

Principes d'identification de signaux radars utilisant imprécisions, incertitudes, informations contextuelles et fiabilités

Jean-François GRANDIN, Didier.NEVEU

THOMSON-CSF DETEXIS La Clef de Saint-Pierre 1, Boulevard Jean Moulin 78852 Elancourt Cedex

e-mail : jean-francois.grandin@detexis.thomson-csf.com

Résumé :

On décrit un mécanisme d'identification de modes radars destiné à être utilisé dans un système d'auto-protection ou de renseignement. Les informations prises en compte pour réaliser l'identification sont : Les mesures, les signatures connues des objets à reconnaître (modes radars, plates-formes...), la situation tactique instantanée, les informations opérateurs. Afin de répondre aux principales exigences de l'identification (rapidité, robustesse aux erreurs, aux valeurs aberrantes, aux valeurs manquantes,...) des solutions originales sont mises en œuvre (indexage tolérant de la base de données, formalisation Bayésienne intégrant l'imprécision, l'incertain ainsi que la fiabilité des données).

Abstract :

This paper describes an identification mechanism devoted to be in a self-protection or an ELINT system. Information taken into account at the input of the Identification function is : measurements, labelled patterns of objects to be recognised (Radars modes, platforms...), instantaneous tactical situation, information given by operators. In order to fulfil the main requirements of the identification process (speed, robustness to errors, to outliers, to missing measurements,...) original solutions are implemented (database tolerant indexing, Bayesian formalism with integration of data accuracy, data uncertainty and data fiability).

1. Bilan des informations

1.1. Objectif de l'identification

L'identification des radars est une composante essentielle des équipements de guerre électronique [1] : elle vise à déterminer quels modes radars (décrits dans une bibliothèque) sont interceptés à un instant donné, ce qui permet de mettre en œuvre des manœuvres appropriées de contre-mesure (auto-protection) ou d'enrichir la bibliothèque courante à l'aide d'une description affinée des modes connus ou en y ajoutant des nouveaux modes non répertoriés précédemment (renseignement).

Un récepteur « capture » les impulsions émises par les radars de l'environnement. Les impulsions sont traitées par la fonction d'Extraction qui forme des groupes homogènes (appelés plots) censés représenter une seule émission chacun. L'identification consiste essentiellement à comparer les mesures avec des caractéristiques de modes décrits dans une bibliothèque opérationnelle. La taille d'une bibliothèque opérationnelle peut être très grande (plusieurs milliers de modes), ce qui justifie d'apporter un soin particulier à la complexité des traitements employés.

1.2. Données disponibles

Les algorithmes d'identification utilisent :

- Les mesures (plots) ; décrits par un résumé statistique de la distribution des mesures sur impulsions.
- Les données opérationnelles (Bibliothèque) ; une telle bibliothèque inclut, outre la description des modes (objets terminaux) une description hiérarchique qui englobe différents niveaux (bâtiments porteurs, systèmes d'armes, radars) et décrit les objets élémentaires ainsi que les liens entre les objets.
- Les informations tactiques ; Les informations tactiques regroupent les informations contextuelles qui

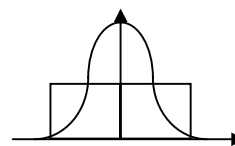
permettent d'affiner les choix de l'identification. Elles peuvent être disponibles en préambule de la mission (ex : tel bâtiment est présent sur la zone d'opérations), soit acquises (tel bâtiment, tel radar a été détecté).

- Les informations fournies par l'opérateur.

1.3. Qualités des Données

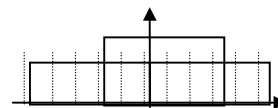
La précision mesure un écart entre la valeur estimée d'un paramètre et sa valeur réelle et définit un domaine de variation possible pour ce paramètre.

La certitude mesure la probabilité que l'assertion précédente soit réalisée et peut donc s'interpréter comme l'intégrale sur la fenêtre définie par la précision de la densité de probabilité du paramètre.



Cas d'une mesure :

- la précision est de s ,
- la certitude de l'appartenance à la fenêtre $(\pm)3s$ est de 0,99



Cas d'un mode en bibliothèque:

- l'opérateur estime que 80 % des mesures potentielles d'un de ces modes sont dans la fourchette large.
- il estime que 50 % des mesures sont dans la fourchette étroite.

