

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R SM.1600-1
(09/2012)

**Identification technique des signaux
numériques**

Série SM
Gestion du spectre



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

| Séries | Titre |
|------------|--|
| BO | Diffusion par satellite |
| BR | Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision |
| BS | Service de radiodiffusion sonore |
| BT | Service de radiodiffusion télévisuelle |
| F | Service fixe |
| M | Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés |
| P | Propagation des ondes radioélectriques |
| RA | Radio astronomie |
| RS | Systèmes de télédétection |
| S | Service fixe par satellite |
| SA | Applications spatiales et météorologie |
| SF | Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe |
| SM | Gestion du spectre |
| SNG | Reportage d'actualités par satellite |
| TF | Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires |
| V | Vocabulaire et sujets associés |

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2013

© UIT 2013

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R SM.1600-1

Identification technique des signaux numériques

(2002-2012)

Domaine d'application

La présente Recommandation décrit le processus, les méthodes et les outils d'identification technique des signaux numériques. Elle compare différentes méthodes et différents outils et présente l'application recommandée pour différents cas d'utilisation. Les algorithmes et les caractéristiques de conception des matériels et des outils logiciels ne sont pas expliqués en détail.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'utilisation des fréquences radioélectriques ne cesse de croître;
- b) que l'utilisation de signaux numériques est très répandue;
- c) qu'un nombre croissant de dispositifs peuvent être utilisés sans licence ou homologation, de sorte qu'il est difficile pour une administration d'identifier la source d'une émission;
- d) qu'il est de plus en plus fréquent que plusieurs technologies de radiocommunication utilisent en partage les mêmes fréquences;
- e) qu'il est souvent difficile de donner suite aux plaintes pour brouillage concernant des émissions numériques;
- f) que l'identification technique est souvent une condition préalable essentielle pour pouvoir effectuer des mesures sur les signaux numériques à forme d'onde complexe qui sont utilisés dans de nombreux systèmes de communications numériques;
- g) que l'on dispose de bases de données de signaux permettant d'associer les signaux numériques modernes à leurs paramètres externes et internes respectifs;
- h) qu'il existe de nouveaux outils et de nouvelles techniques d'analyse et d'identification, qui permettent de parvenir à la reconnaissance de la nature d'un signal inconnu ou à l'identification complète des signaux numériques modernes standard,

recommande

- 1 d'identifier les signaux numériques en procédant dans l'ordre suivant:
 - identification générale fondée sur les caractéristiques externes du signal;
 - identification fondée sur les caractéristiques internes du signal (type de modulation et autres paramètres internes de forme d'onde) lorsque l'on dispose à l'avance de peu d'informations sur le signal;
 - identification fondée sur la corrélation avec des caractéristiques connues de forme d'onde lorsque l'on dispose à l'avance de beaucoup d'informations sur le signal;
 - identification confirmée par la démodulation du signal, son décodage et sa comparaison avec des caractéristiques connues de forme d'onde,
- 2 de suivre le processus décrit dans l'Annexe 1.

Annexe 1

Introduction

La présente Annexe décrit les étapes destinées à être utilisées soit de manière isolée soit successivement pour identifier un signal numérique particulier. Elle vise à fournir des conseils fondamentaux, pratiques et logiques concernant le traitement des signaux numériques modernes standards. Elle traite de l'utilisation des paramètres externes d'un signal, donne des conseils sur l'analyse des paramètres internes des signaux pour déterminer plus précisément la catégorie du signal, et décrit l'utilisation d'outils logiciels et de techniques pour identifier sans ambiguïté un signal numérique moderne standard.

Certains analyseurs de spectre modernes peuvent caractériser les signaux, mais un grand nombre ne sont pas capables de conserver et de fournir les données de signal en phase et en quadrature (I/Q) qui sont utiles pour une analyse plus approfondie des caractéristiques internes du signal. La présente Annexe porte essentiellement sur les analyseurs vectoriels de signal et les récepteurs de contrôle, mais des analyseurs de spectre capables d'analyser le signal peuvent aussi être utilisés dans certains cas.

