

RECOMMANDATION UIT-R SM.1600

Identification technique des signaux numériques

(2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'utilisation des fréquences radioélectriques croît régulièrement;
- b) que l'utilisation de signaux numériques est très répandue;
- c) qu'un nombre croissant de dispositifs peut être utilisé sans avoir été préalablement soumis à un processus d'homologation ou d'octroi de licence, empêchant ainsi les administrations d'identifier leurs émissions;
- d) qu'il est souvent difficile de donner suite aux plaintes pour brouillage impliquant des émissions numériques;
- e) que l'identification préalable des signaux est souvent une condition essentielle pour pouvoir effectuer des mesures sur les signaux numériques à forme d'onde complexe comme les signaux utilisés en radiodiffusion numérique (radiodiffusion audionumérique (DAB), radiodiffusion vidéonumérique (DVB)) et en téléphonie cellulaire (accès multiple par répartition dans le temps (AMRT), accès multiple par répartition en code (AMRC)),

recommande

d'identifier les signaux numériques en procédant dans l'ordre suivant:

- 1** identification générale des signaux telle que décrite dans l'Annexe 1;
- 2** identification des signaux fondée sur les composantes fondamentales du signal comme indiqué dans l'Annexe 2;
- 3** identification à partir des caractéristiques de forme d'onde du signal tel que décrit dans l'Annexe 3.

ANNEXE 1

Processus d'identification générale**1 Préambule**

Pour l'identification des signaux numériques, il est conseillé de procéder comme suit:

- a) Identifier préalablement, par intercorrélation, les signaux connus ou normalisés.

Les émissions normalisées présentant des caractéristiques spécifiques (mots de synchronisation, séquences de conditionnement comme celles incluses dans de nombreux

protocoles AMRT, codes d'étalement brefs pour certains protocoles AMRC, etc.) peuvent être identifiées par des techniques d'intercorrélation qui permettent en même temps l'identification préliminaire de ces signaux. Cette méthode très simple et qui offre une grande souplesse d'utilisation est particulièrement intéressante en contrôle du spectre pour des formes d'ondes utilisées pour les radiocommunications numériques de Terre en ondes décimétriques (GSM, IS 95, DECT, etc.) et pour les communications par satellite (GLOBALSTAR, ICO, IRIDIUM). Les principaux éléments à identifier par intercorrélation sont les suivants:

- le préambule;
- le temps de garde;
- le mot de synchronisation, les séquences de conditionnement;
- les codes;

et, au cas où cette identification préalable échouerait, il faudrait:

b) Identifier le signal d'après sa forme.

En ce qui concerne l'identification des signaux de transmission selon leurs caractéristiques nominales, suite à l'échec ou à l'impossibilité d'identification préalable, il est recommandé d'analyser le signal en procédant comme suit:

- détecter dans un premier temps la présence d'émissions multiples et séparer les signaux lorsque cela est possible;
- séparer les signaux analogiques, les signaux non MRFOC (multiplexage par répartition en fréquence orthogonale codée) et les signaux MRFOC;
- identifier les caractéristiques de transmission des signaux analogiques;
- identifier les caractéristiques de transmission des signaux numériques non MRFOC;
- identifier les caractéristiques de transmission des signaux numériques MRFOC.

Les principaux éléments à analyser sont les suivants:

- type de signal: numérique ou analogique;
- structure en canaux et largeur de bande du signal;
- allure du spectre, forme du signal temporel, forme du signal dans le domaine temps/fréquence (signal continu/intermittent; signal de fréquences fixe/signal à étalement du spectre, caractéristiques d'étalement de fréquences des signaux en salve: durée d'intervalle, fréquence des transitions entre intervalles, etc.);
- réponse du signal à l'application de diverses transformées (moments d'ordre supérieurs, passage par zéro, etc.);
- type de modulation (linéaire/non linéaire, etc.);
- caractéristiques de modulation en fonction de son type (nombre de symboles; transitions entre symboles; profondeur de modulation; etc.).

Ces différents paramètres relatifs aux signaux peuvent être utilisés pour l'identification au moyen des méthodes recommandées ci-après.

2 Système de réception et de numérisation du signal en vue de son identification

Il est recommandé d'utiliser un récepteur numérique à largeur de bande réglable pour pouvoir effectuer une transposition du signal en rapport I/Q ou en fréquence intermédiaire et pouvoir numériser le signal et en enregistrer les échantillons.

- a) Pour les signaux à bande étroite souvent identifiables en temps réel, il est recommandé d'utiliser des filtres d'entrée à fréquence centrale et à largeur de bande B fixes, suivis par des filtres à bande étroite à largeur de bande et à fréquence centrale réglables, afin d'obtenir des largeurs de bande bien centrées sur les émissions étudiées, les valeurs de B sont les suivantes:
 - émissions à largeur de bande télégraphique ou téléphonique: 100 Hz à 3,4 kHz;
 - émission avec largeur de bande moyenne: 15 à 45 kHz.
- b) Pour les signaux à large bande, principalement identifiables en temps différé, il est recommandé, tout en permettant l'utilisation de filtres plus sélectifs pour le post-traitement, d'utiliser des filtres dont les largeurs de bande B ont les valeurs suivantes:
 - $B = 300$ kHz (pour la plupart des signaux de radiocommunication actuels);
 - $B = 2$ MHz (principalement pour les signaux DAB et IS 95);
 - $B = 8$ à 10 MHz (pour des émissions à bande plus large: DVB, UMTS et IMT-2000, et autres).
- c) Pour les signaux à bande encore plus large, bien que les émissions soient moins nombreuses, il faut prévoir la présence de numériseurs et de processeurs plus coûteux et, dans le cas de stations télécommandées, des débits de transmission à débit binaire élevé. Par conséquent, les stations de contrôle devraient, dans un premier stade, être équipées pour les largeurs de bande les plus faibles seulement.

Pour être acceptable, un système devrait comporter les équipements suivants:

- un récepteur analogique ou numérique à fréquence centrale à réglage fin, à grande dynamique élevée avec une commande de gain étendue (plage d'action recommandée: 50 à 60 dB);
- des filtres, des convertisseurs en bande de base, des convertisseurs analogiques-numériques et un enregistreur présentant les caractéristiques suivantes:
 - longueur des échantillons: 8 bits au moins (valeur recommandée: 12 bits);
 - fréquences d'échantillonnage générant plus de quatre échantillons pour chaque symbole de modulation numérique;
 - capacité de stockage permettant d'enregistrer un signal d'une durée de quelques millisecondes pour les signaux large bande et de quelques secondes pour les signaux à bande étroite.

ANNEXE 2

Identification préliminaire au moyen de techniques d'intercorrélation avec signal de test et au moyen d'autres techniques de corrélation

Les techniques d'intercorrélation sont fondées sur les considérations théoriques suivantes:

1 Description théorique succincte des techniques de corrélation

Les techniques d'intercorrélation utilisent des éléments connus du signal à étudier pour effectuer les calculs d'intercorrélation utilisés pour les opérations de détection, de synchronisation, de compensation temporelle et de compensation Doppler.

