

NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS



NICE du 16 au 20 MAI 1983

REJECTEUR SELECTIF EN FREQUENCE

MM. JOURNEAU et DROULEZ A. ALBARELLO

THOMSON-CSF/DTC ; 16 rue du Fossé Blanc - 92230 GENNEVILLIERS

RESUME

Dans un système de transmission à étalement de spectre par séquence directe, le gain de traitement classique : rapport du débit d'étalement sur bande d'information utile s'applique dans le cas d'une interférence à bande étroite devant le rythme d'étalement.

Dans ce cas, on peut encore améliorer les performances du système par l'utilisation d'un réjecteur sélectif en fréquence. Deux principes de réjecteurs sont comparés : limitation du spectre d'amplitude du signal reçu ou traitement de ce signal dans un filtre transversal adaptatif.

Les performances du limiteur sélectif sont évaluées théoriquement et les deux réjecteurs sont comparés par simulation en fonction des paramètres suivants :

- pic de corrélation,
- sélectivité de la fonction de corrélation,
- interférence intersymboles.

SUMMARY

In a direct sequence spread spectrum communication system, the usual processing gain: spreading code rate upon data rate is valid for a narrow bandwidth interference compared with the spreading code rate.

In this case, it is possible to improve the performances of the system by using a frequency selective rejecter. Two principles of rejecters are compared : amplitude spectrum limitation of received signal or signal processing in an adaptive transversal filter.

The performances of the frequency selective limiter are given in a closed form and the two rejecters are compared by simulation with regard to the following parameters :

- energy of correlation,
- selectivity of the correlation function,
- intersymbol interference.



1. INTRODUCTION

Dans un système de transmission à étalement de spectre par séquence directe et dans l'hypothèse d'un signal interférant à bande étroite devant le débit d'étalement du signal utile, le gain de traitement en réception s'exprime comme le rapport du débit d'étalement sur la bande d'information utile. Dans ce cas, on peut encore améliorer les performances du système par l'utilisation d'un réjecteur sélectif en fréquence capable de rejeter l'interférence présente dans une certaine bande de fréquence étroite devant le débit utile.

Deux principes de réjecteurs sont comparés: limitation du spectre d'amplitude du signal reçu ou traitement de ce signal dans un filtre transversal adaptatif. Les performances du limiteur sont évaluées dans le cas de séquences PN modulant en PSK signal utile et interférence. Une simulation est alors nécessaire pour tenir compte de cas de figures non accessibles par le calcul - emploi des codes de GOLD pour l'étalement, modulations MSK - et pour comparer finement les performances des deux réjecteurs. L'emploi des codes de GOLD dans la simulation est justifié par leurs propriétés d'intercorrélation fondamentales dans les systèmes à étalement de spectre où l'accès multiple est recherché.

Les performances sont évaluées en fonction des paramètres suivants :

- amplitude du pic de corrélation
- sélectivité de la fonction de corrélation ou protection (écart entre le pic de corrélation et le sous-pic de plus forte amplitude)
- interférence intersymboles que l'on relie directement à la largeur du pic de corrélation.

Des considérations technologiques viennent compléter la comparaison entre les deux réjecteurs.

- Il ressort de cette étude que :
- le limiteur sélectif permet de gagner entre 30 et 40dB en rapport J/S (interférence sur signal utile) à performances identiques en corrélation; par contre, il faut asservir le seuil du limiteur sur le niveau d'énergie après corrélation pour éviter de dégrader le pic de corrélation.
 - le réjecteur adaptatif est moins performant que le limiteur (gain de 15 à 20dB en J/S) mais ne présente pas de contrainte quant à la perte d'énergie de corrélation.

- l'interférence intersymbole est légèrement atténué par l'emploi de l'un ou l'autre des réjecteurs.