Définitions

Signaux numériques modernes standards: ces signaux utilisent généralement les méthodes de modulation et formats d'accès multiple suivants:

- modulation par déplacement d'amplitude, de phase ou de fréquence (ASK, PSK, FSK) y compris la modulation par déplacement minimal (MSK);
- modulation d'amplitude en quadrature (QAM);
- multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM);
- accès multiple par répartition dans le temps (TDMA);
- accès multiple par répartition en code (CDMA);
- accès multiple/multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (avec codage) (C)OFDM(A);
- accès multiple par répartition en fréquence à porteuse unique (SC-FDMA);
- égalisation dans le domaine fréquentiel à porteuse unique (SC-FDE).

Systèmes et logiciels d'identification du signal: il s'agit d'une catégorie de systèmes et de logiciels qui permettent d'identifier sans ambiguïté un signal numérique moderne en corrélant la forme d'onde du signal avec une bibliothèque de séquences connues comme un préambule, un mi-ambule, un intervalle de garde, un mot de synchronisation, des tonalités de synchronisation, des séquences de conditionnement, des symboles et des codes pilotes, des codes d'embrouillage, et en corrélant le signal démodulé ou décodé avec une bibliothèque de séquences connues comme des données de signalisation dans les canaux de radiodiffusion.

Données de signal I/Q: I/Q désigne les données de signal en phase et en quadrature. Les données I/Q résultant de l'échantillonnage d'un signal permettent de conserver toutes les informations d'amplitude, de fréquence et de phase contenues dans le signal. Ces données permettent d'analyser avec précision le signal ou de le démoduler de différentes manières, et sont couramment utilisées pour analyser en détail un signal.

Logiciels de reconnaissance de la modulation: ce sont des logiciels qui, à partir des données I/Q brutes ou des enregistrements audio démodulés, estiment les caractéristiques suivantes du signal:

- fréquence centrale et espacements des porteuses en fréquence;
- largeur de bande du signal;

- durée du signal et durée entre deux impulsions (dans le cas d'un signal à impulsions);
- catégorie de modulation: à porteuse unique ou multiporteuse, linéaire ou non linéaire;
- format de modulation;
- rapidité de modulation;
- rapport signal sur bruit (SNR)¹;
- séquences propres au signal (comme les tonalités pilotes/de synchronisation, les intervalles de garde, structure de trame).

Analyseurs vectoriels de signal (VSA) et logiciels VSA: les instruments VSA associent la technologie super-hétérodyne ou un matériel de conversion directe avec des convertisseurs analogique-numérique (ADC) et des processeurs de signaux numériques (DSP) à haut débit, des dispositifs d'accès programmables par champ (FPGA) ou des processeurs programmables généraux (GPP) intégrés pour effectuer rapidement des mesures de spectre à haute résolution, la démodulation, et une analyse évoluée dans le domaine temporel et dans les domaines spectral et temporel. Les analyseurs VSA sont particulièrement utiles pour caractériser des signaux complexes comme les signaux par salves, transitoires ou à modulation numérique utilisés dans les systèmes de communications, vidéo et de radiodiffusion. Ils permettent aux utilisateurs de collecter les données I/Q brutes sur des signaux particuliers, de reconnaître la modulation et d'identifier les signaux, comme défini ci-dessus. Les logiciels VSA ne contrôlent pas nécessairement un récepteur physique. En revanche, ils permettent toujours aux utilisateurs d'analyser les données I/Q brutes obtenues à partir d'un récepteur ou de fichiers.

Récepteur de contrôle: un récepteur de contrôle choisit un signal radioélectrique parmi tous les signaux interceptés par l'antenne à laquelle il est raccordé, et reproduit en sortie les informations transmises par ce signal, tout en donnant accès à la mesure des caractéristiques détaillées du signal. Pour ce faire, il existe deux possibilités:

- le récepteur accède à des étapes intermédiaires dans la chaîne du signal, ou
- dans les récepteurs les plus modernes, les caractéristiques complètes d'amplitude et de phase sont enregistrées ou fournies en sortie (en général il est procédé à un échantillonnage et à une sauvegarde des données I/Q).

