>[1]</sup>, 目前的融合方法主要针对点源信源, 而随着我军装备技术的发展, 远程遥测毒剂报警装备成为化学侦察的重要组成部分。与点源信源相比, 远程遥测信源可以远距离对毒剂云团进行监测, 利用红外光谱特征判断是否存在化学毒剂云团, 进行提前报警。因此, 研究点源与远程遥测 2 种混合信源的检测融合算法, 对于提高毒剂报警精度具有重要作用。

## 1 混合信源算法的特点

混合信源相对于点源信源, 其检测融合算法主要有以下特点:

### 1) 异步判决。

点源信源传感器的二元判决是建立在时间一致基础上的同步判决, 即在同一时刻对发生的事件进行判决, 利用各传感器所在位置的浓度不同从而确定单个信源的漏警率和虚警率, 然后进行融合判决。

而远程遥测信源的特点是可以对云团进行多次扫描, 在一定的时间段 $[0, \tau]$ 内不断地产生判决结果。

### 2) 门限未知。

在点源信源的分布式检测融合算法中, 一般根据经验给出对单个毒剂报警器漏警率和虚警率的推算方法。门限值  $\eta = P_0(C_{10} - C_{00}) / P_1(C_{01} - C_{11})$ , 可根据战场上出现的化学袭击信号给出判断。在实际的战场条件下, 远程遥测信源探测的距离较远, 在探测之前对化学袭击后特征判断的时间有限, 基本无法通过现象确定先验概率。同时, 在实际战场上对代价函数也难以进行量化, 漏警和虚警的代价很难直接确定, 因此混合信源的门限值未知。

### 3) 局部检测率不变。

遥测毒剂报警器对云团进行持续监测时, 只要云团浓度在可探测范围之内, 即可检测出毒剂的存在, 一般不受毒剂云团浓度的影响, 笔者假设其漏警率、检测率和虚警率是定值, 可用:

$$P_M = \begin{cases} a_M & c \geq c_0 \\ \phi & c < c_0 \end{cases}, P_D = \begin{cases} a_D & c \geq c_0 \\ 0 & c < c_0 \end{cases}, P_F = \begin{cases} a_F & c \geq c_0 \\ \phi & c < c_0 \end{cases}$$

收稿日期: 2018-10-01; 修回日期: 2018-11-14

作者简介: 顾进(1984—), 男, 安徽人, 博士, 讲师, 从事防化武器装备运用与保障工程研究。

行计算。

## 2 融合算法设计

### 2.1 基于 N-P 准则的检测融合算法

对于一个化学袭击事件的检测，理想的检测融合算法是使  $P_M$  和  $P_F$  同时达到最小化，但实际上不可能同时达到。根据 N-P(Neyman-Pearson) 准则，只能在限制  $P_F$  的情况下，使  $P_M$  达到最小，这种准则下的检测融合称为 N-P 检测。其设计目标是在预先设定的检验水平上，使检验的功效最大。

因此，把 N-P 检测定义为一个约束条件下的函数问题，引入拉格朗日乘子，其必要条件是使式(1)的值达到最小<sup>[2]</sup>。

$$F = P_M + \lambda(P_F - \alpha_0) \tag{1}$$

其中  $\lambda$  为拉格朗日乘数。根据前文定义，把  $P_F$  和  $P_M$  用概率替换，则上式可转化为

$$F = \int_{z_0} p(y|H_1)dy + \lambda[\int_{z_0} p(y|H_0)dy - \alpha_0] = \lambda(1 - \alpha_0) + \int_{z_0} [p(y|H_1) - \lambda p(y|H_0)]dy$$

实际上，在点源信源的检测融合中，一般采用基于代价函数的计算方法，基于 N-P 检测的函数  $F$  就是平均代价函数的特殊形式。在贝叶斯检测中，平均代价函数为

$$\mathcal{R} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l C_{ij} P_j P(H_i | H_j \text{为真})$$

如果令  $c_{00}=c_{11}=0$ ,  $P(H_0)c_{10}=\lambda$ ,  $P(H_1)c_{01}=1$ ,  $P_F-\alpha_0=P(H_1|H_0)$ , 则上式即可以转化为

$$\mathcal{R}' = P(H_0|H_1) + \lambda P(H_1|H_0) \tag{2}$$

式(1)和式(2)相比可知，N-P 准则实际上就是在规定条件下的贝叶斯准则的特殊表示，因此分析函数  $F$  的第 2 项的最小值可以采用似然比检测：

$$\Lambda(y) = \frac{p(y|H_1)}{p(y|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \lambda$$