- il y a possibilité de mise en oeuvre de l'un ou l'autre des deux réjecteurs présentés dans toute la gamme de fréquences radio en utilisant les techniques numériques ou des dispositifs à transferts de charges (DTC) pour le réjecteur adaptatif, les dispositifs à ondes de surface (DOS) ou les techniques numériques pour le réjecteur limiteur.

2. LE REJECTEUR ADAPTATIF

2.1. Principe

2.1.1. Structure

La fonction à réaliser peut être schématisée comme ci-dessous :

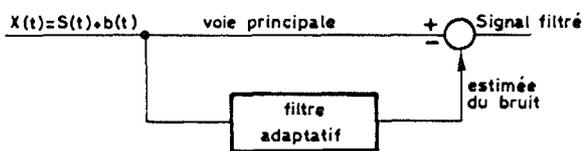


Fig.1

Pour réaliser cette fonction une mise en oeuvre simple est d'implanter le filtre sous forme de filtre transversal non nécessairement causal, l'introduction d'un retard suffisant dans la voie principale rendant le système réalisable : la structure de base est donc la suivante :

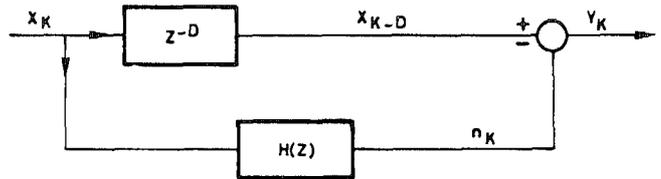


Fig.2

La sortie Y_K du système à l'instant K est donc :

$$(1) \quad Y_K = x_{K-D} - \sum_{n=0}^L h_n x_{K-n}$$

pour le filtre transverse H :

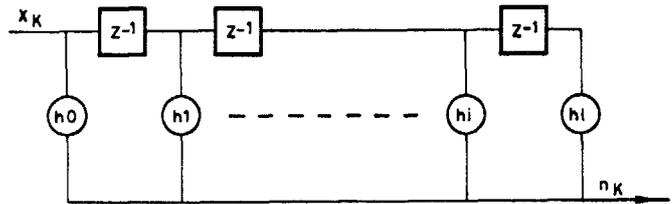


Fig.3

2.1.2. Interprétation

Le discriminant permettant de distinguer le signal utile est ici de type fréquentiel : celui-ci est supposé à bande B_s large devant celle B_b de brouilleur. On peut donc analyser le filtre H :

- par son rôle dans la voie secondaire en tant que prédicteur du brouilleur b (en faisant L = D-1) et étudier les performances des divers algorithmes de prédiction linéaire (cf. réf.2)

- plus globalement, si l'on considère les deux voies, on peut alors dire que l'on enlève les composants corrélés de x_K - D et des versions retardées et avancées de x_K - D présentes dans la voie secondaire.

C'est cette seconde interprétation qui a conduit aux choix exposés ci-dessous.

2.1.3. Définition de la structure définitive

Cette définition résulte de l'interprétation dans le domaine temporel du discriminant fréquentiel B_b/B_s << 1:

la fonction de corrélation du signal utile décroît beaucoup plus vite que celle du brouilleur donc pour Δ de l'ordre de ± 1,5 Tchip où Tchip est la durée du chip du code d'étalement

$$E(S(t) S^*(t + \Delta)) \approx 0 \quad \text{où } E \text{ désigne la conjugaison}$$

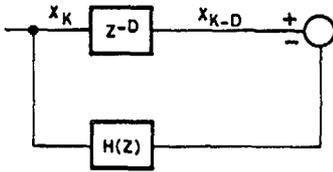
alors que :

$$E(b(t) b^*(t + \Delta)) \gg 0 \quad \text{et } E \text{ l'espérance mathématique}$$

On peut donc se servir de versions décalées de plus de Δ du signal total dans la voie secondaire pour annuler la composante brouilleur de x(t) sans risque d'annuler le signal utile.