Amplitude du vecteur d'erreur (EVM): le vecteur d'erreur est le vecteur de différence à un instant donné entre le signal de référence idéal et le signal mesuré. En d'autres termes, il s'agit du bruit résiduel et de la distorsion qui restent après avoir retiré une version idéale du signal. L'amplitude EVM est la valeur quadratique moyenne du vecteur d'erreur dans le temps aux instants des transitions d'horloge pour les symboles (ou les éléments).

Etapes à suivre pour identifier un signal numérique

1 Evaluation des caractéristiques externes du signal

Pour identifier un signal numérique, on commence par utiliser l'approche la plus simple, qui consiste à comparer les paramètres «externes» du signal au plan de fréquences et à la base de données du régulateur relative aux signaux autorisés. Les paramètres externes d'un signal sont les suivants:

- fréquence centrale et espacement des porteuses en fréquence;
- largeur de bande du signal;

¹ Ce n'est pas un paramètre de modulation courant, mais il est souvent fourni par les logiciels de reconnaissance de modulation.

- forme spectrale;
- durée du signal (dans le cas d'un signal à impulsions ou intermittent);
- décalage de fréquence.

L'inspection visuelle du signal numérique considéré et sa comparaison à la base de données du régulateur relative aux signaux autorisés constituent un bon point de départ pour l'identification du signal. Si celui-ci correspond à tous les paramètres externes, il y a de fortes chances qu'une identification correcte puisse être faite sans analyse supplémentaire.

Un exemple de tableau d'attribution des bandes de fréquences est présenté ci-dessous (Tableau 1). Le tableau contient une description générale des services autorisés à utiliser la bande, les paramètres opérationnels, les largeurs de bande et la disposition des canaux, tous pouvant servir de base pour la comparaison des paramètres externes du signal et être utilisés pour effectuer une première évaluation de l'identité du signal.

TABLEAU 1

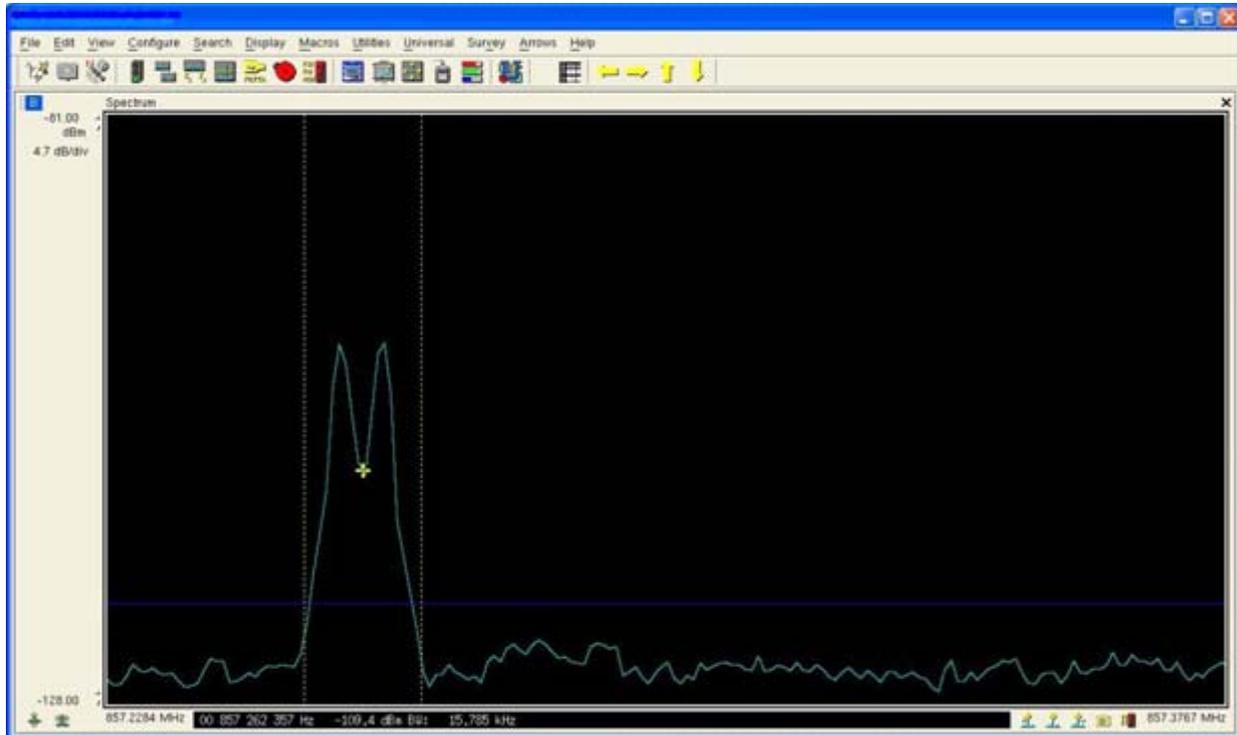
Exemple de tableau d'attribution des bandes de fréquences