根据贝叶斯检测的一般方法，可以把上式变换为

$$\sum_{i=1}^N [u_i \ln \frac{(1-P_{M_i})}{P_{F_i}} + (1-u_i) \ln \frac{P_{M_i}}{1-P_{F_i}}] \underset{u_0=0}{\overset{u_0=1}{>}} \ln \lambda \tag{3}$$

判决的门限  $\lambda$  可由虚警率的约束确定，即满足下式：

$$\int_{z_1} p(y|H_0)dy = \int_{\lambda} p(\Lambda|H_0)d\Lambda = \alpha_0 \tag{4}$$

通过式(3)和式(4)即可确定基于给定虚警率约束的门限自适应算法，判定结果不受先验概率和代

价函数的影响。

### 2.2 基于异步判决的融合算法改进

通过基于 N-P 算法的检测融合可以在虚警概率给定的情况下求出门限，从而完成融合判决。而对远程遥测信源来说，由于具有异步判决的特点，因此需要进一步研究多次检测情况下的融合检测规则。

假定分布式检测系统是一个给定的观测区间  $[0, \tau]$  上，在这个区间内事件不发生变化。遥测信源在区间上的不同时刻作出了多个关于假设存在的判决，这些判决不断地送入融合中心，中心不断地组合到来的局部判决，最后在  $t=\tau$  时产生全局判决。假设远程遥测毒剂报警装置的局部判决时间为  $\beta$ ，则在区间  $[0, \tau]$  内，远程遥测报警器  $B$  的判决次数为

$$k = \frac{\tau}{\beta}$$

遥测报警器在  $[0, \tau]$  内发送的局部判决集合用  $u_B = \{u_{B1}, u_{B2}, \dots, u_{Bk}\}$  表示。上述集合对于一个检测事件来说，可能是空集，代表这段时间内没有数据上报到融合中心。根据前文对遥测传感器的特点分析，假定在  $[0, \tau]$  内，遥测报警器  $B$  的虚警和检测率  $P_M$  和  $P_D$  是平稳的，即它们不随时间的变化和云团的扩散浓度而变化，全局判决规则是基于在该区间内接收的所有的局部判决且在观测区间  $[0, \tau]$  的结束时间作出的。如果把遥测传感器的每次检测都看成一次局部判决，则最优融合规则可以表示为

$$\Lambda'(y) = \frac{p(y|H_1)}{p(y|H_0)} = \frac{P_r(u_1, u_2, \dots, u_N, u_B | H_1)}{P_r(u_1, u_2, \dots, u_N, u_B | H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \lambda$$

式中： $u_N$  为在毒剂报警区域内有  $N$  个点源毒剂报警器； $u_B$  为区域内有 1 个遥测报警器。由于  $u_B$  表示的是  $k$  次判决，因此把上式左半部分展开：

$$\frac{P_r(u_1, u_2, \dots, u_N, u_B | H_1)}{P_r(u_1, u_2, \dots, u_N, u_B | H_0)} = \frac{P_r(u_1, u_2, \dots, u_N, u_{B1}, u_{B2}, \dots, u_{Bk} | H_1)}{P_r(u_1, u_2, \dots, u_N, u_{B1}, u_{B2}, \dots, u_{Bk} | H_0)} = \prod_{i=1}^{N+k} \frac{P_r(u_i=1|H_1)}{P_r(u_i=1|H_0)} = \prod_{R_1} \frac{P_r(u_i=1|H_1)}{P_r(u_i=1|H_0)} \prod_{R_0} \frac{P_r(u_i=1|H_1)}{P_r(u_i=1|H_0)} = \prod_{R_1} \frac{1-P_{M_i}}{P_{F_i}} \prod_{R_0} \frac{P_{M_i}}{1-P_{F_i}}$$

两边取对数得到

$$\sum_{i=1}^{N+\frac{\tau}{\beta}} [u_i \ln \frac{(1-P_{M_i})}{P_{F_i}} + (1-u_i) \ln \frac{P_{M_i}}{1-P_{F_i}}] \underset{u_0=0}{\overset{u_0=1}{>}} \ln \lambda \tag{5}$$