REJECTEUR SELECTIF EN FREQUENCE

Si l'on reprend le choix de ELLIS (cf. réf.1) d'utiliser un filtre H à réponse symétrique, la structure définitive est donc la suivante :



avec H :

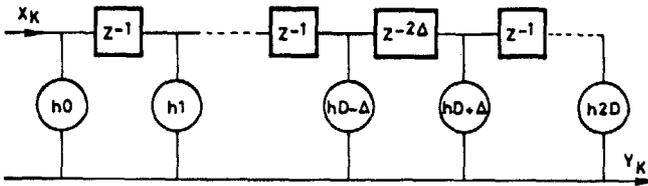


Fig.4

2.2. Evaluation des performances théoriques

Si une évaluation par le calcul est possible en terme de gain sur le rapport interférence à signal avant corrélation ou même après corrélation, dans le cas où la séquence d'étalement est du type DN (cf.réf2) il n'a pas été possible d'obtenir de résultats comparables pour les critères choisis : la comparaison des performances avec celles du réjecteur sélectif ne peut donc être faite que sur des résultats de simulation.

2.3. Simulation du réjecteur adaptatif

Cette simulation dont le synoptique est présenté en Fig.5, permet de décrire dans le domaine temporel l'effet du réjecteur adaptatif sur le signal utile et une interférence; la chaîne est constituée des fonctions suivantes :

- bloc génération du signal (choix du code de GOLD et du type de modulation)
- construction de l'interférence
- choix des paramètres du filtrage
- filtrage
- calcul de la corrélation et évaluation des paramètres : pic, protection, largeur du pic.

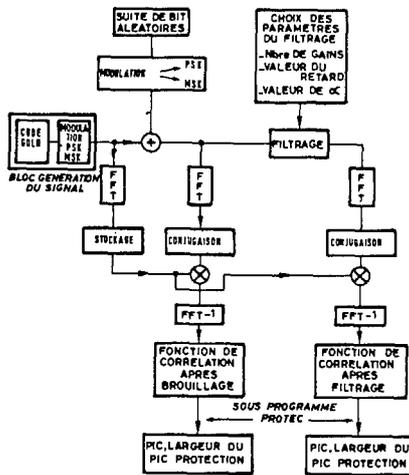


Fig.5

2.3.1. Etude des paramètres propres à la simulation du réjecteur adaptatif

La simulation permet de faire varier trois paramè-

tres importants :

- valeur de Δ
- valeur de α
- nombre de boucles de commande.

valeur de Δ

Il suffit que $\Delta x_{Tech} > T_{chip}$ soit vérifié pour que le comportement du dispositif soit satisfaisant. Ce point étant vérifié, les performances ne varient de façon significative que lorsque Δ varie : les exploitations ont été effectuées avec $\Delta_{Tech} = 1,5 T_{chip}$.

Avant d'étudier l'influence des autres paramètres, il faut annoncer les principaux résultats de la simulation du réjecteur adaptatif: ceux-ci feront l'objet de développements plus complets au paragraphe 3 :

- comparaison des performances du limiteur sélectif et du réjecteur adaptatif.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- le dispositif n'augmente pas la largeur du pic de corrélation
- le traitement n'apporte qu'une dégradation très faible du niveau du pic de corrélation
- la protection après traitement est satisfaisante (soit > 8 dB) pour un rapport J/S en entrée allant jusqu'à 20 dB

- la simulation a permis de préciser le qualificatif brouilleur à bande étroite : celui-ci doit occuper une bande inférieure au 1/8 de la bande du signal utile.

Influence de α

La courbe $P = f(\alpha)$ donnant la performance en protection en fonction de α atteint un maximum pour une valeur α_{max} qui décroît avec le nombre de boucle et l'énergie totale avant traitement : cette valeur max n'est pas critique comme le montre la Fig.6 pour le cas $B_s/B_b = 16$ et 4 boucles de commande indépendantes.