| Tableau d'attribution des bandes de fréquences | | | 698-941MHz (UHF) | | Page 29 |
|---|--|---------------------------|------------------------|--|--|
| Tableau international | | | Tableau des Etats-Unis | | Partie(s) des règles de la FCC |
| Région 1 | Région 2 | Région 3 | Tableau fédéral | Tableau non fédéral | |
| (voir la page précédente) | 698-806 FIXE MOBILE 5.313B 5.317A RADIODIFFUSION | (voir la page précédente) | 698-763 | 698-763 FIXE MOBILE RADIODIFFUSION NG159 | Communications sans fil (27) TV faible puissance et traducteur TV (74G) |
| | | | 763-775 | 763-775 FIXE MOBILE NG158 NG159 | Communications mobiles terrestres pour la sécurité du public (90R) |
| | | | 775-793 | 775-793 FIXE MOBILE RADIODIFFUSION NG159 | Communications sans fil (27) TV faible puissance et traducteur TV (74G) |
| 790-862 FIXE MOBILE sauf mobile aéronautique 5.316B 5.317A RADIODIFFUSION | 5.293 5.309 5.311A | | 793-805 | 793-805 FIXE MOBILE NG158 NG159 | Communications mobiles terrestres pour la sécurité du public (90R) |
| | | | 805-806 | 805-806 FIXE MOBILE RADIODIFFUSION NG159 | Communications sans fil (27) TV faible puissance et traducteur TV (74G) |

A l'aide d'un analyseur de spectre, d'un analyseur vectoriel de signal ou d'un récepteur de contrôle, le régulateur peut déterminer la fréquence centrale du signal, l'espacement en fréquence des porteuses adjacentes et la largeur de bande du signal. Il convient de consulter le plan de fréquences pour vérifier si le signal est centré sur l'un des canaux attribués. Il convient également de vérifier si la largeur de bande du signal est conforme aux normes relatives à la disposition des canaux pour la bande de fréquences concernée. La Fig. 1 illustre comment des marqueurs peuvent être utilisés sur

un écran pour déterminer la fréquence centrale, la largeur de bande du signal et la puissance mesurée à l'entrée du récepteur.

FIGURE 1
Exemple d'affichage spectral avec des marqueurs



SM.1600-01

Le Tableau 2 décrit un ensemble complet de méthodes d'analyse que le régulateur peut employer pour détecter les signaux et estimer leurs paramètres externes. De nombreux progiciels d'analyse de signal peuvent effectuer des opérations mathématiques sur des données temporelles ou spectrales ou sur une série de données spectrales. Ces progiciels peuvent être utilisés pour effectuer ce type d'estimation.

TABLEAU 2

Méthodes manuelles de détection des signaux et d'extraction des paramètres externes

