

Analyse automatique d'une transmission numérique

Céline BOUDER, Gilles BUREL, Stéphane AZOU¹

Laboratoire d'Electronique et Systèmes de Télécommunications, UMR CNRS 6616
6 Av Le Gorgeu , B.P 809, 29285 BREST Cedex, France

Celine.Bouder@univ-brest.fr , Gilles.Burel@univ-brest.fr
Azou@ecole-navale.fr

Résumé – Nous présentons un ensemble de méthodes pour déterminer automatiquement les paramètres d'une transmission numérique. L'objectif est de déterminer le type de modulation, le nombre d'états, la fréquence porteuse et la fréquence symbole d'un signal reçu ou intercepté. Pour la classification des modulations numériques, nous avons utilisé une méthode neuronale, les fréquences sont quant à elles déterminées d'après des propriétés de cyclostationnarité et de corrélation.

Abstract – Some methods to determine automatically the parameters of a numerical transmission are presented. Our purpose is to estimate the kind of modulation, the constellation, the carrier frequency and the symbol frequency of the received or intercepted signal. We used an artificial neural networks approach for the modulation recognition, and the frequencies are determined by cyclostationarity and correlation properties of the signal.

1. Introduction

Que ce soit dans un contexte militaire pour la surveillance de spectres, comme dans un domaine civil, pour réaliser un récepteur capable de s'adapter automatiquement au signal reçu, il est nécessaire de déterminer automatiquement tous les paramètres du signal. Le message sera entièrement défini par la connaissance du type de modulation, du nombre d'états, mais également par les fréquences porteuse et symbole.

Nous avons utilisé, pour la classification des modulations, une méthode d'analyse en composantes principales, ainsi que des réseaux de neurones. Les fréquences, sont par ailleurs déterminées selon des propriétés de cyclostationnarité et de corrélation.

Dans un premier temps, afin de déterminer le type de modulation et le nombre d'états, les fréquences caractéristiques de la transmission ont été supposées connues. Les modulations étudiées sont les suivantes : (ASK2, ASK4, PSK2, PSK4, FSK2, FSK4). L'estimation des fréquences est traitée au paragraphe 5.

2. Contexte de l'expérience

Les expériences s'inspirent en partie des idées développées dans l'ouvrage [2]. Elles ont toutefois été réalisées dans le cadre d'un filtrage à la réception et éventuellement à l'émission en présence de bruit pour que les résultats soient plus réalistes et exploitables en pratique.

2.1 Présentation de l'émetteur et du récepteur

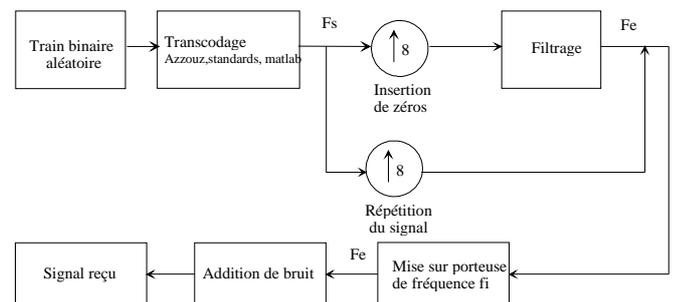


FIG. 1 : Emetteur

Le message initial est à la fréquence symbole de 1MHz. Il subit un transcodage selon le type de modulation choisi. Nous avons travaillé sur plusieurs définitions des modulations : celles les plus couramment utilisées dites « standards », celles définies dans l'article [1] appelées « Azzouz », ainsi que celles définies sous Matlab : « matlab », de manière à généraliser les résultats. Le signal est ensuite suréchantillonné soit en insérant des zéros, soit en répétant le signal. Suréchantillonner le signal augmente la période dans le domaine fréquentiel, ce qui permet un décalage en fréquence ou une mise sur porteuse, ici à 3MHz. On ajoute alors du bruit pour représenter le milieu de transmission. C'est le signal qui est reçu ou intercepté.

¹ Stéphane AZOU a récemment rejoint le Groupe de Traitement du Signal de l'Ecole Navale, 29240 Brest Naval.