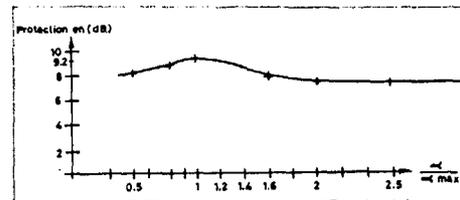


Fig.6

On peut noter parallèlement une légère dégradation du pic de corrélation lorsque α augmente.

Nombre de boucles de commande

Le filtre transversal comprend 2D gains mais ne comporte que D boucles de commande puisque sa réponse en fréquence est symétrique.

La fig.7 montre les résultats obtenus pour un rapport de bandes de 16.

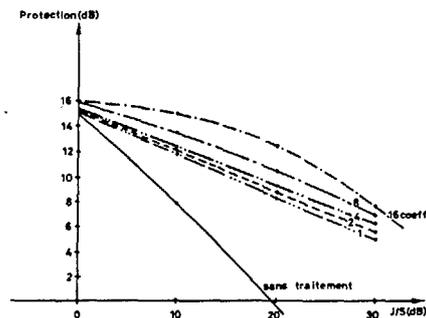


Fig.7



REJECTEUR SELECTIF EN FREQUENCE

3. REJECTEUR LIMITEUR

3.0. Principe du limiteur sélectif en fréquence

Le schéma synoptique du système de réception incorporant un tel limiteur est représenté sur la fig.8. Après passage dans le domaine fréquentiel, on écrête les raies du spectre du signal utile + interférence dont l'amplitude dépasse un certain niveau caractéristique du limiteur. On reconstitue ensuite le signal temporel par transformée de FOURIER inverse.

3.1. Evaluations théoriques concernant les performances du limiteur

3.1.1. But

L'analyse ci-dessous a pour but de calculer des statistiques (premier et second ordre) sur l'intercorrélation du signal résultant (utile + interférence) obtenu en réception avec le signal utile seul pris comme référence.

Cette intercorrélation sera calculée dans le but de prévoir les performances du limiteur sélectif en fréquence évaluées en termes de pic de corrélation, de sélectivité et d'interférence intersymboles.

3.1.2. Hypothèses de calcul

Les signaux considérés tant pour le signal utile que pour le brouilleur seront constitués par des trains de bits aléatoires modulant une porteuse en PSK, indépendants entre eux et dans leur ensemble.

3.1.3. Modèle de calcul

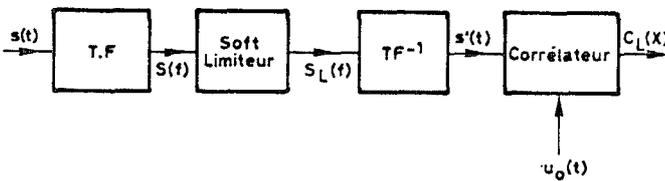


Fig.8

Notations :

- signal résultant $s(t) = u(t) + b(t)$ = utile + interférence
avec : $u(t) = \sqrt{2}S \cos(\omega_0 t + \phi_S(t))$
 $b(t) = \sqrt{2}J \cos(\omega_0 t + \phi_J(t))$.
- $\omega_0 = 2 \pi f_0$ où f_0 est la porteuse utile
- $\omega_0 = 2 \pi f'_0$ où f'_0 est la porteuse interférent
- $\phi_S(t)$ est la phase modulée par le train aléatoire $\{a_k\}$ "utile" avec $k = 1, \dots, K$
- $\phi_J(t)$ est la phase modulée par le train aléatoire interférent $\{b_l\}$ avec $l = 1, \dots, L$
- S est la puissance du signal utile
- J est la puissance du signal interférent
- T_C est la période bit utile; T_J est la période bit brouilleur .