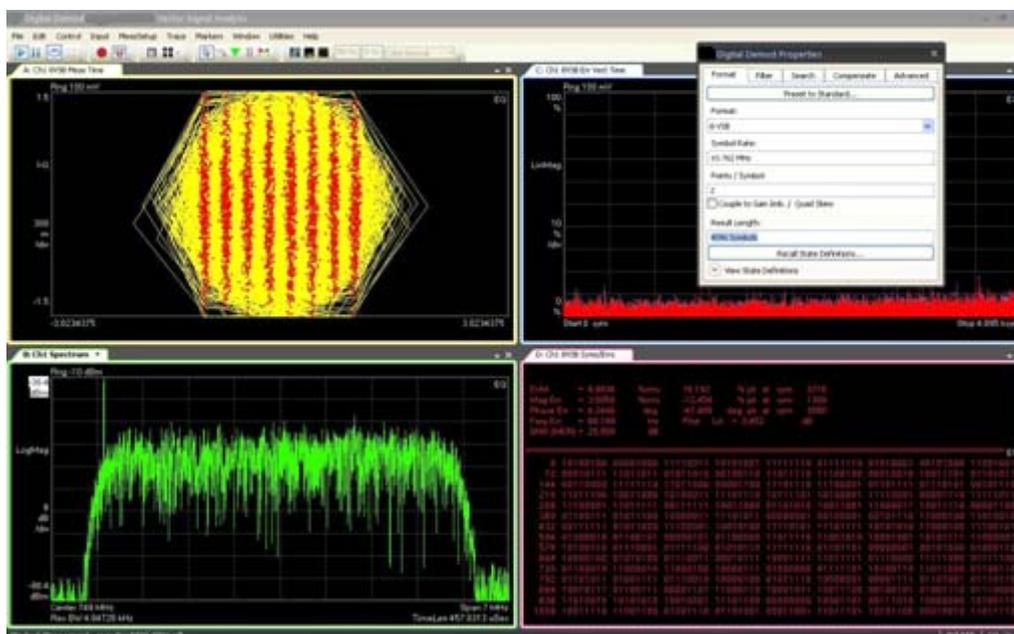
| Paramètres à mesurer | Outils d'analyse | Type de modulation | Environnement radioélectrique |
|---|---|---|---|
| Présence d'un signal de radiocommunication | Corrélation croisée du signal I-Q ou de l'amplitude instantanée A_i avec le signal de référence | Tout type de modulation, mais en particulier pour les signaux TDMA, CDMA et DSSS connus | N'importe quel environnement |
| | Densité spectrale de puissance | Tout type de modulation | SNR moyen à élevé |
| | Autocorrélation et autocorrélation cyclique | OFDM, SC-FDMA, SC-FDE | N'importe quel environnement |
| | Analyse de corrélation spectrale | Signaux faibles et DSSS inconnus | N'importe quel environnement |
| PRF ou longueur de salve | Analyse de l'amplitude du signal en fonction du temps | OOK, radar, IFF, autre signal par salves | SNR moyen à élevé |
| Fréquence de la porteuse Fréquences des sous-porteuses | Densité spectrale de puissance | Tout type de modulation | SNR moyen à élevé |
| | Histogramme de la fréquence instantanée, F_i | FSK | SNR moyen à élevé |
| | Moyenne de la fréquence instantanée, F_i | FSK | SNR moyen à élevé |
| | Spectre du signal I-Q à la puissance N (=M(MPSK), 4 (QAM) ou 1/h pour CPM) | PSK, QAM, CPM | SNR positif |
| | Analyse de corrélation spectrale | N'importe quelle modulation linéaire, et en particulier ASK, BPSK, QPSK | N'importe quel environnement |
| | Spectre du module de signal à la puissance 2 ou 4 avec un filtrage sévère | Pi/2DBPSK, pi/4DQPSK, SQPSK | SNR positif N'importe quel environnement |
| Largeur de bande d'émission et disposition des canaux | Densité spectrale de puissance comparée à un gabarit ou à une courbe limite | Tout type de modulation | SNR moyen à élevé |
| Espacement des sous-porteuses en fréquence (décalage pour FSK) | Densité spectrale de puissance. Recherche d'harmoniques et/ou marqueurs d'harmoniques | FSK, OFDM, COFDM | SNR moyen à élevé |
| | Histogramme de la fréquence instantanée, F_i | FSK | SNR moyen à élevé |

Forme spectrale: une autre méthode d'identification du signal utilisant les caractéristiques externes du signal consiste à évaluer la forme spectrale ou la signature. La plupart des programmes logiciels VSA ont une bibliothèque de présentation de signaux numériques modernes standards. Ces présentations permettent au régulateur de visualiser les paramètres externes (et dans certains cas les paramètres internes) du signal, en particulier la forme spectrale, la durée, etc.