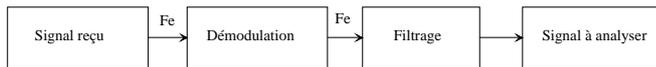


FIG. 2 : Récepteur

Le signal reçu est alors ramené en bande de base ou démodulé, et filtré de manière à ne conserver que le signal utile.

2.2 Modulations étudiées

Dans un premier temps les modulations étudiées sont un peu différentes de celles plus couramment utilisées dites « standards » : elles sont présentées dans l'ouvrage [2]. À partir de ces modulations on calcule des paramètres caractéristiques de chaque modulation définis dans le précédent ouvrage.

3. Calcul des paramètres

Cinq paramètres discriminants ont été calculés à partir d'histogrammes des amplitudes, phases et fréquences instantanées du signal ramené en bande de base :

- L'écart type de la valeur absolue de l'amplitude instantanée : σ_{aa} permet de différencier la modulation ASK2 de la modulation ASK4.
- L'écart type de la valeur absolue de la phase instantanée : σ_{ap} différencie les modulations (ASK2, ASK4, PSK2) de la modulation PSK4.
- L'écart type de la phase instantanée σ_{dp} sépare les modulations ASK de la modulation PSK2.
- L'écart type de la fréquence instantanée : σ_{af} compare les deux modulations FSK.
- Le maximum de la valeur absolue de la densité spectrale de puissance de l'amplitude instantanée : γ_{\max} permet de différencier les modulations du type FSK des autres modulations.

Ces valeurs sont normalisées comme dans [2].

À partir de ces paramètres il est possible de créer plusieurs algorithmes pour classer les différentes modulations ainsi que le nombre d'états. L'inconvénient de certains algorithmes est qu'ils n'utilisent qu'un seul paramètre à la fois, qu'il faut définir des seuils pour chaque critère à partir desquels la classification est possible et que les résultats dépendent de l'ordre dans lequel sont utilisés les paramètres. En définitive il est plus judicieux d'utiliser d'autres méthodes de classification, qui considèrent tous les paramètres en même temps, la probabilité d'une décision correcte ne dépendant alors plus de chaque paramètre.

Les figures 3 et 4 représentent les paramètres γ_{\max} et σ_{ap} en fonction du rapport signal à bruit (snr), exprimé en dB .

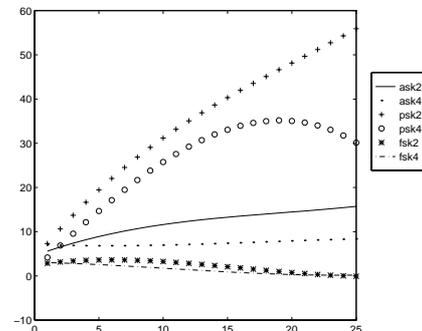


FIG. 3 : γ_{\max} en fonction de snr

En présence de bruit on ne peut pas différencier les modulations FSK, il est nécessaire d'utiliser d'autres paramètres .

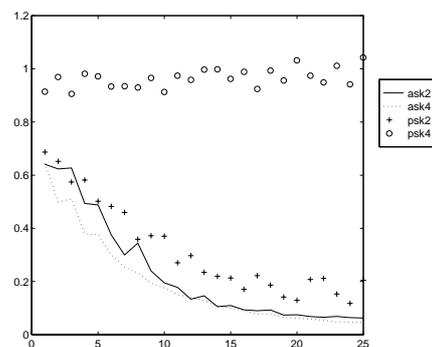


FIG. 4 : σ_{ap} en fonction de snr

La modulation PSK4 est bien séparée des modulations ASK et PSK2, car elle est la seule à avoir une information sur la valeur absolue de la phase.

Chaque modulation est alors représentée par l'ensemble des cinq paramètres qui la caractérisent.

4. Reconnaissance du type de modulation.

La reconnaissance du type de modulation a été réalisée par une analyse en composantes principales des cinq paramètres et par un réseau de neurones. Chacune de ces deux méthodes prend en compte simultanément tous les paramètres caractéristiques du signal reçu, ce qui permet une analyse rapide de la transmission numérique.

4.1 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales permet d'étudier la répartition des classes dans l'espace paramétrique et de juger du pouvoir discriminant des paramètres.