Dans la pratique, ces signaux connus sont des signaux modulés intégrés dans une onde dont le flux de symboles est défini par des normes internes, des spécifications systémiques, etc. et notamment:

- les mots de synchronisation présents pour de nombreuses ondes normalisées continues (multiplexage par répartition en fréquence (MRF), etc.);
- les séquences de conditionnement pour les ondes normalisées AMRT;
- les codes pilotes et les mots de synchronisation pour les ondes normalisées AMRC ou AMRT/AMRC, etc.

NOTE 1 – Pour l'étude d'un signal inconnu, on peut utiliser comme signal connu déjà enregistré ou mettre en évidence ces signaux par intercorrélation. Dans tous les cas, d'importantes simplifications peuvent être apportées si les conditions d'enregistrement du signal connu sont elles mêmes connues et en particulier, la vitesse relative ou le décalage Doppler de la source du signal.

Considérons un signal connu $z(t)$ contenu dans un signal émis $s(t)$, le signal reçu $x(t)$ correspondant et la durée d'intégration, IT , les fonctions d'intercorrélation et d'autocorrélation ont la forme suivante:

$$\Gamma_{x,z}(\tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} x(\tau + \zeta) \cdot z^*(\zeta) d\zeta \right] \quad \text{et} \quad \Gamma_{x,x}(\tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} x(\tau + \zeta) \cdot x^*(\zeta) d\zeta \right]$$

et si $x(\tau + \zeta) \equiv z(\zeta)$ pendant l'intervalle de temps $[\tau, \tau + IT]$, nous avons:

$$\Gamma_{x,z}(\tau) = \Gamma_{z,z}(\tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} |z(\zeta)|^2 d\zeta \right] \quad \text{qui est la puissance moyenne du signal connu } z \text{ entre } \tau$$

et $\tau + IT$.

Dans ces expressions:

\cdot : symbole de la multiplication

$z^*(\zeta)$: conjugué complexe du signal $z(\zeta)$, et $|z(\zeta)|$ le module du signal $z(\zeta)$: si nous posons $z(\zeta) = a(\zeta) + i \cdot b(\zeta)$ avec $a(\zeta)$: partie réelle de $z(\zeta)$ et $b(\zeta)$: partie imaginaire de $z(\zeta)$, et si nous posons $i^2 = -1$, alors $z^*(\zeta) = a(\zeta) - i \cdot b(\zeta)$ et $|z(\zeta)|^2 = (a(\zeta))^2 + (b(\zeta))^2$

$x^*(\zeta)$: conjugué complexe du signal $x(\zeta)$, avec la même définition que précédemment

τ : délai.

Si la fonction $x(\tau + \zeta)$ est égale au signal connu $z(\zeta)$ pendant l'intervalle $[\tau, \tau + IT]$, elle correspond à la valeur maximale de $\Gamma_{s,z}(t)$ qui est égale à la puissance moyenne du signal reçu $z(t)$ pendant le temps IT , ce qui donne l'instant d'arrivée du signal $z(t)$ contenu dans le signal reçu $x(t)$.

Dans la pratique, le signal reçu $x(t)$ contient le signal émis $s(t)$ qui est lui-même filtré par les affaiblissements de propagation h et $x(t)$ contient une contribution au bruit $n(t)$ et parfois aussi, une contribution externe au brouillage $j_{ext}(t)$. Ainsi le signal complet reçu x est représenté par l'expression $x(t) = h*s(t) + n(t) + j_{ext}(t)$. Dans cette dernière expression, le symbole $*$ représente le produit de convolution et le symbole h , la réponse impulsionnelle dans le canal du filtre de propagation qui tient compte de l'affaiblissement atmosphérique, des effets de sol, des trajets multiples, etc. Les modèles pratiques de réponse impulsionnelle h sont spécifiés par exemple dans les normes des systèmes cellulaires. A noter que l'approximation la plus simple de la propagation consiste à considérer que la réponse impulsionnelle h du canal est égale au coefficient d'affaiblissement moyen h_0 à appliquer au signal émis $s(t)$, de sorte que l'on a $h*s(t) = h_0 \cdot s(t)$. Dans un souci de simplification, on utilisera cette approximation dans toute la suite du texte. A l'instant de synchronisation (ou instant d'arrivée) t_{SYNC} , le signal émis $s(t)$ est égal aussi à $z(t)$ ou contenu dans le signal connu $z(t)$ (on considérera ci-après que $s(t) = z(t) + (s(t) - z(t))$ où $z(t)$ est le signal contenu dans $s(t)$ et $s(t) - z(t)$ la partie inconnue du signal $s(t)$). Ainsi à l'instant de synchronisation t_{SYNC} , le signal total reçu $x(t)$ a la forme suivante:

$$x(t_{SYNC}) = h_0 \cdot z(t_{SYNC}) + n(t_{SYNC}) + j(t_{SYNC})$$

Dans cette dernière expression, on note que $j(t_{SYNC}) = [h_0 \cdot (s(t_{SYNC}) - z(t_{SYNC})) + j_{ext}(t_{SYNC})]$ et que $j(t)$ représente la contribution totale au brouillage associée à la partie inconnue $s(t) - z(t)$ du signal émis $s(t)$ et à la fréquence externe $j_{ext}(t)$. A partir de cette dernière expression et en introduisant la densité spectrale de puissance associée au signal z et au signal $n + j$ et à la largeur de bande, BW du signal z , et en considérant un filtrage et un échantillonnage adéquats de la largeur de bande, BW du signal, le rapport S/N à la sortie et à l'entrée de la fonction d'intercorrélation sont liés par les expressions théoriques suivantes, dans lesquelles C_z est la puissance du signal z et $N + J$ est la puissance totale bruit plus brouillage dans BW:

$$\left(\frac{C_z}{N + J} \right)_{output} = \left(\frac{C_z}{N + J} \right)_{input} \cdot BW \cdot IT$$

Cette dernière équation montre que le traitement par intercorrélation donne un gain proportionnel au produit $(BW \cdot IT)$. Pour les signaux échantillonnés qui respectent le critère de Nyquist on a $BW \cdot IT = L_{sample}$ c'est à dire le nombre d'échantillons du signal pendant le temps d'intégration IT , de sorte que le gain d'intercorrélation $10 \log_{10}(BW \cdot IT) = 10 \log_{10}(L_{sample})$ est directement donné par le nombre d'échantillons du signal. Par exemple, si l'on a 10^6 échantillons du signal respectant le critère de Nyquist, le gain d'intercorrélation est de 60 dB. Dans cette hypothèse, les Fig. 1 et 2 montrent l'intérêt de la technique d'intercorrélation pour la détection de faibles signaux, processeur de signaux numériques (DSP) (obtenus par simulation).