Fig. 1 : Certitude et Précision

C'est la loi d'erreur (inconnue) qui définit la correspondance entre les 2 notions. Lorsque la loi d'erreur est connue une valeur de la précision définit implicitement une certitude et réciproquement. La valeur estimée, la précision et la certitude définissent un modèle de variation du paramètre.

La fiabilité caractérise la validité supposée de ce modèle. Pour une mesure, la fiabilité est la probabilité que le paramètre mesuré le soit selon le fonctionnement nominal du mesureur et non une valeur aberrante. La certitude exprime un terme $P(X/\text{information fiable})$. Lorsque l'information n'est pas fiable à 100% (voire pas du tout) on doit introduire un terme correctif qui est quant à lui homogène à $P(X/\text{information non fiable})$.

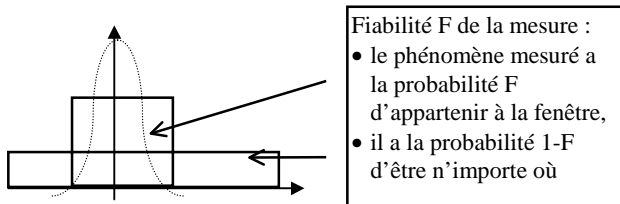


Fig. 2 : Fiabilité

Un comportement correct face à l'imprécis/l'incertain et la fiabilité des données/des mesures doit être le suivant :

- une imprécision croissante (une précision décroissante) doit lisser les résultats,
- une incertitude croissante (une certitude décroissante) doit lisser les résultats,
- une fiabilité décroissante doit lisser les résultats.

2. Description du procédé

Le processus complet est scindé en trois étapes :

- L'étape de **réduction statistique** a pour but de ne proposer au traitement complet que les nouveaux plots ou ceux pour lesquels les valeurs des paramètres mesurés ont suffisamment changé.
- L'étape de **sélection des candidats** détermine les modes de la bibliothèque qui feront l'objet d'une comparaison fine avec la mesure.
- L'étape de **notation des candidats** réalise cette comparaison.

L'amélioration des résultats au cours du temps peut s'opérer par l'affinage des mesures et par l'accumulation d'information tactique.

2.1. Réduction statistique

On utilise un mécanisme de regroupement des mesures successives autour de prototypes qui constituent les données d'entrée de la sélection des candidats.

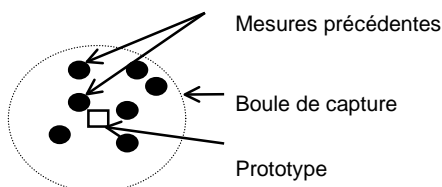


Fig. 3 : Réduction statistique

Chaque prototype est défini par une valeur centrale et une boule d'appartenance qui évoluent au cours du temps. Toute nouvelle mesure est comparée au prototype existant

et lui est rattachée si elle se situe dans la boule d'appartenance ou initie un nouveau prototype. La première mesure d'un plot initie un prototype sur lequel l'identification est faite et qui sera ensuite mis à jour au fur et à mesure de l'arrivée des mesures suivantes. On ne refait alors l'identification que lors d'un changement de prototype. La forme et la taille des prototypes sont définies localement par le « grain » de l'espace des événements. Ceci permet de gérer les corrélations de mesure.

2.2. Sélection des candidats

L'objectif principal est de ne pas éliminer dès cette étape des « bons » candidats. Toutefois, si un seul mode candidat est produit à ce niveau, ce traitement peut s'avérer suffisant.

L'organisation des modes de la base au sein d'une structure de type arbre d'intervalles [2] conduit à une profondeur moyenne $\log_2(n)$. La complexité de recherche des k intervalles se superposant à un intervalle de recherche est alors de $k + \log_2(n)$. Soit pour 5000 modes, une profondeur 12. La solution choisie présente l'intérêt supplémentaire de consommer une taille mémoire proportionnelle au nombre de signatures et indépendante du nombre d'ambiguïtés de la bibliothèque.

Le mécanisme d'indexation consiste à faire passer pour chacun des paramètres l'intervalle de mesure dans l'arbre et à noter tous les intervalles l'interceptant. Afin de pallier aux perturbations (absence de mesure, mesure aberrante) les arbres construits au préalable comportent des tests redondants et pondérés.

