

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 20 au 24 MAI 1985

COMPARAISON DE DIVERSES CHAINES DE DETECTION
EN VUE D'APPLICATIONS OPERATIONNELLES

M.E. BOUHIER*

M.ZAKHARIA**

*Océano-Instruments,
4 avenue Henri Poincaré , 92167 ANTONY Cedex

** Université Catholique de Lyon, labo.d'Ichtyologie ;
ICPI, labo.de Traitement du Signal,25 rue du Plat LYON 2è

RESUME

Afin de décider de la présence ou de l'absence d'un signal noyé dans un bruit parasite, de nombreux auteurs ont introduit divers types de chaînes de détection. Cet article essaie, dans la mesure du possible, d'effectuer une synthèse comparée de ces différents travaux.

Le problème de l'ingénieur est de savoir, dans une situation donnée (c'est-à-dire pour des caractéristiques statistiques et spectrales particulières du signal et du bruit, et pour un rapport signal sur bruit donné) quel type de récepteur choisir pour atteindre les performances de détection fixées par le cahier des charges.

Ce choix est d'autant plus difficile que la diversité des chaînes de traitement conduit à des grandeurs de sortie de nature physique différente.

Pour comparer ces diverses chaînes nous utilisons la notion de rapport $[S/B]$ introduite par A.BLANC-LAPIERRE et B.PICINBONO en 1961.

Ce critère compare l'augmentation de composante continue apportée (en sortie du détecteur) par l'arrivée du signal à détecter, aux fluctuations créées par le bruit parasite en l'absence (ou en présence) de ce signal.

Ce dernier traduit le comportement d'un détecteur de seuil, placé en sortie des chaînes de réception et dont la fonction est de donner une information binaire sur la présence ou l'absence du signal.

SUMMARY

Many authors have introduced various detection systems in order to help in deciding if a signal, spoiled by noise, is present or absent. In this paper we try, as far as possible, to establish a comparison between these systems.

The engineer problem is to know, in a given situation (i.e. for given spectral and statistical properties of the signal and the noise, and for a given signal to noise ratio), which receiver to choose in order to achieve given detection performances.

This choice is especially hard because the various detection systems lead to output quantities of different physical origin.

To compare these receivers, we will use the definition of the output signal to noise ratio introduced by A.BLANC-LAPIERRE and B.PICINBONO in 1961. This criterion compares the increasing of the mean value (at the detection system output) due to the arrival of the signal to detect, to the fluctuations induced by the interference noise, in the case this signal is absent (or present). It describes the behaviour of a threshold detector, placed at the output of the receiving systems, and asked to provide binary information on the signal presence.



COMPARAISON DE DIVERSES CHAINES DE DETECTION
EN VUE D'APPLICATIONS OPERATIONNELLES
M.E. BOUHIER* M.ZAKHARIA**

I - INTRODUCTION

Afin de concevoir un récepteur approprié à une situation pratique donnée, l'ingénieur doit se placer du point de vue d'un détecteur de seuil utilisant l'information fournie par une chaîne de réception. Cette information lui permettant de décider de la présence ou de l'absence d'un signal perturbé par des parasites.

Vue par le détecteur de seuil, la "meilleure chaîne de détection" sera celle qui fournira la plus grande variation de tension en sortie (comparée aux fluctuations parasites) lors de l'arrivée du signal à détecter.

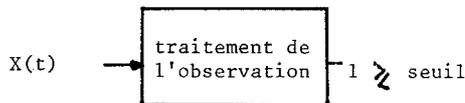
II - CRITERES DE DECISION OU DE DETECTION

1) Définition [1] [2]

Le critère de décision est une fonctionnelle du signal d'observation X(t) nous permettant de décider (de choisir) "au mieux" entre les deux hypothèses possibles H₀ et H₁ :

- * H₀ X(t) = B(t) bruit seul
- * H₁ X(t) = S(t) + B(t) signal noyé dans le bruit

Soit donc :



Le traitement de l'observation donne le scalaire l qui est un "condensé" de l'information contenue dans X(t).

Un tel critère permet d'élaborer et/ou de comparer des systèmes de détection.

2) Le critère du rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit (noté [S/B]) est un scalaire ou une fonctionnelle qui exprime le "contraste" entre la présence et l'absence du signal.

Or, suivant les situations opérationnelles envisagées, plusieurs définitions du rapport [S/B] sont possibles [3]. Il est alors important de prendre la définition qui représente au mieux cette situation réelle.