2 Mise en œuvre pratique de la technique d'intercorrélation

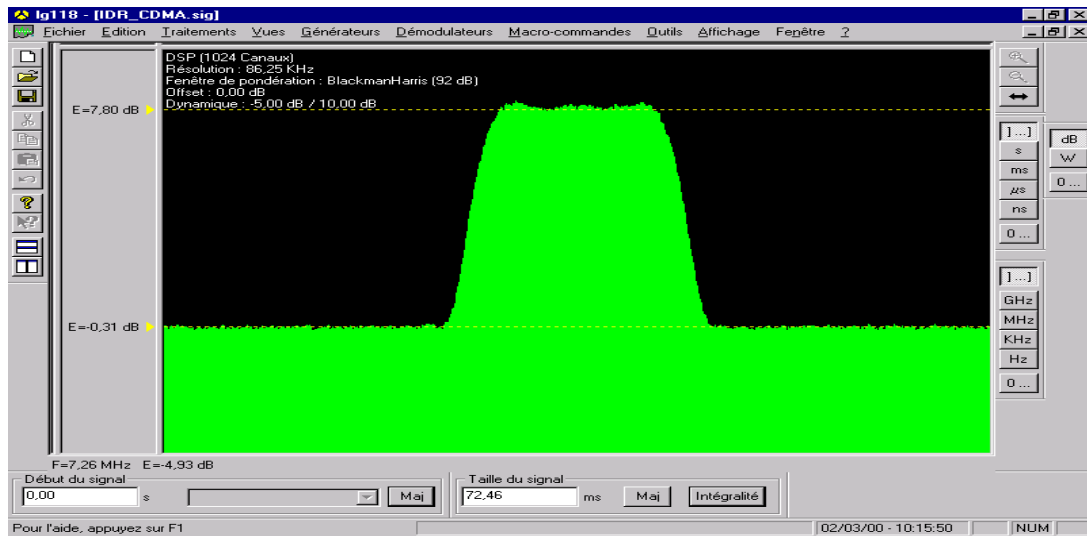
Pour la mise en œuvre pratique de ces techniques, on recourt à des fenêtres glissantes pour déterminer l'instant d'arrivée du signal, et à des techniques de compensation de l'effet Doppler pour tenir compte du mouvement de la source du signal. En général, ces méthodes pratiques se décomposent en deux Etapes:

Etape 1: évaluation de l'erreur Doppler sur la fréquence et de l'instant de synchronisation;

Etape 2: correction de l'erreur Doppler sur la fréquence et optimisation de la détection et de la séparation des sources.

FIGURE 1

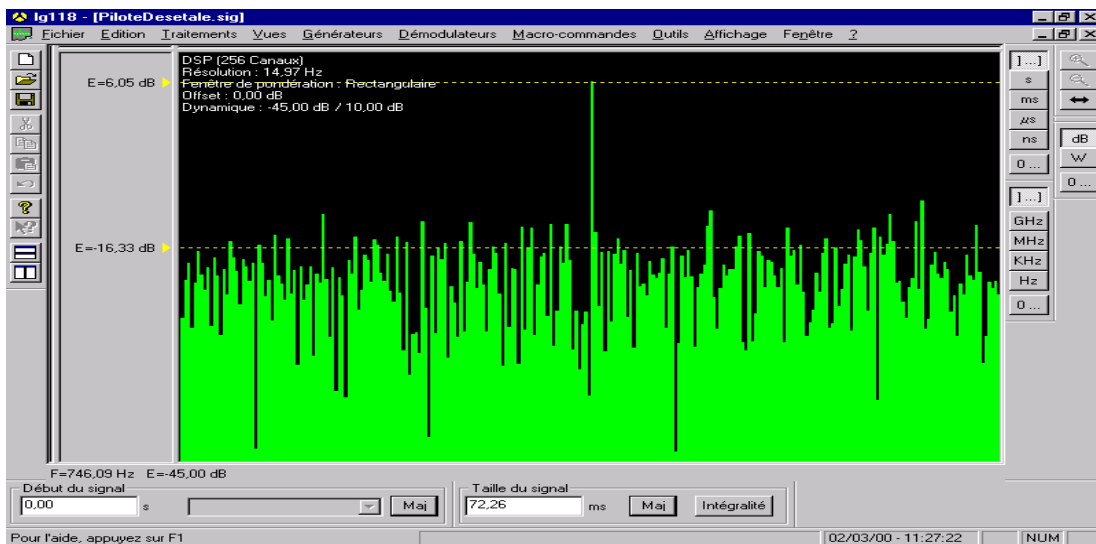
Spectre d'un signal dominant S_1 + bruit Gaussien + signal AMRC secondaire plus faible S_2 . (le niveau du signal S_1 est supérieur de 8 dB au bruit de fond N et apparaît clairement sur le spectre, le signal S_2 est inférieur de 13 dB au bruit et n'est pas visible sur le spectre)



1600-01

FIGURE 2

Effet de l'intercorrélation sur le signal précédent (incluant S_1 , S_2 et N) avec un code pilote inclus dans le signal AMRC S_2 . Il apparaît clairement sur la Figure une crête associée à S_2 , qui est supérieure ici de 20 dB au bruit de fond



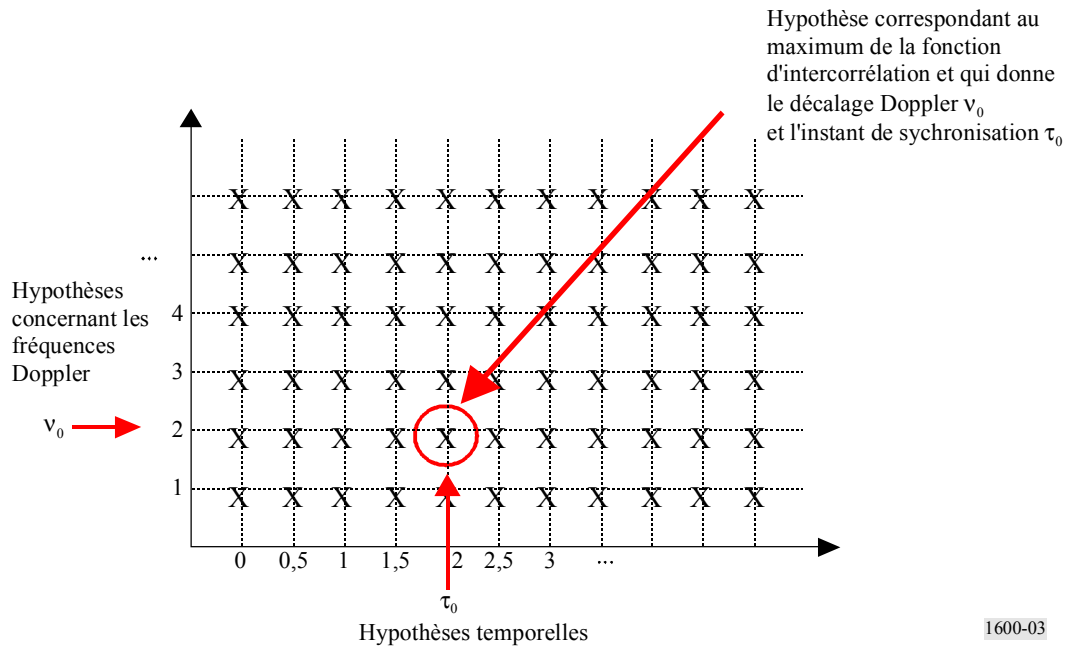
1600-02

2.1 Description de la synchronisation temporelle et Doppler

Dans son principe, la synchronisation temporelle et Doppler consiste à réaliser une intercorrélation du signal avec le signal connu pour différentes hypothèses temporelles et de décalage Doppler. Ainsi, l'instant de synchronisation et la fréquence Doppler sont tous deux estimés par le point du plan de fréquence/temps où la crête d'intercorrélation est maximale.