Le modèle peut être décrit de la façon suivante :

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(f) e^{-2\pi jft} df \quad S_L(f) + S(f) \leq \left[S(f) \right] \leq L \sin$$

$$s'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_L(f) e^{2\pi jft} df \quad C_L(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s'(t) r(t-\tau) dt$$

3.1.4. Calcul de la moyenne de l'intercorrélation

Posons :

- $r_B = T_J/T_C$: rapport du rythme d'étalement utile sur rythme de l'interférence
- $r_p = J/S$ rapport des puissances interférence sur utile

• $r_L = L/T_C \sqrt{SxK}$ qui quantifie le niveau de limitation spectral par rapport au niveau de la raie porteuse utile.

$$Q(\alpha, \tau) = \frac{\sin^2(\Pi \alpha \tau)}{\Pi^2 \alpha^2}$$

$$\delta d = T_C (f_0 - f'_0)$$

La valeur moyenne de la fonction d'intercorrélation, en un point, rapportée au pic de corrélation obtenu sans brouillage et sans limitation de spectre peut s'exprimer par :

$$\bar{C}_{Lm}(\tau) = 2 \int_0^{\infty} Q(\alpha, \tau) \cos(2\pi \alpha \tau) \left[1 - \frac{L^2 \Lambda^4}{4\Lambda} + \frac{L\sqrt{r}}{4\Lambda} (1 - \phi(L)) \right] d\alpha$$

avec : $\frac{L}{\Lambda} = \frac{r_L \sqrt{2K}}{\sqrt{Q(\alpha, 1) + r_p Q(\alpha - \delta, \tau_B)}}$

et :

$$\phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

3.1.5. Calcul du moment d'ordre 2

L'expression de \bar{C}_{Lm} conduit à des résultats intéressants pour expliquer l'effet du limiteur, mais ne donne pas d'indication sur l'effet du brouilleur quand on ne met pas en oeuvre le limiteur sélectif en fréquence (quand $L = \infty$, on retrouve en effet la corrélation en triangle indépendamment du brouilleur ce qui s'explique par l'indépendance supposée du signal utile et de l'interférence.

On est donc amené à calculer le moment d'ordre deux de la fonction d'intercorrélation.

En posant : $F(\alpha, r_p, r_B, L/\Lambda) = 4 \left[3 Q(\alpha, 1) + \frac{r_p}{r_B} Q(\alpha, r_B) \right] - 5 \left[\left(\frac{3}{2} \frac{L}{\Lambda} + 12 \right) Q(\alpha, 1) + 4 \frac{L}{r_B} Q(\alpha, r_B) \right]$

on peut écrire : $E(C_L^2(\tau)) = \frac{1}{4} \int_0^{\infty} Q(\alpha, \tau) F(\alpha, r_p, r_B, \frac{L}{\Lambda}) \cos(2\pi \alpha \tau) d\alpha$

3.1.6. Analyse des résultats

Introduction

Dans le cas où le limiteur sélectif n'intervient pas, nous utiliserons l'expression $C_{Lm}(\tau) + \sigma_L(0)$ comme approximation de la corrélation avec :

$\sigma_L^2(\tau) = E(C_L^2(\tau)) - E^2(C_L(\tau))$, en supposant que le terme correctif $\sigma(0)$ soit représentatif des fluctuations de la fonction d'intercorrélation.

Ceci n'a plus cours avec l'emploi du limiteur sélectif où le caractère gaussien de la perturbation de la corrélation ne peut plus être justifié. On tiendra compte alors uniquement du terme $C_{Lm}(\tau)$ pour exprimer la corrélation.

Résultats

Les résultats obtenus sont exprimés ci-dessous de façon graphique :

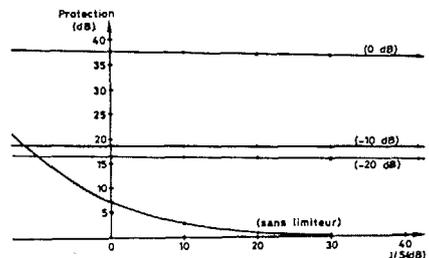
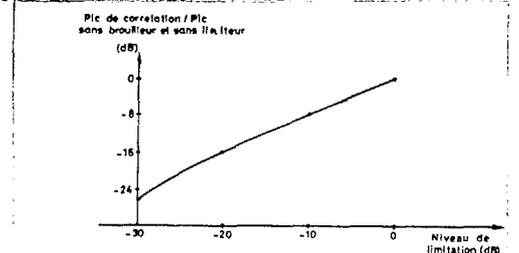


Fig.9. Protection de la corrélation en fonction de J/S et du niveau de limitation du spectre

Fig.10.