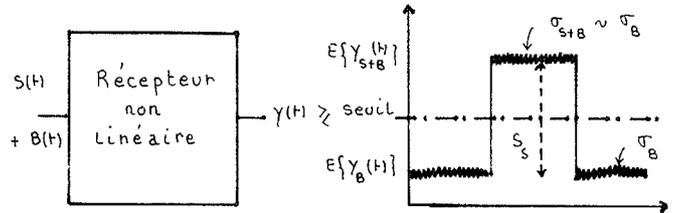
En pratique, les variations de la sortie des diverses chaînes de réception actionnent un détecteur de seuil, dont la fonction est de donner une information binaire sur la présence ou l'absence du signal. Le détecteur de seuil ne "réagit" qu'à des variations de tension en entrée, sans pouvoir nécessairement les relier à des variations de quantités physiques comparables. En effet la diversité des chaînes de traitement conduit à des grandeurs de sortie de nature physique différente (tension, puissance moyenne, énergie...).

Pour comparer les chaînes de détection, nous devons utiliser une définition du rapport [S/B] qui traduit le comportement de l'ensemble chaîne de réception et détecteur de seuil.

A. BLANC-LAPIERRE et B. PICINBONO [3] définissent, pour des détecteurs non linéaires un rapport [S/B] de sortie basé sur "l'existence d'une variation de la composante continue en sortie due à une variation de la puissance moyenne globale en entrée lorsque le

signal à détecter survient" soit :

$$\left[\frac{S}{B} \right] = \frac{\text{Valeur moyenne } [S+B] - \text{Valeur moyenne du bruit seul}}{\text{fluctuations en sortie}}$$



B(t) : bruit additif

$$\left[\frac{S}{B} \right]_{\text{Sortie}} = \frac{E\{\gamma_{S+B}\} - E\{\gamma_B\}}{\sigma_B} = \frac{S_s}{B_s}$$

avec B_s = σ_B ~ σ_{S+B} en supposant que les fluctuations (chiffrees par la variance) soient les mêmes en présence ou en absence de signal (i.e. que le rapport [S/B] en entrée est très faible)

Nous adopterons donc cette définition dans toute la suite de notre étude.

3) critères statistiques de décision

Rappelons que la présence de parasites inconnus (ou aléatoires) ne nous permet plus de décider avec "certitude" de la présence ou de l'absence du signal s(t). Afin de tenir compte des propriétés statistiques de ces parasites, divers auteurs [1] [2] formulent d'autres critères devant construire un rapport, appelé rapport de vraisemblance, à partir de l'observation x(t) soit :

$$L(x) = \frac{\text{densité de probabilité de l'observation } X(t) \text{ sous } H_1}{\text{densité de probabilité de l'observation } X(t) \text{ sous } H_0}$$

Citons pour mémoire :

- le critère de Bayes
- le critère du maximum a posteriori
- le critère du maximum de vraisemblance
- le critère de Neyman. Pearson ou critère de la probabilité de fausse alarme.

Cette quantité L(x) est comparée à un seuil. En supposant que le bruit additif soit blanc, centré, gaussien et stationnaire, on montre [1] que l'expression de ce seuil dépend du rapport [S/B] au sens de A. BLANC LAPIERRE dénommé encore indice de performance d.

Courbes C.O.R., Probabilité de détection et de fausse alarme [1] [2]

L'étude de ces probabilités est un complément nécessaire aux critères cités ci-dessus, pour pouvoir déterminer les performances opérationnelles des récepteurs envisagés.

COMPARAISON DE DIVERSES CHAINES DE DETECTION
EN VUE D'APPLICATIONS OPERATIONNELLES

Elles permettent d'évaluer le réseau de courbes :

$$P_d = f \left(P_f ; \left[\frac{S}{B} \right]_e \right)$$

Soit la probabilité de détection en fonction de la probabilité de fausse alarme pour différents rapports [S/B] en entrée du récepteur.

Cet ensemble de courbes constitue les caractéristiques opérationnelles de réception ou courbes C.O.R.

Rappelons que sous les hypothèses de bruit blanc gaussien, centré et stationnaire, on peut exprimer les probabilités de détection et de fausse alarme en fonction de la quantité.

$$d = \left[\frac{S}{B} \right]_s \quad \text{au sens de A. BLANC-LAPIERRE et B. PICINBONO}$$

Les courbes C.O.R. sont alors les suivantes :

$$P_d = f \left(P_f ; d \right)$$

ainsi augmenter la quantité d, revient à approcher la courbe optimale à savoir :

$$P_d \sim 1$$

$$P_f \sim 0$$

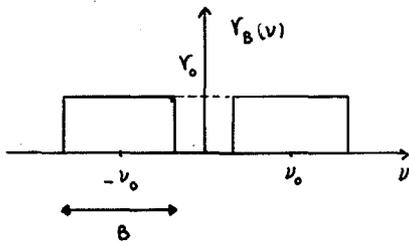
Nous constatons donc, qu'une augmentation de la quantité $d = \left[\frac{S}{B} \right]_s$ ne peut qu'améliorer les performances des récepteurs. Aussi dans la suite de l'étude, nous utiliserons uniquement ce critère du rapport signal sur bruit pour essayer d'établir une synthèse comparée des performances des divers récepteurs usuels.