式(5)及其与混合信源的异步检测融合算法，可在单个信源判决结果的基础上，求得融合判决结果。

### 3 数值仿真实验

#### 3.1 背景场设定

假定毒剂云团的瞬时释放，扩散模式采用风向固定的瞬时点源模式。2 种信源的分布如图 1 所示。

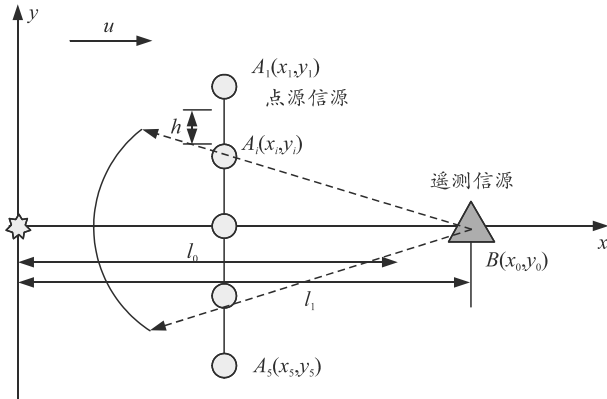


图 1 混合信源的毒剂报警器分布

在混合信源的计算中，由于远程遥测毒剂报警器的存在，在实际运用中可以减少点源信源的数量，从而减轻操作人员。为此，设有 5 个点源信源，编号为  $A_1, A_2, \dots, A_5$ ，其坐标位于距化学武器爆炸点距离为  $l=500\text{ m}$  的直线上，每个报警器相距  $2\text{ m}$ 。

远程信源的坐标为  $B(x_0, y_0)$ ，设其到云团的距离为  $l_0=600\text{ m}$ ，完成一次检测的时间设为  $\beta=20\text{ s}$ ，检测区间设为  $\tau=100\text{ s}$ 。初始条件与点源信源的条件相同， $Q_0=50\text{ kg}$ ，非等温条件， $K_0=1.785, K_1=0.014, n=1.10, \Gamma(1+1/n)=0.965\ 23, Z=1\text{ m}$ 。

#### 3.2 融合算法实现

对于混合信源中的点源信源的漏警率和虚警率的计算，云团沿  $x$  轴运动时，当  $t_1=245.26, t_2=254.73$  时，监测点浓度达到点源报警器的报警阈值。为了模型简化，假设远程遥测信源在  $100\text{ s} \leq t \leq 200\text{ s}$  区间内对毒剂云团进行监测，其浓度方程<sup>[3]</sup>为

$$C = \frac{Q_0}{4\pi K_0 t (K_1 n^2 z_1^{(n-2)} t)^{1/n} \Gamma(1+1/n)} e^{-\left[ \frac{(x-ut)^2 + y^2}{4K_0 t} + \frac{z^n}{K_1 n^2 z_1^{n-2} t} \right]}$$

根据大气扩散的一般模式可计算出  $t$  时刻，毒剂报警区域内任意一点的浓度。当云团到达点源毒剂报警区域时，其浓度如表 1 所示。

表 1 点源信源坐标点的初始浓度值  $\text{mg}/\text{m}^3$

报警器编号	浓度
A <sub>1</sub>	0.16
A <sub>2</sub>	0.86
A <sub>3</sub>	1.50
A <sub>4</sub>	0.86
A <sub>5</sub>	0.16

假设战场当前的相对湿度为 70%，根据浓度值与漏警率的经验公式<sup>[4]</sup>：

$$P_M = P_{Mc} + P_M^* = 3.276e^{\left(\frac{C-0.00436}{0.1466}\right)^2} + 0.0001614e^{0.1582W}$$

可以得到各报警器的漏警概率如表 2 所示。

表 2 点源报警器漏警率 %

报警器编号	漏警率
A <sub>1</sub>	11.47
A <sub>2</sub>	10.41
A <sub>3</sub>	10.41
A <sub>4</sub>	10.41
A <sub>5</sub>	11.47

遥测报警装置的漏警率和虚警率由综合因素决定，与地形条件、气象条件和云团的浓度分布状况有关系。由于缺乏实际的实验数据，根据前文分析的混合信源的特点，将其设定为常量  $P_F=0.1, P_M=0.05$ 。

根据 N-P 算法，假设融合后可接受的虚警率要求比单装备的虚警率下降为  $\alpha_0=0.05\%$ ，然后由式(4)可得检测门限，由于不能得到关于  $\alpha_0$  的解析解，因此笔者采用基于差值的近似解<sup>[5]</sup>，在上述基础数据已知的情况下，考察不同的  $\lambda$  取值对虚警率的影响，其算法如图 2 所示。

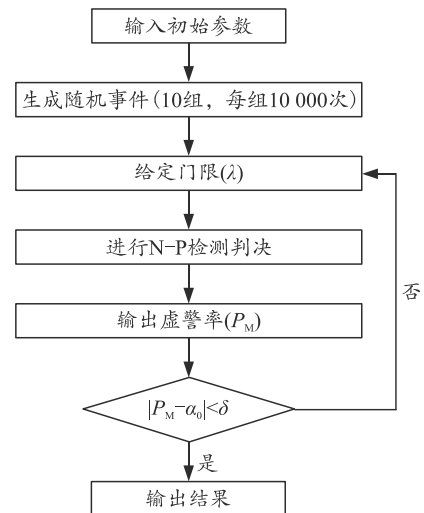


图 2 通过  $\alpha_0$  求解门限  $\lambda$  的方法

$\lambda$  对  $\alpha_0$  是单调递减的函数，因此求解  $\lambda$  可采用插值法逐渐逼近准确值，使门限满足  $\alpha_0$  的要求<sup>[6]</sup>。