On crée une base de données composée des six modulations à reconnaître, représentées par les cinq paramètres. Chaque exemple sera un point dans un espace à cinq dimensions et l'ensemble des exemples représentatifs d'une modulation formera un nuage de points. Le résultat de l'analyse de données donnera six nuages de points.

L'expérience démontre que les six nuages de points sont séparés les uns des autres, sauf pour deux modulations : PSK4 et FSK4, qu'un filtrage soit utilisé à l'émission ou pas. Les cinq paramètres sont suffisamment discriminants pour reconnaître les modulations, sauf pour les deux modulations précédemment citées. Afin de compléter ces résultats les réseaux de neurones permettent une étude plus détaillée, en calculant les matrices de confusion.

4.2 Résultats du réseau de neurones

Les réseaux utilisés sont construits avec une couche cachée de 10 neurones. Le réseau fonctionne en deux phases : l'une d'apprentissage, l'autre de test. Pour la phase d'apprentissage il est nécessaire de fournir une base de données pour l'entrée du réseau et la base de données correspondantes de sortie. Les bases de données sont construites sur le même principe que celle de l'analyse en composantes principales. La phase d'apprentissage est composée de 240 simulations, chaque modulation est représentée par 40 exemples, 20 avec filtrage à l'émission, 20 sans filtrage à l'émission. Les résultats obtenus sont de l'ordre de 80% de reconnaissance sur la base de test, pour un rapport signal à bruit de 10 dB.

Une étude plus approfondie des cinq paramètres permet de constater qu'un d'entre eux a un ordre de grandeur beaucoup plus grand que les autres : γ_{\max} , ce qui perturbe le réseau, d'où l'idée de renormaliser les paramètres. Les résultats obtenus sont alors de 88%. Le tableau ci-dessous représente la matrice de confusion correspondant aux paramètres normalisés pour un rapport signal à bruit de 10 dB :

TAB. 1 : Matrice de confusion

Classes reconnues						
Classes réelles	ask2	ask4	psk2	psk4	fsk2	fsk4
ask2	100					
ask4		100				
psk2			100			
psk4				31		69
fsk2					100	
fsk4				3		97

On retrouve la confusion entre les modulations FSK4 et PSK4, déjà remarquée par l'analyse en composantes principales, par contre pour les autres modulations il n'y a pas d'ambiguïté.

Pour généraliser les résultats l'expérience a été réalisée avec les constellations les plus couramment employées, les taux de reconnaissance avoisinent 94% pour le même rapport signal à bruit.

TAB. 2 : Matrice de confusion modulations standards

Classes reconnues						
Classes réelles	ask2	ask4	psk2	psk4	fsk2	fsk4
ask2	100					
ask4		100				
psk2			100			
psk4				90		10
fsk2					100	
fsk4				21.6		78.4

On retrouve une légère confusion entre les modulations FSK4 et PSK4, mais moins prononcée. Il faudrait analyser les modulations FSK par le calcul de paramètres supplémentaires pour améliorer les résultats.

Toutefois avant de pouvoir reconnaître les modulations, il faut déterminer les fréquences porteuse et symbole.

5. Estimation des fréquences porteuse et symbole

5.1 Fréquence porteuse

La fréquence porteuse est déterminée une première fois de manière approximative par la formule de la moyenne appliquée à la densité spectrale de puissance. Une fois cette fréquence déterminée, on peut ramener le signal approximativement en bande de base et affiner l'estimation. Le signal en bande de base a pour expression :

$$S(t) = \sum_k a_k h(t - kT) \exp(i2\pi ft)$$

où f est la correction de fréquence recherchée. Elle est déterminée à partir de l'autocorrélation $R(t)$ du signal reçu :

$$R(t) = \frac{1}{N} \sum_{\tau=1}^N S(t) S^*(t - \tau)$$

La correction de fréquence est :

$$f = \frac{\arg(R)}{2\pi\tau}$$

Les figures ci-dessous montrent un exemple de démodulation, pour la modulation ASK4, où le signal n'est pas filtré à l'émission, pour un rapport signal à bruit de 10 dB :

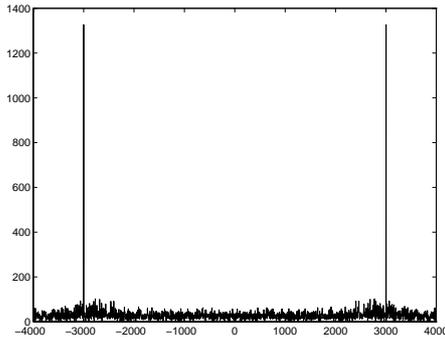


FIG. 5 : spectre du signal reçu

Le signal est initialement à la fréquence porteuse de 3MHz.

