

Chapitre 6

Détection CFAR distribuée

1. Systèmes de détection distribuée

Récemment, les systèmes de détection distribuée basés sur plusieurs senseurs avec une fusion de données ont été largement utilisés. Ceci est dû aux nombreux avantages par rapport aux détecteurs centralisés tels que la rapidité, la fiabilité et la capacité de couvrir une grande surface de surveillance, ..., etc. Dans ces systèmes comme montrés dans la Figure 1, les radars sont espacés géographiquement et fonctionnent de manière à ce que la détection se fasse dans le même espace de surveillance. Les observations captées auprès de chaque senseur sont envoyées afin de faire leurs traitements au niveau du centre de fusion de données. Selon un critère de performance, les décisions partielles des détecteurs sont réunies et combinées suivant une règle de fusion optimale pour prendre la décision globale.

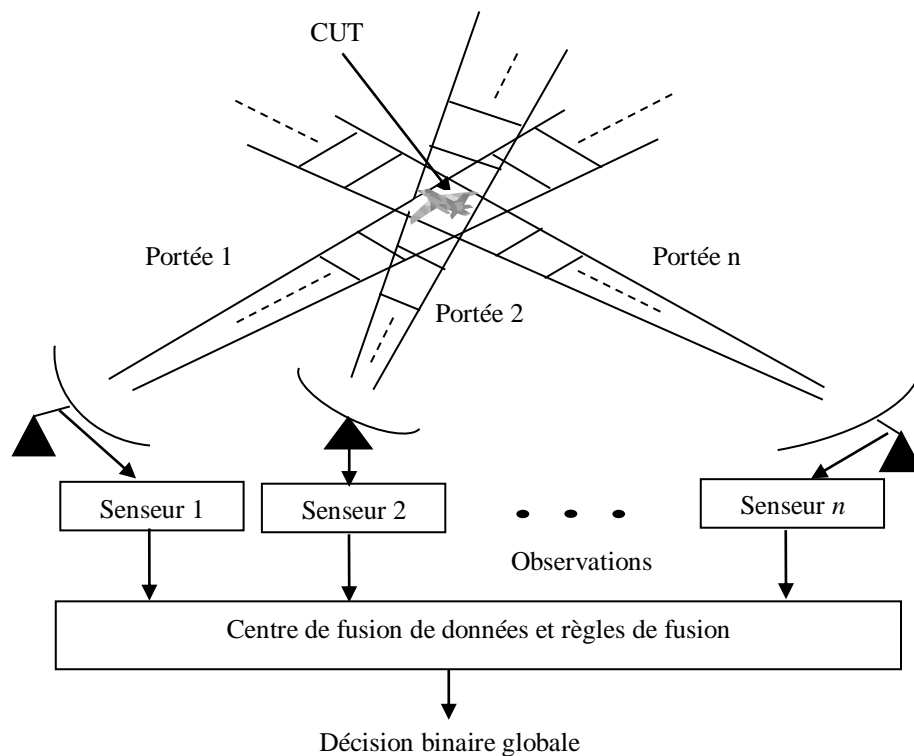


Figure 1. Système de détection radar distribuée

2. Différentes topologies de systèmes distribués

Deux types de topologies pour les systèmes de détection CFAR distribués sont considérés. La topologie série et la topologie parallèle. La configuration série est illustrée par la Figure 2, où nous avons représenté une variante sans centre de fusion de données. Dans ce cas, le premier détecteur transmet sa décision locale, D_1 , au deuxième détecteur lequel effectue à son tour une décision, D_2 , basée d'une part sur sa propre observation et d'autre part, sur la décision locale du premier détecteur et ainsi de suite. La décision, D_o , du dernier détecteur est considérée comme étant la décision définitive du