根据上述算法做出  $\alpha_0$  和  $\lambda$  的相关曲线如图 3 所示，曲线中的点的步长为 0.001，范围是 [0,1]。通过曲线可以看到，函数不是连续可导的，存在突变，进一步证明其解析解是不存在的。运用 Matlab 的 find() 函数，解出当  $\lambda=0.181$  时， $\alpha_0=0.051\ 0$ ；当  $\lambda=0.182\ 0$  时， $\alpha_0=0.038\ 0$ 。所以要满足虚警率的最低要求，根据插值法，门限值取  $\lambda=0.181\ 07$ 。

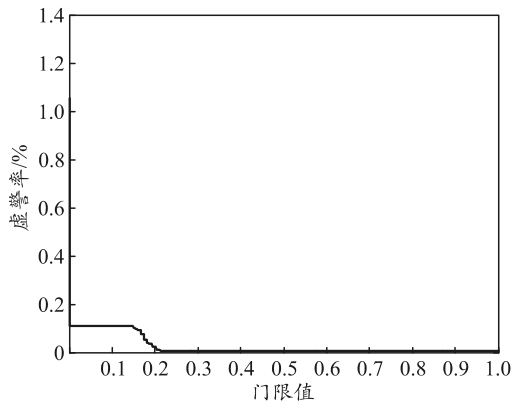


图 3 融合漏警率  $\alpha_0$  和阈值  $\lambda$  的相关曲线

在获取了门限之后，利用式(5)对随机生成的 10 000 组数据进行统计，融合漏警率如表 1 所示。

表 1 混合信源漏警率仿真实验结果 %

实验次数	1	2	3	4	5
融合漏警率	0.010	0.014	0.014	0.013	0.010
原始漏警率	10.05	9.92	10.04	9.99	9.84
实验次数	6	7	8	9	10
融合漏警率	0.010	0.016	0.005	0.01	0.015
原始漏警率	9.90	9.89	10.05	9.96	9.83

从结果可以看到：与单个报警器相比，混合信源的融合算法漏警率明显下降，由平均 9.95% 下降到 0.012%。与点源信源相比，混合信源在信源数量减少的情况下，融合漏警率更小。分析其可能的原因是遥测信源可以在一定的时间范围内对同一云团

\*\*\*\*\*

(上接第 62 页)

[4] 陆野, 周克栋, 赫雷, 等. 坡膛结构参数对枪械内弹道挤进时期的影响研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1363-1369.

[5] 陈龙淼, 林贵, 李淼. 弹丸高速挤进过程动态试验设计与分析[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(2): 139-143.

[6] 樊黎霞, 何湘玥. 弹丸挤进过程的有限元模拟与分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 963-969.

[7] 袁永立, 何国求, 张玉刚, 等. 覆铜钢拉伸性能与显微

进行异步检测，增加了有效检测数据的数量，从而减少了检测错误的概率。

### 4 结束语

点源信源和远程遥测信源的混合部署是未来战场上防化侦察装备运用的主要方式。笔者分析了混合信源检测融合算法的主要特点，并设计了基于 N-P 准则和异步判决的融合算法来解决混合信源的分布式检测问题。数值仿真结果表明：该算法能够显著降低漏警率，对准确检测战场化学危害情况具有重要作用。

### 参考文献:

[1] 胡学海, 王厚军, 黄建国. 分布式目标检测融合决策优化算法[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(3): 375-379.

[2] 李勇, 汪立新, 相威. 基于门限自适应的分布式检测融合算法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(1): 343-345.

[3] 陈金周, 陈海平, 王玄玉, 等. 化学武器效应及销毁[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002: 150-155.

[4] 纪军, 黄启斌, 丁学全. 国外化学毒剂检测器技术与评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 27-40.

[5] 夏美文. 基于双 MCU 的多通道信号检测模块[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 20-23.

[6] VISWANATHAN R, VARSHNEY P K. Distributed detection with multiple sensors I. Fundamentals[J]. proceedings of the IEEE. 1997, 85(1): 54-63.

结构分析[J]. 金属功能材料, 2012, 19(2): 47-54.

[8] 周彦煌, 王升晨. 两相流内弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990: 31-60.

[9] 王鹏, 杨国来, 葛建立, 等. 基于 Johnson-cook 本构模型的弹带挤进过程数值模拟[J]. 弹道学报, 2015, 27(2): 55-61.

[10] 李磊, 张先锋, 吴雪, 等. 不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数[J]. 高压物理学报, 2017, 31(3): 239-248.