Pic de corrélation avec limitation



Les points importants que l'on peut relever sont les suivants :

- amélioration très sensible de la protection après limitation du spectre en présence de brouilleur. Cette protection décroît d'ailleurs relativement peu quand J/S augmente, une fois le spectre limité.
- décroissance de l'énergie de corrélation après limitation en tous points comparable avec celle obtenue par la simulation décrite ci-après (§ 3.2); celle-ci dépend d'ailleurs peu du rapport J/S
- rétrécissement du pic de corrélation dans le cas limiteur et avec brouilleur, par rapport au cas avec brouilleur et sans limiteur. (pour J/S de l'ordre de 0 dB ou plus, le pic s'étend sur 2 chips sans limiteur et revient à un peu plus d'1 chip avec limiteur).

3.2. Simulation du réjecteur limiteur

3.2.1. Description de la simulation

Le principe du traitement est présenté ci-après. Après le calcul d'une séquence de GOLD de longueur $2^n - 1$ (n paramétrable), on module grâce à elle une porteuse utile en PSK ou en MSK. En ce point de la chaîne, on calcule par transformée de FOURIER, le spectre de référence S(f) qui servira en bout de chaîne au calcul de l'intercorrélation. Après le calcul du signal utile modulé, on adjoint à ce dernier un signal interférant constitué par une séquence aléatoire modulant une porteuse soit en PSK, soit en MSK.

Débit, puissance et position dans la bande utile de cette interférence sont paramétrables. Le signal interférant étant supposé avoir une bande étroite vis à vis du signal utile, on ne gardera dans le spectre de l'interférence que le lobe principal. On fait passer le signal résultant dans une fenêtre de pondération pour éviter les phénomènes de distorsion de spectre qui surviennent lorsqu'on ne limite pas l'analyse d'un signal temporel périodique à un nombre entier de périodes. On calcule alors le spectre du signal résultant que l'on limite avec un seuil variable compté en dessous de l'énergie utile : S'(f). On trouve l'intercorrélation par transformée de FOURIER inverse du produit : S(f) x S'(f). On en déduit les caractéristiques de l'intercorrélation

- pic principal
- protection
- largeur du pic principal.

3.2.2. Choix des paramètres propres au réjecteur limiteur

Avant de comparer les performances du réjecteur limiteur et du réjecteur adaptatif, il faut étudier l'influence de paramètres propres à l'emploi du limiteur. Ils sont au nombre de trois :

- niveau de limitation du spectre
- configuration de la trame utile analysée
- longueur de la séquence modulante.

L'influence du niveau de limitation s'exprime principalement par la perte en énergie de corrélation (dégradation du pic principal); par contre, le niveau de protection varie peu.

On supposera donc l'existence d'un contrôle automatique de gain (CAG) en amont de la corrélation piloté par l'énergie après corrélation (celle du signal utile théoriquement) positionnant le niveau de limitation au niveau du signal utile seul.

Analysons alors l'influence de la configuration de la trame analysée (en utilisant des modulations PSK et en supposant que l'interférence est centrée dans la bande utile).

Trois cas se présentent en pratique :

- la trame utile se répète identique à elle-même de façon continue
- le signal utile se présente sous la forme d'impulsions : deux trames utiles sont séparées par des zéros
- même cas que précédemment, sauf que deux trames

utiles modulées par un code C1 sont séparées par une trame modulée par un code C2.