réseau. Dans la Figure 3, nous présentons une autre variante des systèmes distribués à réseaux série avec un centre de fusion de donnée. Dans ce modèle, le $(i-1)^{ème}$ centre de fusion transmet sa décision au $i^{ème}$ centre de fusion lequel utilise conjointement avec l'observation de $i^{ème}$ senseur pour élaborer une décision. Le dernier centre de fusion fournit la décision finale. En général, les réseaux de détection distribuée série sont peut utilisés à cause de leur sensibilité aux défauts de liaisons. La deuxième topologie est la plus populaire dans beaucoup d'applications pour des avantages qu'elle offre tels que le coût et la fiabilité. Il existe deux types de structures parallèles. Le système de senseurs distribués avec traitement centralisé comme indiqué dans la Figure 2 et système de détection distribuée avec centre de fusion de données comme montré dans la Figure 3. Dans le premier cas, les observations, $Y_i, i=1, \dots, n$, sont transmises directement au centre principal sans aucun traitement au niveau des détecteurs. Cette transmission nécessite des canaux à large bande passante de communication. Dans le deuxième cas, la grande partie du traitement est effectuée au niveau des détecteurs et leurs résultats sont acheminés vers le centre de fusion de données où le reste du traitement est effectué pour obtenir la décision finale.

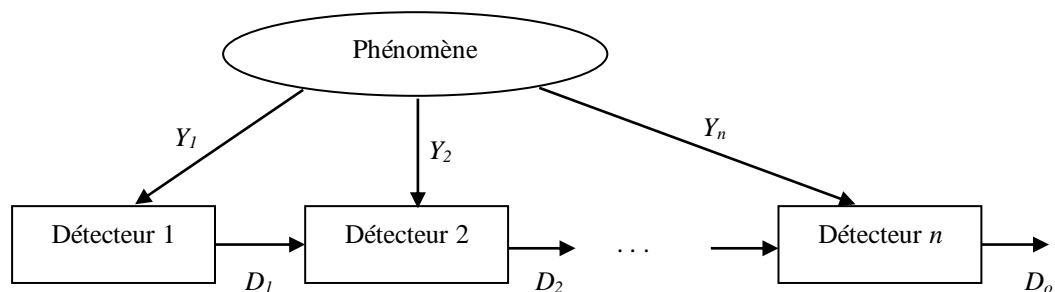


Figure 2. Structure série d'un système de senseurs distribués sans centre de fusion de données

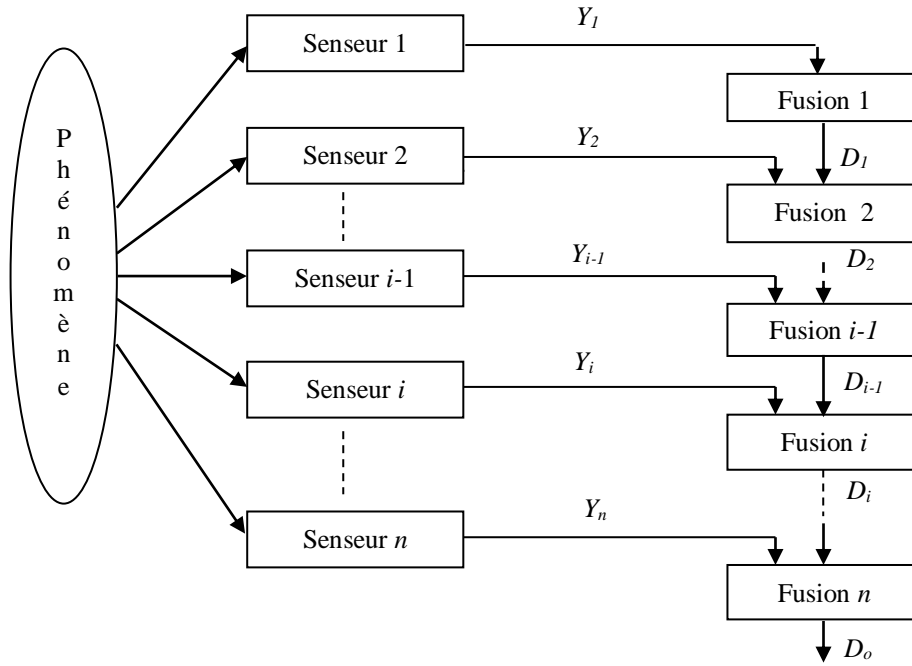


Figure 3. Structure série d'un système de senseurs distribués avec centre de fusion de données