FIGURE 3

Recherche des hypothèses dans le plan fréquence/temps qui optimisent la crête d'intercorrrelation



Ce traitement peut être réalisé de manière simplifiée en utilisant les techniques de transformée de Fourier. Afin de réduire la complexité des transformées rapides de Fourier (TFR), un désétalement cohérent peut être effectué sur des tranches successives du signal, de manière à ce que l'effet Doppler sur la porteuse soit limité sur une tranche de signal donnée.

2.2 Optimisation de la détection et de la discrimination des sources

A cette fin, il est nécessaire:

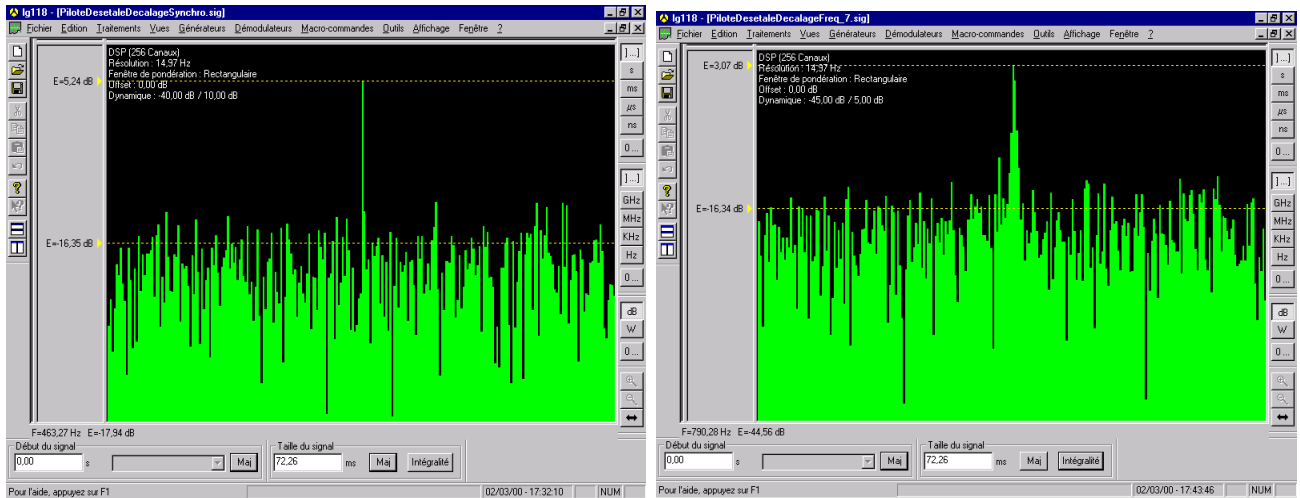
- d'optimiser le choix du temps d'intégration IT , ce qui peut être fait par détermination du rapport C/I et du rapport S/N du signal à détecter;
- d'évaluer la précision de la détermination de l'instant de synchronisation et de l'effet Doppler, ce qui peut être réalisé au moyen de méthodes fondées sur l'échantillonnage adaptatif, sur l'interpolation dans le plan temps/fréquences;
- d'estimer la dégradation due à la discordance résiduelle de temporelle de synchronisation et à la discordance fréquentielle de l'effet Doppler. En général, la bonne synchronisation temporelle et Doppler devrait être affectée par au moins quatre facteurs dont l'importance dépend du temps d'intégration IT , de la nature des rapports C/I et C/N du signal et de la mise en œuvre pratique de l'algorithme de synchronisation, à savoir:
 - un estimateur TFR avec une erreur de la fréquence Doppler;
 - la présence d'une fréquence Doppler résiduelle après compensation;
 - une discordance temporelle de la réception en cas de filtrage de Nyquist (erreur d'échantillonnage);
 - la présence d'un brouillage dû à d'autres signaux associés à la matrice d'intercorrrelation.

A titre d'illustration, considérons par exemple le signal AMRC S_2 de la Fig. 1 dont la détection est réalisée dans un cas parfait à la Fig. 2, la Fig. 4 ci-dessous montre la détection du même signal S_2 dans les mêmes conditions à ceci près que:

- il y a une discordance temporelle de $T_c/(2 \cdot N_e) = T_c/4$ (T_c : durée d'élément) à la Fig. 4a);
- une discordance de fréquence de 8 Hz pour la synchronisation Doppler à la Fig. 4b).

FIGURE 4

Détection avec discordance temporelle et discordance Doppler

a) Discordance temporelle de $T_c/4$

b) Discordance Doppler de 8 Hz

1600-04

La dégradation est ici inférieure à 1 dB pour la crête de la Fig. 4a), mais elle atteint environ 4 dB à la Fig. 4b).

3 Application des techniques d'intercorrélation pour la détection et l'identification préliminaire des signaux émis

Les moyens d'identification doivent pouvoir assurer les fonctions suivantes:

3.1 Réception numérique avec largeur de bande réglable pour la translation de fréquences et enregistrement des signaux échantillonnés permettant ensuite l'exécution de processus en temps réel et en temps différé.

3.2 Production des signaux de test – Constitution d'une base de données

Il est recommandé de pouvoir produire des signaux de test:

- par simulation (génération d'un signal de transmission avec contrôle du flux binaire, de la modulation, du débit et de la porteuse), et en utilisant des générateurs de signaux logiciels et matériels;
- par extraction à partir de fichiers de signaux existants (opération couper/coller sur un signal numérisé provenant par exemple d'un générateur de signal ou de signaux réels précédemment enregistrés);

et ceci sans autres limites que les capacités de traitement de données de l'équipement utilisé (il sera peut-être nécessaire de disposer d'un grand nombre d'échantillons de signaux pour pouvoir utiliser