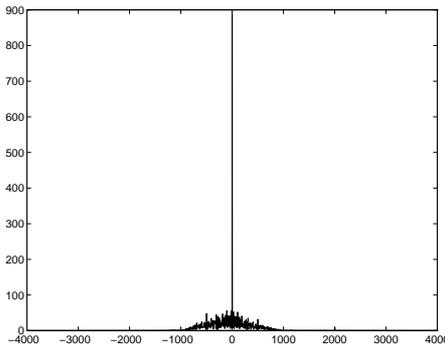


FIG. 6 : Démodulation de la modulation ASK4

Après démodulation, on retrouve le signal en bande de base.

Pour un rapport signal à bruit de 10 dB, l'erreur commise sur la fréquence porteuse est de 56 kHz, cette valeur est à comparer à la largeur de bande utile, qui est ici de 1MHz.

Une fois la fréquence porteuse connue, on peut déterminer la fréquence symbole à partir du signal en bande de base.

5.2 Fréquence symbole

Le calcul est inspiré de l'article [3] où les auteurs mettent en évidence les propriétés de cyclostationnarité des signaux modulés et la possibilité de les distinguer par la forme de leur corrélation spectrale.

À partir du signal en bande de base, on calcule un nouveau signal Z :

$$Z(t) = S(t)S^*(t - \tau)$$

On peut démontrer que ce signal possède une composante périodique :

$$R(t) = E(S(t)S^*(t - \tau))$$

La transformée de Fourier du signal Z(t) présentera alors

des raies espacées de $\frac{1}{T}$, cette valeur correspond à la fréquence symbole. La figure ci-dessous donne un exemple de spectre pour une modulation PSK4, dont le signal est filtré à l'émission et de fréquence symbole de 1 MHz.

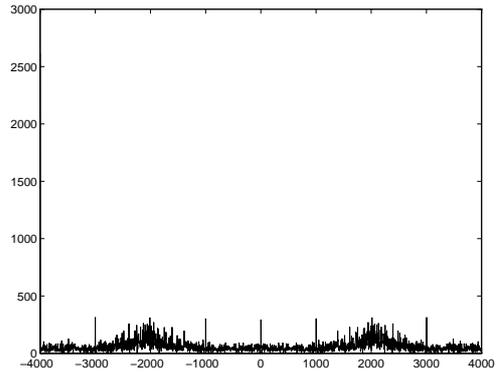


FIG. 7 : Fréquence symbole de 1MHz

La fréquence symbole est déterminée à partir de la période des raies du spectre.

6. Conclusion

Dans l'ensemble, les résultats obtenus pour la reconnaissance du type de modulation et l'estimation des fréquences porteuse et symbole sont fiables jusqu'à un rapport signal à bruit de 10 dB, avec des taux de reconnaissance supérieurs à 80%. Le calcul des fréquences permet de démoduler le signal reçu pour le ramener en bande de base et, connaissant la fréquence symbole, de retrouver la séquence émise, une fois le type de modulation déterminé.

Pour parfaire les résultats, il faudrait dorénavant généraliser les méthodes de reconnaissance des paramètres d'un signal à tout type de modulation quel que soit le nombre d'états et la constellation choisie et, pour rendre l'expérience encore plus réaliste, mieux représenter le milieu de transmission en tenant compte des échos.

Références

- [1] E. Azzouz, A. Nandi. *Automatic identification of digital modulation types*. Signal Processing vol 47 pps 55-69 1995.
- [2] E. Azzouz, A. Nandi. *Automatic modulation recognition of communication signals*. Kluwer Academic Publishers. 1996.
- [3] P Gournay, P. Nicolas. *Analyse spectrale cyclique et analyse temps-fréquence pour l'identification automatique de transmissions*. Quinzième colloque GRETSI de JUAN-LES-PINS du 18 au 21 septembre 1995.