2.3. Notation des candidats

On se situe dans un cadre probabiliste [3] et on interprète la note du mode M comme la probabilité que « le mode M soit responsable de la mesure m », compte tenu à la fois des informations tactiques dont on dispose à cet instant (et intégrant toute la connaissance a priori et la connaissance acquise au cours du temps) et de la ressemblance du mode avec la mesure.

Mise à jour par la formule de Bayes

Le mécanisme complet d'identification repose, à tous les étages, sur l'utilisation de la formule de Bayes :

$$P(M_i / \text{mesure}) = \frac{P(\text{mesure} / M_i) \cdot P(M_i)}{\sum_j P(\text{mesure} / M_j) \cdot P(M_j)} \quad (1)$$

avec :

- $P(M_j)$ = probabilité a priori du mode M_j , compte tenu de toutes les informations disponibles à cet instant (en particulier probabilité de présence du porteur P) et les connaissances opérationnelles (probabilité que le mode M_j soit émis par le porteur P).
- $P(\text{mesure}/M_j)$ = adéquation (mesure / mode M_j). La mesure se décompose elle-même en sous-champs indépendants m_k (par exemple la fréquence et la PRI), ce terme est égal au produit des $P(m_k/M_j)$ que l'on calculera de façon indépendante.

Prise en compte de l'imprécis et de l'incertain

La façon d'exprimer le terme $P(\text{mesure}(k)/M_j)$ lorsque la sous-mesure $\text{mesure}(k)$ et le mode M_j sont tous les deux décrits par un volume d'incertitude à 100 % (volume à 3σ) sur laquelle celle-ci est supposée uniforme est :

$$P(\text{mesure} / \text{mod } e) = \frac{\text{Volume}(\text{mesure} \cap \text{mod } e)}{\text{Volume}(\text{mod } e)} \quad (2)$$

Prise en compte de la fiabilité

L'approche adoptée diffère sensiblement de l'approche classique telle que décrite dans l'article d'I. Bloch [4] et qui permet de pondérer des diagnostics établis par des experts. Elle correspond à la formule proposée par A. Appriou [5] dans un cadre théorie de l'évidence [6], à la différence près que cette formule est établie ici sous axiomes de la théorie des probabilités. La fiabilité de la mesure caractérise la pertinence du modèle qui la sous-tend : la probabilité que la mesure soit fiable est de f , la probabilité qu'elle ne le soit pas est donc de $(1-f)$.

$$P(M/\text{mesure}) = F.P(M/\text{mesure}, \text{mesure fiable}) + (1-F).P(M) \quad (3)$$

$$P(M/\text{mesure}) = (F.(\frac{P(\text{mesure}/M)}{\sum_j P(\text{mesure}/M_j).P(M_j)})) + (1-F).P(M)$$

Une telle expression s'apparente à une expression de filtrage avec un terme d'innovation qui est plus ou moins pris en compte par rapport à l'état précédent.

Les étapes de la notation des candidats

Le calcul complet consiste donc :

- à déterminer chacun des termes $P(m_j/M_i)$
- à multiplier en les pondérant (module d'arbitrage) pour obtenir une globale,
- à injecter les probabilités a priori $P(M_i)$,
- et à normaliser pour obtenir une note d'identification de mode comprise entre 0 et 1.

3. Architecture complète du traitement

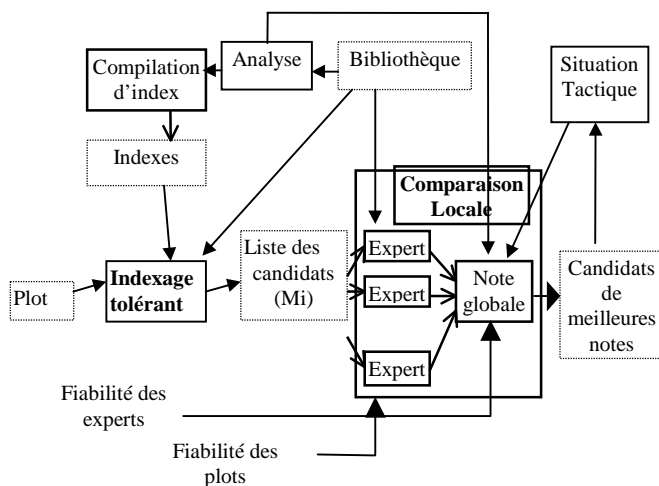


Fig. 4 : Architecture de l'Identification

Le processus complet se décompose en des traitements préliminaires (compilation d'un index tolérant) et des traitements on line (sélection des candidats par indexage tolérant, comparaison locale (matching) utilisant des modules experts et un module d'arbitrage).