De façon générale, les résultats sont assez peu différents (la corrélation est toujours faite avec le même motif)

- en l'absence de limiteur, la dernière configuration résiste le mieux à l'interférence en présentant un pic de corrélation un peu plus large : les différences ne dépassent pas deux à trois dB.

- en présence de limiteur, les résultats sont égaux à moins d'une dB près en présence d'interférence. Sans interférence, les différences ne dépassent pas deux à trois dB, les meilleures performances étant obtenues pour la deuxième configuration.

Quant à l'influence de la longueur de la séquence utile, elle est représentée ci-dessous :

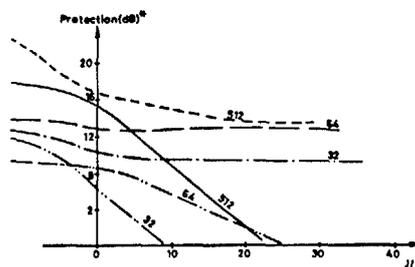


Fig. 11

La protection apportée par le code GOLD diminue quand le nombre de bits du code diminue, mais les performances en protection obtenues pour 32 et 64 bits restent intéressantes.

La perte en pic de corrélation apportée par le limiteur ne dépend pas, quant à elle, ni de la configuration utilisée, ni du nombre de bits modulants. Les résultats sont en tous points similaires à ceux prévus au § 3.1.6: "résultats" par le calcul.

La largeur du pic de corrélation, dans les deux cas étudiés ci-dessus, a tendance à être plus étroite avec limiteur que sans, dans le cas d'une interférence (largeur de l'ordre de deux chips avec limiteur contre trois chips sans limiteur à J/S = 20 dB).

Pour revenir au paramètre protection, les résultats de la partie théorique sont retrouvés dans leur grande ligne (la différence quantitative vient de la nature différente des codes utilisés : PN pour l'évaluation théorique et GOLD pour la simulation) :

- amélioration très sensible de la protection par usage du limiteur
- décroissance très lente de la protection en fonction du J/S quand le limiteur fonctionne.

Il reste alors à prendre en compte le type de modulation employée, l'emplacement de l'interférence dans la bande utile et l'influence du rapport de bandes entre signal utile et interférence : ceci fait l'objet du paragraphe suivant en comparant limiteur et réjecteur adaptatif. Pour le limiteur, on utilisera une séquence périodique de 512 bits d'un code de GOLD.

REMARQUES : il faut noter la remontée de la protection en l'absence d'interférence- par l'emploi du limiteur. Ceci peut s'expliquer de façon théorique dans quelques cas simples.

4. COMPARAISON ENTRE LE LIMITEUR ET LE FILTRE ADAPTATIF

Ces deux types de réjecteurs vont être comparés pour déterminer :

- l'influence de la modulation du signal utile : PSK ou MSK
- l'influence de la position de l'interférence dans la bande d'étalement
- l'influence du rapport : débit d'étalement/débit de l'interférence : 8, 16, 32.



4.1. Influence de la modulation

4.1.1. Hypothèses

Pour le réjecteur limiteur : séquence utile périodique de longueur 512 bits; limitation au niveau du spectre utile. Pour le réjecteur adaptatif : une seule boucle de commande. Pour les deux réjecteurs : interférence PSK centrée dans la bande utile; rapport des bandes = 8.