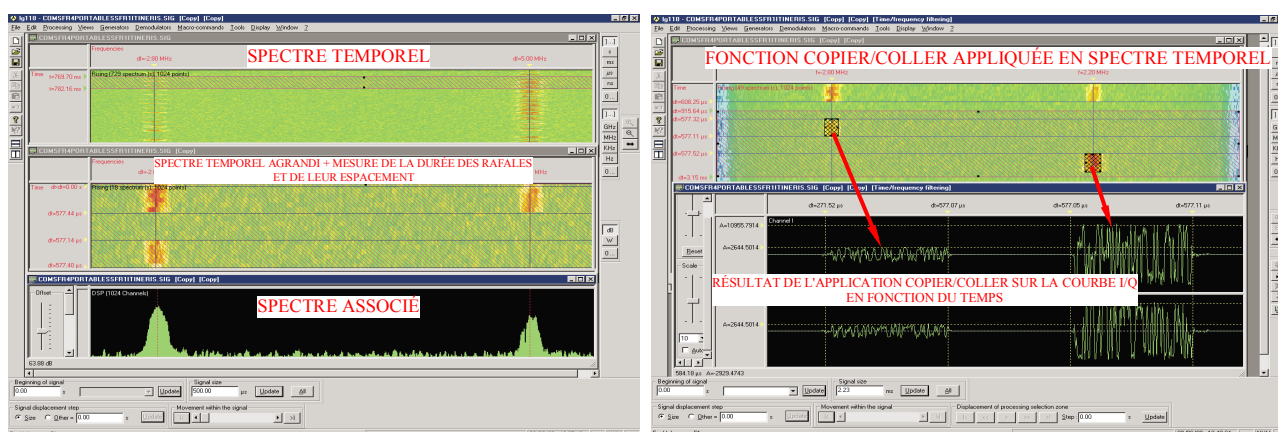
ces techniques en fonction de la fréquence d'échantillonnage et de la longueur des signaux de test), afin de tirer parti au maximum de l'augmentation future de la taille mémoire et de l'unité centrale de l'ordinateur.

3.3 Analyse préliminaire visant à aider l'utilisateur à choisir les fonctions de test les plus appropriées

Pour cela, il est recommandé en particulier d'utiliser des curseurs ou des grilles adaptés aux formes d'ondes courantes normalisées et de les appliquer aux différents modes de présentation (à savoir: temps, spectre, et temps/fréquence). Il est ainsi possible de déterminer rapidement la fréquence de la porteuse, la disposition des canaux, la largeur de bande, le débit et la durée des signaux, aussi bien pour des signaux multiporteuses que pour des signaux en rafales, et ceci dans les conditions d'occupation du spectre modérée à intense (réseau cellulaire par exemple).

Ces mesures (associées aux fonctions zoom, copier/coller, etc.) permettent souvent une reconnaissance immédiate de la nature du signal comme le montre la Fig. 5 (un signal GSM se reconnaît par la durée de ses rafales qui est de 577 μ s et de sa structure en canaux de 200 kHz).

FIGURE 5
Représentation temporelle du spectre et affichage panoramique d'un signal en rafales GSM, avec fonctions zoom, copier/coller et de mesures associées



1600-05

A la Fig. 5, la reconnaissance du signal GSM est confirmée par les mesures: l'espacement entre canaux est un multiple de 200 kHz (dans ce cas 600 kHz), la durée des rafales est de 577 μ s, etc.

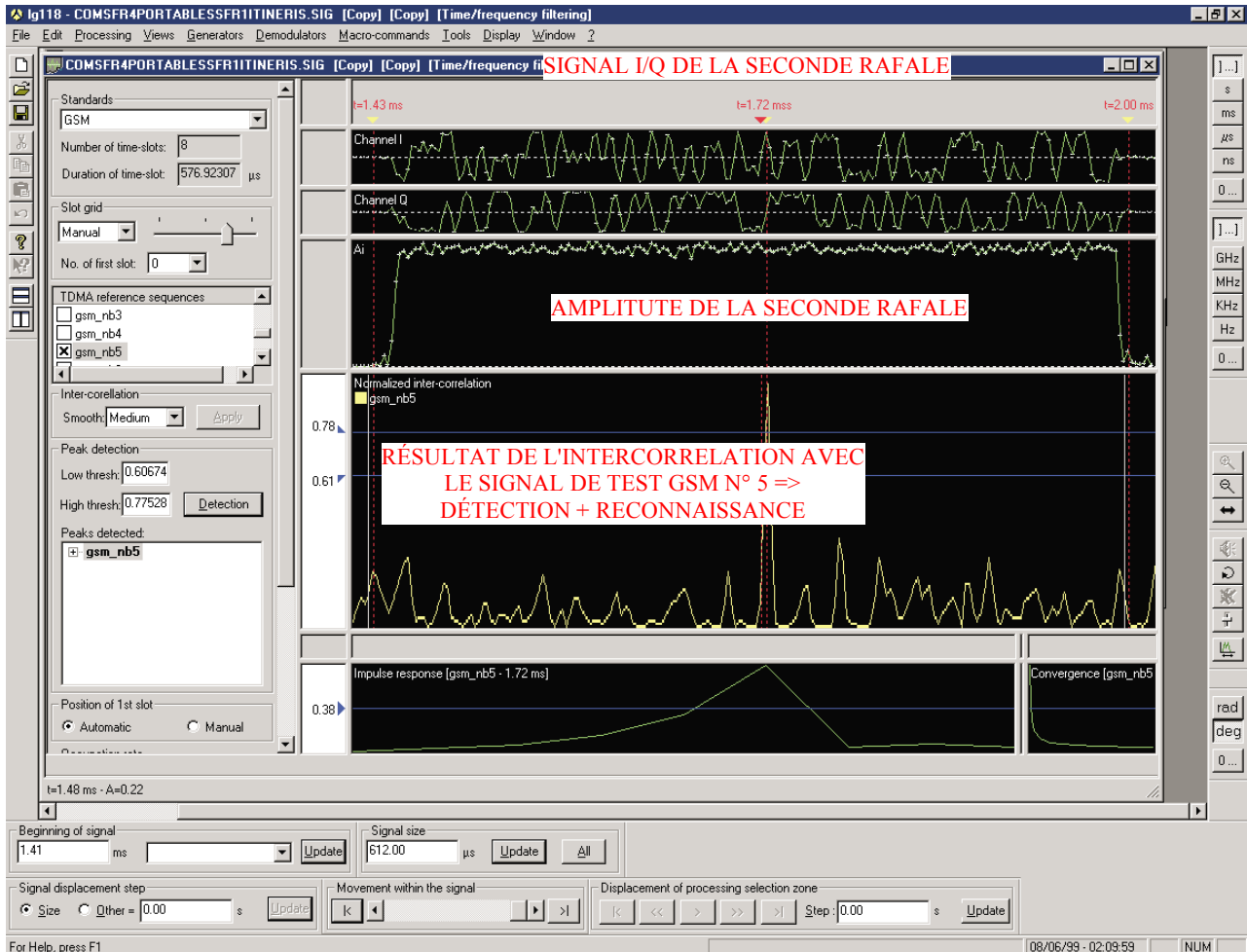
3.4 Intercorrélation avec des signaux de test et fonctions de recherche

La valeur crête de l'intercorrélacion du signal analysé avec un signal de mesure permet de détecter la présence du signal de mesure à l'intérieur du signal analysé. Ainsi, l'intercorrélacion d'un signal avec des séquences de référence permet de déterminer son identité technique.