4. Exemple

Les traitements ont été validés sur une base de données fictive comportant 100 modes numérotés C'est le mode numéro 4 de la base qui est émis. Le plot reçu se situe dans le domaine le plus peuplé et présente potentiellement un grand nombre de modes candidats. La recherche des candidats a été effectuée et les 16 meilleurs sont retenus pour les phases suivantes.

La figure 1 représente les notes obtenues sur les 16 modes candidats (numérotés de 1 à 16) avec les 3 modules experts :

- en haut : expert sur paramètres primaires (fréq. + LI),
- au milieu : expert en PRI,
- en bas : expert en balayage.

La fiabilité est ici de 0.9 en PRI, ce qui donne une note minimale de 0.1 pour tous les candidats selon ce paramètre. Le candidat 4 est celui qui obtient les meilleures notes partout et on constate que les 2 seuls autres modes ayant une note acceptable sur paramètres primaires ont une note faible en PRI et en balayage ce qui leur donnera une faible note globale (voir courbe du bas).

Les figures 2, 2bis et 2ter montrent l'influence de la qualité des mesures sur la note finale. On représente la note globale obtenue (normalisée à 1) pour l'ensemble des modes de la bibliothèque (ce qui inclut les candidats et les autres). En effet, ce ne sont pas toujours les mêmes candidats qui sont retenus et cette représentation est la seule qui permette d'établir une comparaison. On constate que pour une bonne mesure, le mode émis (mode 4) est effectivement correctement identifié (note quasiment égale à 1). Lorsque la qualité de la mesure se dégrade, la note du mode réel baisse au détriment de celles des autres candidats.

Les figures 3 et 4 montrent l'influence de l'introduction de la fiabilité. Dans le cas traité, la fiabilité est bonne en fréquence (0.9) mais ne vaut que 0.5 en LI. Une mesure sur deux de LI est aberrante (trop éloignée de la véritable valeur). On illustre les 2 cas :

- figures 3 et 3bis : la mesure est en fait bonne et la prise en compte de la fiabilité est pessimiste.
- figures 4 et 4bis : la mesure est en fait mauvaise et la prise en compte de la fiabilité .

Dans le premier cas (fig 3 et 3bis), on constate un effet de lissage avec une baisse de la note du meilleur mode, une remontée de 2 autres modes et l'obtention d'un talon minimum pour tout le monde ($0.1 \times 0.5 = 0.05$). Dans le deuxième cas (fig 4 et 4bis), sans fiabilité le mode émis a

une note nulle sur paramètres primaires et donc une note globale nulle. Il est éliminé et c'est le candidat 5 qui obtient le meilleur score. Avec fiabilité, le « bon mode » est retenu parmi les candidats potentiels.

La figure 5 illustre l'évolution des notes de ce mode dans le temps. La chronologie est la suivante :

- première apparition du mode (lorsqu'on procède à l'identification, on ignore le mode, le radar et le porteur)
- identification du porteur (sur la base de données tactiques) et restriction des candidats aux modes de ce porteur
- identification du radar et subséquemment du mode (note quasiment égale à 1).

5. Conclusion

Le mécanisme proposé répond à plusieurs objectifs :

- la rapidité de traitement en n'effectuant que les opérations essentielles,
- la gestion des corrélations temporelles,
- la robustesse aux incertitudes,
- la robustesse aux mesures aberrantes et aux informations peu fiables,
- la prise en compte de l'ensemble des sources d'information : mesures, données techniques du renseignement, situation tactique.