4.1.2. Résultats

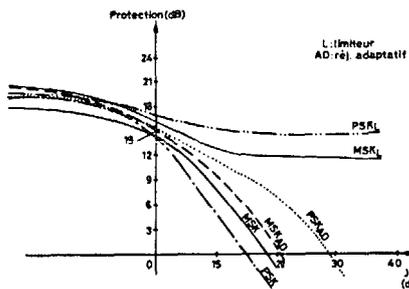


Fig. 12

On peut faire les remarques suivantes :

- la modulation PSK pour le signal utile conduit à de meilleurs résultats que la modulation MSK en ce qui concerne la protection (jusqu'à 5 dB de gain) et ce, tant pour le réjecteur limiteur que pour le réjecteur adaptatif.
- il n'y a aucune perte d'énergie de corrélation pour le réjecteur adaptatif
- la perte en énergie de corrélation pour le réjecteur limiteur est celle prévue par le calcul théorique
- pour les deux limiteurs, la largeur du pic de corrélation n'est pas dégradée par le traitement et ce pour les deux modulations
- le réjecteur limiteur conduit à de meilleures performances en protection que le réjecteur adaptatif; surtout ce dernier se dégrade beaucoup plus vite que le limiteur en fonction de J/S
- enfin, il s'avère que pour l'interférence, l'influence de la modulation est minime (à cause du rapport des bandes).

4.2. Influence de l'emplacement de l'interférence

4.2.1. Hypothèses

Ce sont les mêmes que précédemment avec en plus, un signal utile modulé en MSK.

4.2.2. Résultats

Des tirages ont été réalisés pour une interférence située à 0 ; $0.25/T$; $0.5/T$; $0.75/T$ de la porteuse utile (T : période du bit utile).

On en tire les résultats suivants :

- pour les deux réjecteurs, les deux paramètres : perte en énergie de corrélation et largeur du pic de corrélation sont insensibles à la position de l'interférence.
- par contre, la protection de la corrélation est très sensible à la position de l'interférence comme le montre la courbe ci-dessous (avec un pire cas pour une interférence centrée).

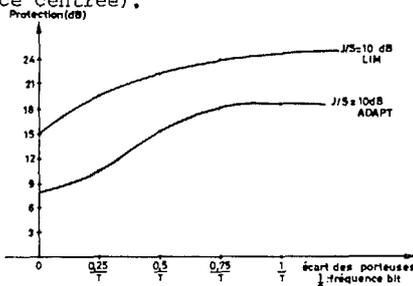


Fig. 13

4.3. Influence du rapport des bandes

Avec les mêmes hypothèses que précédemment, les deux réjecteurs vont être comparés pour plusieurs rapports de bande : 8, 16 et 32.

La courbe ci-après donne le gain en protection pour les deux réjecteurs dans les trois cas :

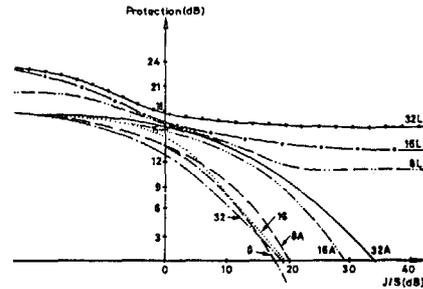


Fig. 14

5. CONSIDERATIONS TECHNOLOGIQUES SUR LA MISE EN OEUVRE DES DEUX LIMITEURS

Une étude de mise en oeuvre a permis de montrer que deux solutions étaient particulièrement bien adaptées en fonction de la gamme de fréquence considérée :

- en UHF - VHF, les dispositifs à onde de surface, ou à transfert de charges, pour le limiteur sélectif en fréquence
- en HF et fréquence inférieures, une mise en oeuvre numérique pour les deux réjecteurs.

6. CONCLUSIONS

Le réjecteur adaptatif permet un gain d'une vingtaine de dB sur le rapport J/S avec un algorithme de filtrage relativement simple.

Le limiteur sélectif en fréquence offre, quant à lui, des gains beaucoup plus grands (de 40 à 50 dB) mais présente la contrainte d'asservir le niveau du limiteur sur l'énergie après corrélation.

BIBLIOGRAPHIE

1. ELLIS
An adaptive Filter to remove interference without harming the signal
IERE Digital Processing 1981
PP 217 - 225
2. Proakis KETCHUM
Suppression of narrowband interference in pseudo - Noise Spread Spectrum systems
RADC - TR - 81 - 6 Février 1981