Par exemple, dans le cas du signal GSM représenté aux Fig. 5 et 6, qui est facilement identifiable par ses caractéristiques temps/fréquence (rafales de 577 μ s, périodicité multiple de 8, espacement entre canaux multiple de 200 kHz), l'intercorrélacion systématique avec les séquences de conditionnement considérées ici comme signaux de test, permet de le spécifier, il s'agit d'un canal de trafic utilisant la séquence de conditionnement N° 5 (voir la Fig. 6). De la même manière, d'autres canaux de trafic, salves de synchronisation, salves de correction de fréquence, salves de remplissage peuvent être identifiés dans des canaux de diffusion ou de trafic des réseaux cellulaires.

FIGURE 6

Reconnaissance de l'identité technique d'une salve GSM; une salve de trafic est identifiée: son intercorrélation avec la séquence intermédiaire N°5 est pratiquement égale à un



1600-06

Cette méthode s'applique également aux mots de synchronisation, aux codes pilotes ou aux codes de synchronisation utilisés dans les protocoles AMRC de sorte qu'il est possible de déséaler leurs formes d'ondes et de les identifier.

On peut obtenir facilement d'autres informations telles que l'estimation de la réponse impulsionnelle des canaux, le contrôle de la qualité de démodulation et des informations sur le taux d'occupation par intervalle de temps dans le cas d'un signal AMRT (voir la Fig. 6).

3.5 Systématisation et automatisation du processus de recherche des signaux de test

Le processus de l'identification préliminaire des signaux est très efficace avec des protocoles normalisés ayant des mots ou des séquences de synchronisation (ce qui est courant avec de nombreux signaux AMRT), ou des codes pilotes (ce qui est courant avec de nombreux signaux AMRC), etc., mais il peut parfois exiger une grande puissance de calcul. Il est donc recommandé d'utiliser des algorithmes rapides, permettant de systématiser et d'automatiser fortement le processus afin de traiter les signaux de test par familles de normes, comme par exemple:

- les systèmes de radiocommunication mobiles PRM, les systèmes cellulaires, les systèmes de Terre ou les systèmes à satellites utilisant un protocole AMRT (y compris les systèmes TETRA, GSM, D-AMPS, PDC, DECT, IRIDIUM, ICO, etc.);

- les systèmes de radiocommunication mobiles PRM, les systèmes cellulaires, les systèmes de Terre ou les systèmes à satellites utilisant un protocole AMRC (y compris l'IS 95, UMTS, les IMT-2000, GLOBALSTAR, etc.).

A cette fin, il est souhaitable:

- de procéder à plusieurs tests simultanés d'intercorrélation (test par familles de normes, c'est-à-dire sur tous les signaux connus d'une norme donnée, par exemple TETRA, GSM, IS 136, IS 95, etc.);
- d'associer aux techniques d'intercorrélation, des systèmes de présentation adaptés avec aide graphique pour mettre en évidence les formes caractéristiques des signaux en utilisant les fonctions de détection de crête, de détection des récurrences, etc., telles celles qui sont représentées à la Fig. 2.

ANNEXE 3

Vérification des caractéristiques des signaux

1 Introduction

En ce qui concerne l'identification des signaux de transmission en fonction de leurs caractéristiques de modulation, il est recommandé d'utiliser le processus d'analyse décrit ci-après:

2 Détection des émissions multiples

2.1 Importance pratique de la détection des émissions multiples

Pour pouvoir effectuer des mesures valables et augmenter la probabilité d'identifier le signal en fonction de ses spécificités, l'opérateur est tenté de choisir un filtre à large bande pour l'exploration. En général, cette largeur de bande sera de plusieurs kHz en ondes décimétriques et de plusieurs dizaines ou centaines de kHz pour les ondes métriques ou décimétriques, dans lesquelles plusieurs émissions peuvent coexister.

Toutefois, les processus de mesure et d'identification fonctionnent bien uniquement en présence d'une seule émission dans la largeur de bande d'analyse. La détection d'émissions multiples est ainsi une fonction importante de tout système de contrôle du spectre et de mesure associé.

2.2 Détection et traitement des émissions multiples

Pour détecter la présence d'émissions multiples, il est recommandé d'utiliser des représentations convenables du signal. Dans un certain nombre de cas, une simple représentation visuelle paramétrique permet de diagnostiquer les situations d'émissions multiples et d'isoler les diagrammes d'énergie correspondant aux divers signaux.

Pour cela, il est recommandé d'associer trois types d'analyses et de représentation visuelle, à savoir:

- une analyse en fréquence pour segmenter le spectre sur la base d'un critère fondé sur l'énergie;

- une analyse temporelle associée à une analyse en fréquence, par exemple, afin de ne pas diviser le spectre d'une émission multiporteuse;
- une analyse temps/fréquences pour reconnaître et associer les diverses contributions à un signal en salve ou reconnaître un signal variable dans le temps et en fréquence.

Par exemple, les représentations temps/fréquences permettent de distinguer le cas d'un signal de modulation par déplacement de fréquence (MDF) modulé par une source unique d'un signal MDF à tonalité continue (par exemple, un signal MRFO), ou le cas de plusieurs bandes étroites.

2.3 Séparation des signaux, séparation des diagrammes d'énergie

Il est recommandé de séparer les composantes du signal correspondant à une source au moyen de fonctions de filtrage dans le domaine angulaire (utilisation d'un goniomètre), et dans les domaines temps, fréquences et temps/fréquences (les fonctions zoom, filtrage avec possibilité de choisir un filtre existant ou d'en définir un, les fonctions couper/coller/concaténer, etc., sont intéressantes à cet effet). Ces techniques suffisent dans la plupart des cas généralement rencontrés en contrôle du spectre.

La Fig. 8 montre un exemple d'extraction de deux signaux en salve par filtrage dans le domaine temps/fréquence ainsi que la séparation d'un signal en rafale après filtrage temporel.

3 Identification d'un signal analogique

Pour identifier un signal analogique, il est recommandé de procéder en quatre Etapes comme suit:

Etape 1: écoute directe du signal démodulé en MA, MF ou MP, méthode également applicable aux signaux AMRF et AMRT après démodulation et filtrage successifs;

Etape 2: présentation directe du signal TV analogique démodulé (on peut utiliser pour cela des cartes syntoniseur/démodulateur TV pour ordinateur personnel disponibles à un coût modique), méthode qui s'applique aux signaux MDF analogiques après démodulation et filtrage successifs;

Etape 3: méthode automatique: identification de la parole en utilisant les caractéristiques à long terme de la parole (en particulier la dynamique), par calcul et des représentations sous forme d'histogrammes de la variance et des valeurs crêtes du signal;

Etape 4: simultanément avec les méthodes précédentes:

- les représentations panoramiques et des affichages temps/fréquences du signal pour déterminer sa nature (MA, BLU, MF, MRF, etc.);
- une consultation de la base de données de signaux de radiocommunications analogiques;
- les techniques de mesure précédemment recommandées pour la détermination des caractéristiques de modulation:
 - fréquences des porteuses et sous-porteuses dans le cas de protocoles MRF;
 - largeur de bande du signal;
 - caractéristiques de modulation (amplitude, excursion en fréquence et en phase), mesurées conformément aux Recommandations UIT-R en vigueur.