III - COMPARAISON DES DIVERSES CHAINES DE DETECTION

1) Hypothèses sur le signal et bruit, définitions

a - cette étude est faite en supposant que :

- * le bruit additif est gaussien, centré, stationnaire, blanc dans la bande spectrale du signal, de puissance moyenne $\Gamma_B(\omega) = 2\gamma_0 B = \sigma_B^2$. La densité spectrale de puissance moyenne $\gamma_B(\nu)$ étant modélisée de la façon suivante :



- * le signal est certain, d'énergie $E_s = \int_{-T}^T |s(t)|^2 dt$ et de puissance moyenne $\bar{P}_s = \frac{E_s}{T}$.

Dans le cas particulier d'un signal sinusoïdal $S(t) = A_s \sin 2\pi f_0 t$ l'énergie s'écrit

$$E_s = \frac{A_s^2}{2} T \quad (T : \text{durée du signal})$$

b - nous introduirons par la suite, la notion de bande équivalente (ou étendue spectrale du bruit blanc "équivalent" au signal).

Au signal S(t) nous associons un bruit blanc y(t) de bande limitée B_{eq} telle que

- . S(t) et Y(t) aient la même puissance moyenne

$$\Gamma_S(\omega) = \Gamma_Y(\omega)$$

c - Lors d'applications en milieu naturel (notamment en milieu marin) les performances des récepteurs opérationnels sont dégradées par divers autres paramètres :

- . la résolution en temps (échos multiples, trajets multiples)
- . la tolérance à l'effet Doppler (vitesse radiale émetteur-récepteur)

* la résolution en temps [6] traduit la possibilité (ou non) de séparer deux signaux identiques décalés de la durée Δt

* la tolérance à l'effet Doppler [6] traduit la "détérioration" des performances en présence de signal affecté d'effet Doppler. Le mouvement des récepteurs et des émetteurs provoque une compression ou une dilatation du signal transmis d'un facteur η tel que :

$$\eta = \frac{1 + V_r/c}{1 - V_r/c}$$

V_r : vitesse relative radiale
 c : vitesse de propagation de l'onde

2) Notations [4][5]

$\rho_c = \left[\frac{S}{B} \right]_c = \frac{E_s}{T \sigma_B^2} = \frac{E_s}{2\gamma_0 B T}$ rapport signal sur bruit en entrée définit dans la bande globale B du bruit

$\rho'_c = \left[\frac{S}{B} \right]'_c = \frac{E_s}{2\gamma_0 B_s T}$ rapport signal sur bruit en entrée, définit dans la bande B_s du signal

$\rho_a = \frac{E\{\gamma_{S,B}\} - E\{\gamma_B\}}{\sigma_B}$ rapport signal sur bruit en sortie au sens de BLANC LAPIERRE

- . B = bande équivalente du bruit
- . B_s = bande équivalente du signal
- . T = durée équivalente du signal

- . $2\Delta f \sim B$ caractérise un filtrage faible
- . $\Delta f \ll B$ caractérise un filtrage fort
- . $\frac{1}{RC} \sim \Delta f$ caractérise une intégration faible avec constante de temps de l'intégrateur
- . $\frac{1}{RC} \ll \Delta f$ caractérise une intégration forte
- . $RC \sim \frac{T}{6}$ caractérise une charge de la capacité d'un intégrateur à 99%
- . $g = \frac{\rho_B}{\rho_c}$ et $g' = \frac{\rho_a}{\rho'_c}$ gain de traitement

Ces récepteurs sont présentés dans les tableaux I et II

- . le détecteur linéaire
- . le détecteur quadratique
- . le filtre adapté + une détection quadratique
- . le filtre adapté + le filtre de quadrature
- . le filtre adapté



COMPARAISON DE DIVERSES CHAINES DE DETECTION EN VUE
D'APPLICATIONS OPERATIONNELLES

Cette définition tient compte des puissances moyenne et instantanée de sortie tandis que la définition du rapport $[S/B]$ au sens de ABLANC-LAPIERRE et B. PICINBONO, traduisant le comportement des récepteurs non linéaires, fait intervenir la puissance moyenne du signal et du bruit en entrée de ce récepteur.

Afin de comparer les récepteurs non linéaires et le récepteur linéaire nous remarquons qu'il suffit de redéfinir le rapport $[S/B]_s$ de la façon suivante [4]

$$\left[\frac{S}{B} \right]_s = \rho_s = \sqrt{\rho_{FA}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\gamma_s}}$$

Cette nouvelle définition traduit alors bien l'augmentation en signal de sortie apportée par le signal d'entrée par rapport aux fluctuations dues au bruit seul.