Références :

- [1] C.L.Davis, « Electronic Intelligence : the analysis of radar signals », Artech House, 1993
- [2] Franco P.Preparata, M.I.Shamos, « Computational Geometry : an introduction », Springer-Verlag, 1985
- [3] W.Feller, « An introduction to probability theory and its applications », Wiley, 1966
- [4] Isabelle Bloch, "Incertitude, imprécision et additivité en fusion de données : point de vue historique", Revue Traitement du signal, 1996, vol. 13, N°4.
- [5] A. Appriou, « Probabilités et incertitude en fusion de données multi-senseurs » RSTD – 1^{er} trimestre 1991.
- [6] G. Shafer, « A mathematical theory of evidence », Princeton University Press 1976

Figures Annexes

figure 1 - utilisation des experts indépendants : notes délivrées par les experts pour les 16 modes candidats :

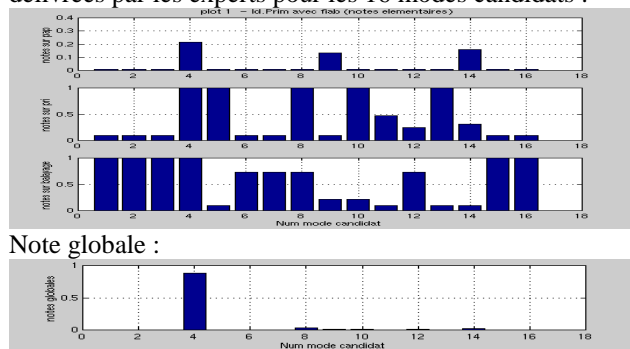


figure 2 : influence de la qualité des mesures : Notes globales de tous les modes de la base

figure 2 : (bonne qualité des mesures)

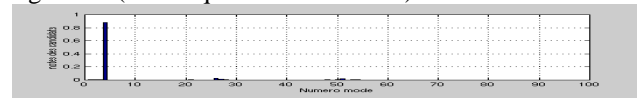


figure 2bis : (qualité moyenne des mesures)

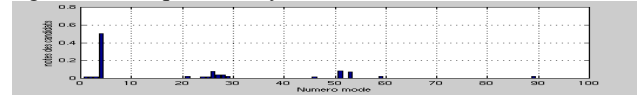


figure 2ter : (mauvaise qualité des mesures)

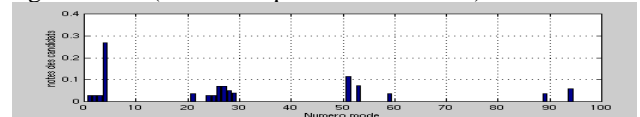


figure 3 : influence de la fiabilité : cas d'une bonne mesure en LI - pas de prise en compte de la fiabilité

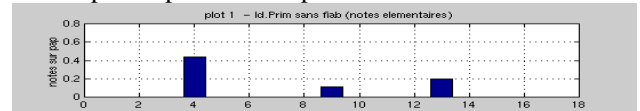


figure 3bis : cas d'une bonne mesure en LI - prise en compte de la fiabilité (F=0.5 selon le paramètre LI, F = 0.9 en fréquence)

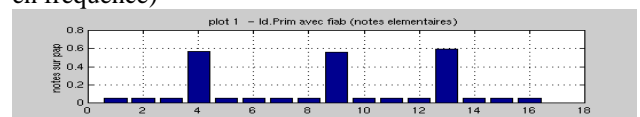


figure 4 : cas d'une mesure aberrante en LI - pas de prise en compte de la fiabilité (mesure jugée fiable à 100 %)

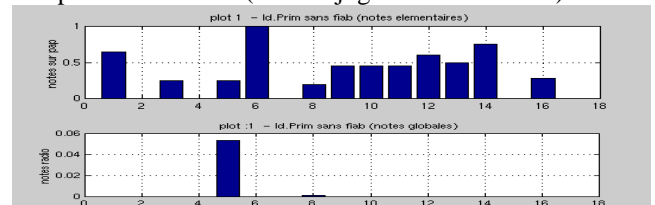


figure 4bis : cas d'une mesure aberrante en LI - avec prise en compte de la fiabilité (F=0.5 selon le paramètre LI, F = 0.9 en fréquence)

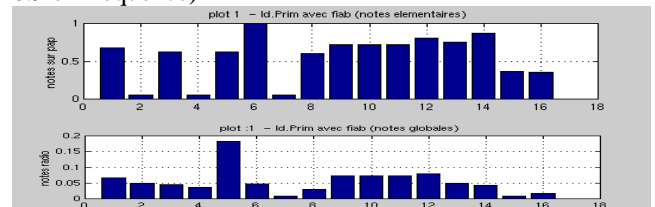


figure 5 : intégration temporelle - évolution au cours du temps de la note du mode réellement émis :