4 Reconnaissance de signaux MRFO inconnus au moyen d'autres techniques de corrélation

Autocorrélation: l'autocorrélation du signal x est donnée par la formule:

$$\Gamma_{x,x}(\tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} x(\tau + \zeta)x^*(\zeta)d\zeta \right]$$

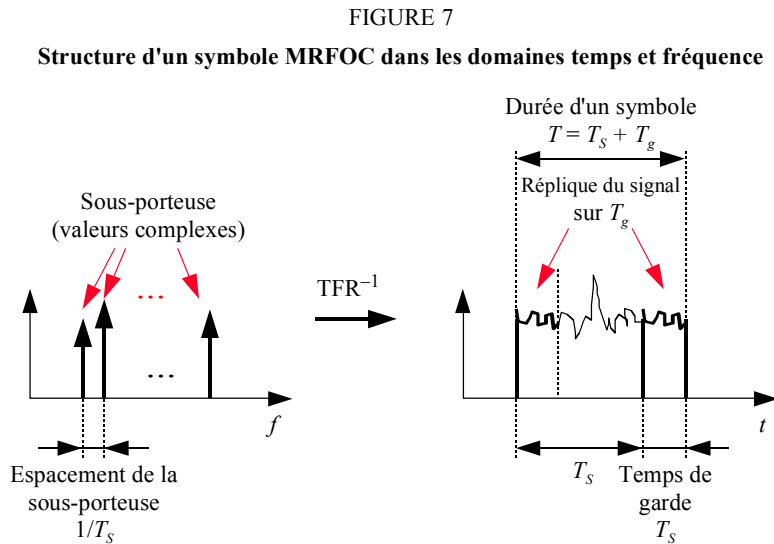
Une application du traitement par autocorrélation est la reconnaissance des séquences périodiques à l'intérieur des signaux de transmission qui peuvent être utilisés comme signal connu en vue d'un traitement différé. Par exemple, un processus de détection et de reconnaissance précise peut être obtenu en associant le calcul par autocorrélation pour reconnaître un signal connu périodique à l'intérieur d'un signal de transmission AMRC et par intercorrélation ultérieure fondée sur ce signal connu.

Autocorrélation cyclique: l'autocorrélation cyclique offre de nombreux avantages en matière de traitement des signaux partiellement inconnus comme nombre de signaux MRFO et AMRC, et de faire ressortir les propriétés cycliques des signaux de transmission de ces signaux. Son expression est donnée par:

$$\hat{\Gamma}_{x,x}(\alpha, \tau) = \frac{1}{IT} \cdot \left[\int_{\zeta=\tau}^{\zeta=\tau+IT} x(\tau + \zeta)x^*(\zeta)e^{-2j\pi\alpha\zeta} \cdot d\zeta \right]$$

4.1 Application à la reconnaissance d'un signal MRFOC

La structure des symboles d'un signal MRFOC est rappelée à la Fig. 7.



1600-07

Pour la détermination du taux de modulation et de la synchronisation des symboles, il est possible d'utiliser la duplication présente au début ou à la fin du symbole pour constituer une partie du signal correspondant au temps de garde. Ainsi, la duplication du signal permet l'utilisation de méthodes efficaces fondées sur des signaux connus. Dans le cas d'un signal MRFO, les fonctions mathématiques de base de calcul sont la fonction d'autocorrélation et la fonction d'autocorrélation cyclique qui ont été présentées plus haut.

La mise en œuvre pratique de ces méthodes peut être réalisée en trois Etapes, à savoir:

Etape 1: Le comptage des sous-porteuses, qui peut être effectué sur un analyseur de spectre à très haute résolution (résolution supérieure à $1/2 T_S$). Il est recommandé d'utiliser des représentations panoramiques du signal avec une résolution spectrale variable (et un temps d'intégration également variable) ainsi qu'un grand nombre de points de calcul (pour obtenir une bonne résolution et procéder à l'interpolation des points du spectre par remplissage avec des zéros), associées à des fonctions zoom et des mesures par curseur.

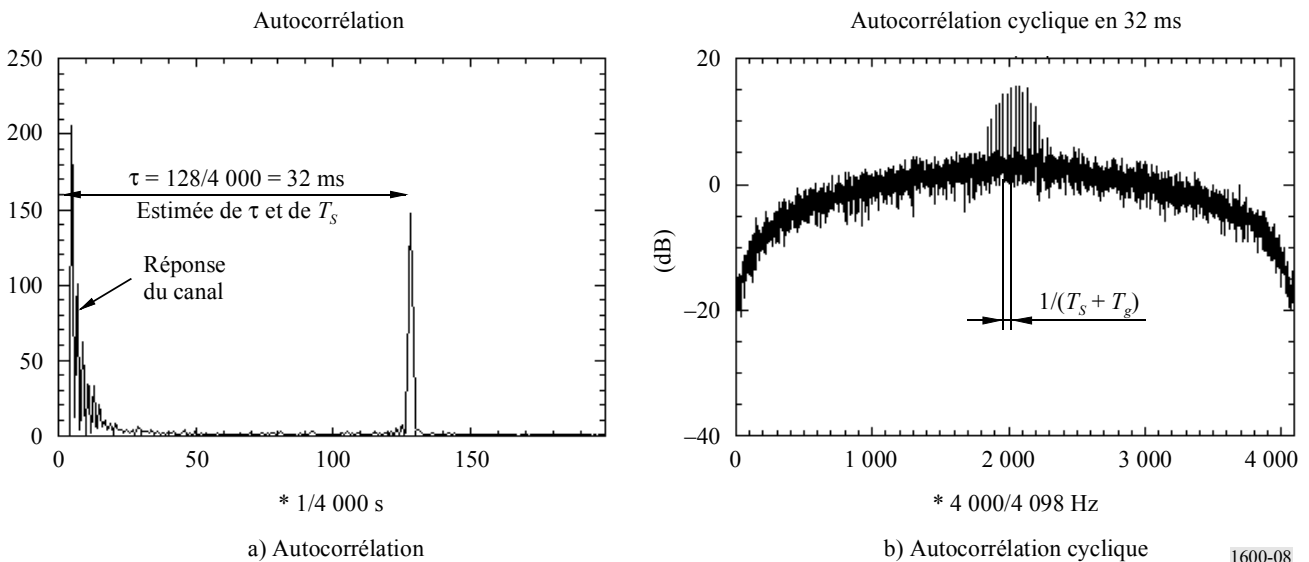
Etape 2: Autocorrélation du signal pour faire apparaître les crêtes correspondants au temps $\tau = T_S$ afin de déterminer l'espacement entre sous-porteuses $1/T_S$ (voir la Fig. 8). (A noter qu'on ne peut confondre la série de crêtes correspondant aux échos du canal avec les crêtes donnant la durée de symbole des sous-porteuses en raison de leur valeur.)