3. Analyse des systèmes distribués

Dans le système considéré dans la Figure 3, la structure de base est composée d'un ensemble de détecteurs périphériques et d'un centre de fusion de données. Chaque senseur effectue une décision locale, basée sur ses propres observations et la transmet au centre de fusion de données où une décision globale est maintenue. Nous admettons que P_{FA} , P_M et P_D pour chaque détecteur sont notées P_{FAi} , P_{Mi} et P_{Di} , pour $i=1,2,\dots,n$. Le centre de fusion reçoit un vecteur D d'éléments D_i d'où

$$D_i = \begin{cases} 0 & \text{si le détecteur } i \text{ décide } H_0 \\ 1 & \text{si le détecteur } i \text{ décide } H_1 \end{cases} \quad (1)$$

Pour exprimer la P_{FA} globale, P_{FA_t} , la P_M globale, P_{M_t} , et la P_D globale, P_{D_t} en fonction de P_{Di} et P_{FAi} pour $i=1,2,\dots,n$, on définit les quantités suivantes:

$$M_D = \prod_{S_0} P_{M_j} \prod_{S_1} (1 - P_{M_k}) = P(D/H_1) \quad (2)$$

$$F_D = \prod_{S_0} (1 - P_{FA_j}) \prod_{S_1} P_{FA_k} = P(D/H_0) \quad (3)$$

$$P_{KD} = P_r(D_o=K/D) \quad K=0,1 \quad (4)$$

où

D_o : est la décision globale au niveau du centre de fusion de données.

S_0 : les éléments nuls du vecteur D , $D_j=0, j \neq 0$

S_1 : les éléments non nulles du vecteurs D , $D_k=1, k \neq 0$

Alors, les expressions de P_{Mt} , P_{FAI} et P_{Dt} sont exprimées par:

$$P_{Mt} = \sum_D P_{oD} M_D \quad (5)$$

$$P_{FAI} = \sum_D P_{1D} F_D \quad (6)$$

$$P_{Dt} = 1 - P_{Mt} \quad (7)$$

où \sum_D = somme sur toutes les valeurs possibles de D . Les probabilités de transition, P_{oD} et P_{1D}

sont calculées suivant une règle de fusion donnée. On sait que D contient 2^n combinaisons possibles, il y a 2^n possibilités de P_{oD} et P_{1D} . Le but est de maximiser P_{Dt} tout en maintenant P_{FAI} constante. Pour cela, on utilise la fonction objective suivante.

$$J = (T_1, T_2, \dots, T_n) = P_{Mt}((S_1, T_1), (S_2, T_2), \dots, (S_n, T_n)) + \varepsilon [P_{FAI}(T_1, T_2, \dots, T_n) - \alpha_0] \quad (8)$$

où $T_i, i=1, \dots, n$ sont des coefficients des seuils de détection pour chaque senseur, ε est le multiplicateur de Lagrange, et α_0 est la valeur désirée du P_{FAI} .

Pour maximiser P_{Dt} , les dérivés partielles de la fonction objective, J , par rapport aux $T_i, i=1, \dots, n$, doivent être nulles.

$$\frac{\partial J((S_1, T_1), (S_2, T_2), \dots, (S_n, T_n))}{\partial T_m} = 0 \quad m=1, \dots, n \quad (9)$$

Comme on a $(n+1)$ variables $(T_1, T_2, \dots, T_n, \varepsilon)$ on ajoute à la $(n+1)^{ème}$ équations, l'équation $P_{FAI} = \alpha_0$. Dans cette étude, on va considérer les règles de fusion extrêmes "AND" et "OR".