* Pour une application pratique, il faut choisir le récepteur qui assure un compromis entre les impératifs en rapport $[S/B]$, la résolution en temps et la tolérance à l'effet Doppler.

Pour compléter l'étude de l'ensemble chaîne de réception + détecteur de seuil, il faut, de plus évaluer pour un mélange signal plus bruit en entrée, le réseau de courbes :

$$P_d = f(P_f, \left[\frac{S}{B} \right]_e)$$

Probabilité de détection en fonction de la probabilité de fausse alarme et du rapport $[S/B]$ à l'entrée du récepteur.

Cet ensemble de courbes constitue les caractéristiques opérationnelles de réception ou courbes C.O.R.

L'expression analytique de ces courbes C.O.R. est souvent très difficile à expliciter. Il est certain, cependant, que l'augmentation du rapport signal sur bruit, au sens de A. BLANC-LAPIERRE et B. PICINBONO ne peut qu'améliorer les performances de la chaîne de détection. C'est pourquoi notre étude s'est tournée vers un calcul explicite des rapports $[S/B]$ en sortie afin de permettre une première comparaison des diverses chaînes de détection couramment utilisées.

IV - CONCLUSION

Dans cette étude nous avons réalisé un récapitulatif des performances comparées de diverses chaînes de détection afin de faciliter le choix d'un récepteur en vue d'applications opérationnelles.

Les hypothèses faites sur les propriétés du bruit sont le plus souvent restrictives : bruit blanc gaussien, centré et stationnaire. Que deviennent alors les récepteurs décrits, en milieu réel ?

Les limitations essentielles proviennent de la "coloration" et de la non-stationnarité du bruit.

Pour s'affranchir d'un bruit non blanc, il faut envisager de réaliser (si possible, et c'est souvent le cas pour de nombreuses applications réelles) le filtre de blanchiment du bruit. Dans le cas d'un récepteur cohérent, il faut utiliser le filtré adapté, non pas à $S(t)$, mais à la version "blanchie" de ce signal [1][2]

Pour un bruit non stationnaire, plusieurs auteurs ont proposé une modélisation "atrayante" de ce dernier [8] [9] [10]:

Le bruit peut être considéré comme un processus aléatoire gaussien stationnaire à puissance moyenne variable dit encore bruit sphériquement invariant. Celui-ci peut alors s'exprimer à l'aide de la forme paramétrique suivante :

$$B(t) = \sqrt{A} \gamma(t)$$

avec $\gamma(t) \triangleq$ fonction aléatoire gaussienne centrée, stationnaire, de puissance unité

$A \triangleq$ variable aléatoire positive, indépendante de $\gamma(t)$, de densité de probabilité à priori $p(a)$

Lors d'applications réelles et pour des variations "lentes" (par rapport à la durée utile du signal) de la puissance moyenne du bruit, il est possible de "stationnariser" ce dernier en plaçant en amont du récepteur (cohérent) un contrôle automatique de gain (C.A.G.). Celui-ci possède une constante de temps judicieusement choisie de façon à "réguler" les variations de puissance moyenne du bruit, sans pour autant modifier l'allure des signaux reçus.

La combinaison de ces procédés permet de mieux prendre en compte les propriétés réelles du bruit et de concevoir des récepteurs mieux "adaptés" aux situations et aux besoins opérationnels.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Van TREES L. : "detection, estimation, and modulation theory"
tome I : "detection, estimation, and linear modulation theory"
tome III: "radar/sonar signal processing and gaussian signals in Noise".
John Wiley and Sons Inc. New-York 1968.
- [2] WHALEN A.D. : "Detection of signals in Noise"
Academic Press New-York and London 1971.
- [3] A. BLANC-LAPIERRE et B. PICINBONO :
"Propriétés statistiques du bruit de fond"
Masson et Cie - 1961
- [4] BOUHIER M.E. : "Etude en vue de l'amélioration des systèmes de Navigation sous-marine" Rapport I.N.P.G. Grenoble, juin 1984 (D.E.A)
- [5] ZAKHARIA M., BOUHIER M.E., CORGIATTI J.P., ESCUDIE B.
"Projet Nacre. Etude de la faisabilité d'un système de navigation" Rapport I.C.P.I. TS/8401/z
- [6] R.J. URICK: "Principles of Underwater Sound" Mc Graw-Hill Book Company 1983
- [7] Max J. et Al : "Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques" Masson 1977
- [8] VEZZOSI G. et PICINBONO P. : "Détection d'un signal certain dans un bruit sphériquement invariant, structure et caractérisation des récepteurs". Annales des télécommunications 1972, tome 27, n°3-4
- [9] SPOONER R.L. : "On the detection of a known signal in a non-gaussian Noise process" .J.A.S.A juillet 1968, 44
- [10] TUTEUR F.B. : "On the detection of a moving noise in a non stationary noise background" JASA juillet 1968, 44