Etape 3: Calcul d'autocorrélation cyclique pour le temps τ (τ étant l'estimation de T_S) donné par l'autocorrélation de sorte qu'on peut extraire les parties corrélées du signal correspondant à la partie dupliquée du symbole pour constituer le temps de garde (voir la Fig. 7):

- pour confirmer en plus la valeur de la durée de symbole T_S (l'autocorrélation cyclique calculée pour une valeur de τ autre que T_S ne présente pas de crêtes);
- pour déterminer la vitesse de modulation des sous-porteuses $1/(T_S + T_g)$ et le temps de garde T_g .

FIGURE 8

Méthodes de corrélation appliquées à un signal MRFOC



1600-08

La détermination des trois paramètres: durée de symbole (T_S), temps de garde (T_g) et nombre de sous-porteuses permet, dans la majorité des cas, d'identifier le signal MRFOC et d'effectuer des mesures adéquates concernant la modulation des sous-porteuses.

5 Identification d'un signal numérique autre qu'un signal MRFOC

Pour une telle identification, il est recommandé de procéder en trois Etapes, pratiquement analogues à celles du processus recommandé pour les mesures sur un signal à large bande inconnu a priori:

Etape 1: extraction de la fréquence porteuse et de la vitesse de modulation;

Etape 2: synchronisation des symboles (horloge) et caractérisation de la modulation (normalisée, nombre d'états, constellation en cas de modulation linéaire, etc.);

Etape 3: validation des caractéristiques du signal par démodulation, à l'aide d'algorithmes et de diagrammes de mesure associés sur écran dans le cas:

- de modulations linéaires, ou;
- de modulations non linéaires.

5.1 Extraction de la fréquence porteuse et détermination de la rapidité de modulation

En fonction du type de modulation, il est recommandé d'utiliser les méthodes indiquées au Tableau 1.

TABLEAU 1

Tableau récapitulatif des principaux marqueurs et méthodes d'extraction des caractéristiques de la modulation des signaux de transmission numériques

Paramètres à évaluer	Marqueur/processus de mesure	Modulations concernées
Vitesse de modulation dans le cas d'une modulation asynchrone ou synchrone	Histogramme de durée d'amplitude, A_i , de fréquence, F_i , et fréquence, par pas de F_i	Modulation-actif-non-actif (OOK), MDF et modulation par déplacement de phase (MDP) non filtrées
	Spéctre en amplitude, A_i	MDP filtrée ou non filtrée, modulation de phase continue (MPC) ou MDF après filtrage
	Spéctre de fréquence, F_i	MDF non filtrée
	Passage par zéro en fréquence, F_i	MDF filtrée ou non filtrée
	Spéctre du module du signal à la puissance N (2 ou 4)	MDF et MAQ filtrées ou non filtrées
	Spéctre du module du signal à la puissance N après filtrage poussé en fréquence	MDF filtrée ou non filtrée
	Spéctre du module du signal à la puissance N ($N = 1/h$, h : indice de modulation)	MPC filtrée ou non filtrée
Fréquence de porteuse Fréquences de sous-porteuses	Densité spectrale de puissance	Toutes les modulations
	Histogramme de fréquence, F_i	MDF
	Moyenne de fréquence, F_i	MDF
	Spéctre à la puissance N (= 2 (MDP), 4 (MAQ) ou $1/h$ pour la modulation de phase continue (MPC))	MDP, MAQ, MPC
Largeur de bande	Densité spectrale de puissance	Toutes les modulations
Espacement en fréquence dessous-porteuses	Densité spectrale de puissance	MDF, MRFOC
	Histogramme de fréquence, F_i	MDF, MRFOC

Ces méthodes doivent être associées avec des représentations convenables du signal après application de diverses transformées afin d'en extraire les diverses caractéristiques.

5.2 Caractérisation de la modulation du signal

Cette caractérisation peut effectivement être effectuée après la détermination de la fréquence porteuse et de la rapidité de modulation du signal en utilisant:

- un affichage de la synchronisation de symbole tel un diagramme en oeil et/ou un réseau de phase selon le type de modulation;
- une représentation polaire des modulations linéaires (validation de la synchronisation, détermination des points de la constellation et des transitions entre symboles);
- une représentation sous forme d'histogrammes pour les modulations de phase ou de fréquence (validation de la synchronisation, détermination du nombre de sous-porteuses).

Selon le type de modulation, il est recommandé d'utiliser les méthodes indiquées au Tableau 2.

TABLEAU 2

Tableau récapitulatif des principales méthodes à marqueur pour caractériser la modulation d'un signal numérique

Paramètres à estimer	Marqueur/processus de mesure	Modulations concernées
Nombre d'états	Ecran polaire à l'instant de décision après égalisation ou filtre adapté	MDP, MDP-4, $\pi/2$ MDP-2D, $\pi/4$ MDP-4D, MAQ
	Histogramme de A_i	OOK, modulation par déplacement d'amplitude (MDA), MAQ
	Histogramme de fréquence, F_i	MDF
	Histogramme de phase, Φ_i	MDP
	Densité spectrale de puissance	MRFO, MRFOC, multiplexage
Nombre de sous-porteuses ou de tonalités	Densité spectrale de puissance	Toutes les modulations
	Histogramme de fréquence, F_i	MDF
Espacement de fréquence entre sous-porteuses (entre le déplacement pour la MDF)	Densité spectrale de puissance	MDF, MRFOC
	Histogramme de fréquence, F_i	MDF, MRFOC
Synchronisation des symboles	Diagramme en oeil I/Q , A_i/F_i + diagramme polaire	MDP et MAQ filtrée ou non
	Diagramme en oeil A_i/F_i + histogramme de fréquence, F_i	MDF filtrée ou non filtrée
	Réseau de phase + histogramme de fréquence, F_i et phase, Φ_i	MPC filtrée ou non filtrée

5.3 Identification technique d'un signal numérique par association de mesures et de méthodes de démodulation

Après avoir extrait les caractéristiques du signal, il est recommandé de valider cette opération par démodulation et analyse de convergence.

A cette fin, il est préconisé d'utiliser un appareil équipé d'un grand nombre de démodulateurs, disposant d'un grand nombre d'algorithmes d'égalisation des canaux, et de courbes permettant une analyse de la convergence du processus de démodulation.

- Dans le cas de modulations linéaires, il est recommandé d'utiliser une représentation du flux de symboles démodulé, du vecteur d'erreur correspondant, des points de la constellation (points théoriques) et des positions du signal complexe à l'instant de décision sur une représentation polaire, qui permet une analyse de convergence, des transitions entre symboles et éventuellement des systèmes de codage.
 - Dans le cas de modulations non linéaires, il est recommandé d'utiliser une représentation par histogramme des états de la fréquence ou de la phase théorique et des états de fréquence ou de phase du signal à l'instant de décision, pour l'analyse de la convergence du processus de démodulation.
-