(a) Règle de fusion "AND" : La décision globale au niveau du centre de fusion est égale à 1 si toutes les décisions sont à 1 sinon c'est le contraire.

$$D_0 = D_1 \text{ "AND" } D_2 \text{ "AND" } D_3, \dots, \text{ "AND" } D_n \quad (10)$$

Les probabilités de transition deviennent :

$$P_{0D} = \begin{cases} 0 & \text{si } D = (1, 1, 1, \dots, 1)^T \\ 1 & \text{si non} \end{cases} \quad (11)$$

et

$$P_{1D} = \begin{cases} 1 & \text{si } D = (1, 1, 1, \dots, 1)^T \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (12)$$

En substituant les équations (11), (12) et (7) dans (5) et (6), nous obtenons pour le cas de n détecteurs :

$$P_{D_i} = \prod_{i=1}^n P_{D_i} \quad (13)$$

et

$$P_{FA_i} = \prod_{i=1}^n P_{FA_i} \quad (14)$$

D'où, la fonction objective :

$$J = \prod_{i=1}^n P_{M_i} + \varepsilon \left[\prod_{i=1}^n P_{FA_i} - \alpha_0 \right] \quad (15)$$

(ii) Règle de fusion "OR": De la même façon, D_0 est égale à 0 si toutes les décisions sont à 0.

$$D_0 = D_1 \text{ "OR" } D_2, \dots, \text{ "OR" } D_n. \quad (16)$$

Les probabilités de transition deviennent :

$$P_{0D} = \begin{cases} 1 & \text{si } D = (0,0,0,\dots,0)^T \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (17)$$

et

$$P_{1D} = \begin{cases} 0 & \text{si } D = (1,1,1,\dots,1)^T \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (18)$$

En remplaçant les équations (17) et (18) dans (5) et (6), nous obtenons :

$$P_M = \prod_{i=1}^n P_{M_i} \quad (20)$$

donc

$$P_{Dt} = 1 - P_{Mt} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{Di}) \quad (21)$$

et

$$P_{FA_t} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{FA_i}) \quad (22)$$

Dans le cas général, les décisions partielles sont combinées pour produire une décision globale selon la règle de fusion sélectionnée k parmi n et la cible est déclarée présente si au moins k parmi n détecteurs font une même décision. Le rang k est choisi entre 1 et n dont $k=1$ et $k=n$ représente respectivement les règles de fusion ‘‘OR’’ et ‘‘AND’’. L’expression de la P_{FA} globale (P_{FA_t}) est donnée par :

$$P_{FA_t} = \sum_{i=k}^n \left\{ \left(\sum_{p=0}^{i-k} (-1)^p \binom{i}{p} \right) \left(\sum_{q=1}^{n-i+1} P_{FA_q} \left(\sum_{r=q+1}^{n-i+2} P_{FA_r} (\dots) \right) \right) \right\} \quad (23)$$

où P_{FA_i} est la P_{FA} du senseur local pour $i=1, \dots, n$.

Pour un cas particulier de la règle de fusion ‘‘AND’’ ($k=n$), P_{FA_t} peut être simplifiée à partir de l’équation (23) comme :

$$P_{FA_t} = \prod_{i=1}^n P_{FA_i} \quad (24)$$

Ainsi, pour la règle de fusion ‘‘OR’’ ($k=1$), l’équation (23) devient :

$$P_{FA_t} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{FA_i}) \quad (25)$$

Dans le cas de trois détecteurs $n=3$, P_{FA_t} pour la règle de fusion ‘‘MAJORITY’’ (i.e., $k=2$) peut être écrite à partir de l’équation (23) comme :

$$P_{FA_t} = P_{FA_1} \cdot P_{FA_2} + P_{FA_2} \cdot P_{FA_3} + P_{FA_1} \cdot P_{FA_3} - 2P_{FA_1} \cdot P_{FA_2} \cdot P_{FA_3} \quad (26)$$

Similairement, nous remplaçons P_{FA_i} par la P_D locale (P_{Di}) dans les équations (23), (24), (25) et (26) pour obtenir la P_D globale (P_{Dt}).