Certaines émissions ont une caractéristique propre au type d'émission, par exemple une tonalité pilote. Certaines émissions de télévision numérique haute définition ont un signal pilote situé du côté basse fréquence du signal. L'affichage illustré sur la Fig. 2 représente une émission de télévision (Etats-Unis, canal 60, 749 MHz) utilisant le système ATSC. On remarquera, dans la fenêtre en bas à gauche, la forme particulière du spectre en présence du signal pilote. Cette forme, associée à la fréquence centrale et à la largeur de bande, constitue une bonne indication du type d'émission.

FIGURE 2

Affichage VSA illustrant une forme spectrale unique



SM.1600-02

Si des données supplémentaires sur le signal sont nécessaires pour pouvoir l'identifier sans ambiguïté, il faut alors examiner les paramètres internes du signal.

2 Evaluation des caractéristiques internes du signal

Après l'évaluation des paramètres externes du signal comme décrit au § 1, l'étape suivante de l'identification du signal numérique consiste à analyser les caractéristiques dans le domaine temporel (ou internes) du signal considéré. Un analyseur VSA ou un récepteur de contrôle (ou un analyseur de spectre adapté) capable d'enregistrer les données I/Q est nécessaire. Les paramètres internes d'un signal sont les suivants:

- format de modulation (à savoir QPSK, QAM, GMSK, FSK, PSK);
- rapidité de modulation, exprimée en bauds.

a) *Enregistrement des données I/Q:*

- Détermination de la fréquence centrale: il convient de centrer l'analyseur VSA ou le récepteur de contrôle sur la fréquence sur laquelle on sait que le signal est présent.
- Détermination de la largeur de bande: la largeur de bande d'acquisition doit être suffisamment grande pour inclure la totalité du signal – mais pas trop grande pour ne pas couvrir un canal adjacent. Les résultats affichés par l'analyseur VSA ou le récepteur de contrôle peuvent être utilisés pour mesurer la fréquence centrale et la largeur de bande du signal. Sur les analyseurs VSA et les récepteurs de contrôle modernes, les largeurs de bande d'acquisition sont comprises entre 1 kHz et 160 MHz.

Pour les signaux à bande étroite, l'opérateur doit utiliser une valeur appropriée pour la largeur de bande B, à savoir:

B = 100 Hz à 4 kHz (émissions dans une largeur de bande télégraphique ou téléphonique)

B = 15 à 45 kHz (émissions dans une largeur de bande moyenne)

Il convient d'utiliser les valeurs de largeur de bande de canal type (B) indiquées dans le Tableau 3 plus une marge adaptée (10 à 50%), tout en permettant de procéder à un post-traitement à l'aide d'algorithmes de filtrage numérique et de conditionnement du signal.

L'acquisition de signaux ayant une plus grande largeur de bande nécessite des convertisseurs ADC plus sophistiqués ou des oscilloscopes numériques dotés de processeurs du signal. Il est recommandé d'utiliser un système comportant:

- un récepteur analogique ou numérique dont on peut régler avec précision la fréquence centrale et ayant une grande plage dynamique et une commande de gain ajustable (entre 50 et 60 dB);
- des filtres, des convertisseurs en bande de base, des convertisseurs analogiques/numériques et un enregistreur présentant les caractéristiques suivantes:
 - une amplitude égale ou supérieure à 14 bits;
 - des fréquences d'échantillonnage générant plus de 4 échantillons pour chaque symbole de modulation numérique;
 - une capacité de stockage permettant d'enregistrer un signal d'une durée de quelques millisecondes pour les signaux à bande élargie et de quelques secondes pour les signaux à bande étroite.

Mis à part quelques exceptions², la plupart des signaux de communications numériques modernes ont une largeur de bande inférieure à 20 MHz.

² Par exemple, conformément aux normes de communication pour les réseaux WLAN (802.11ac et 802.11ad), les applications à courte distance nécessitent une largeur de bande comprise entre 160 MHz et plus de 2 GHz.

TABLEAU 3

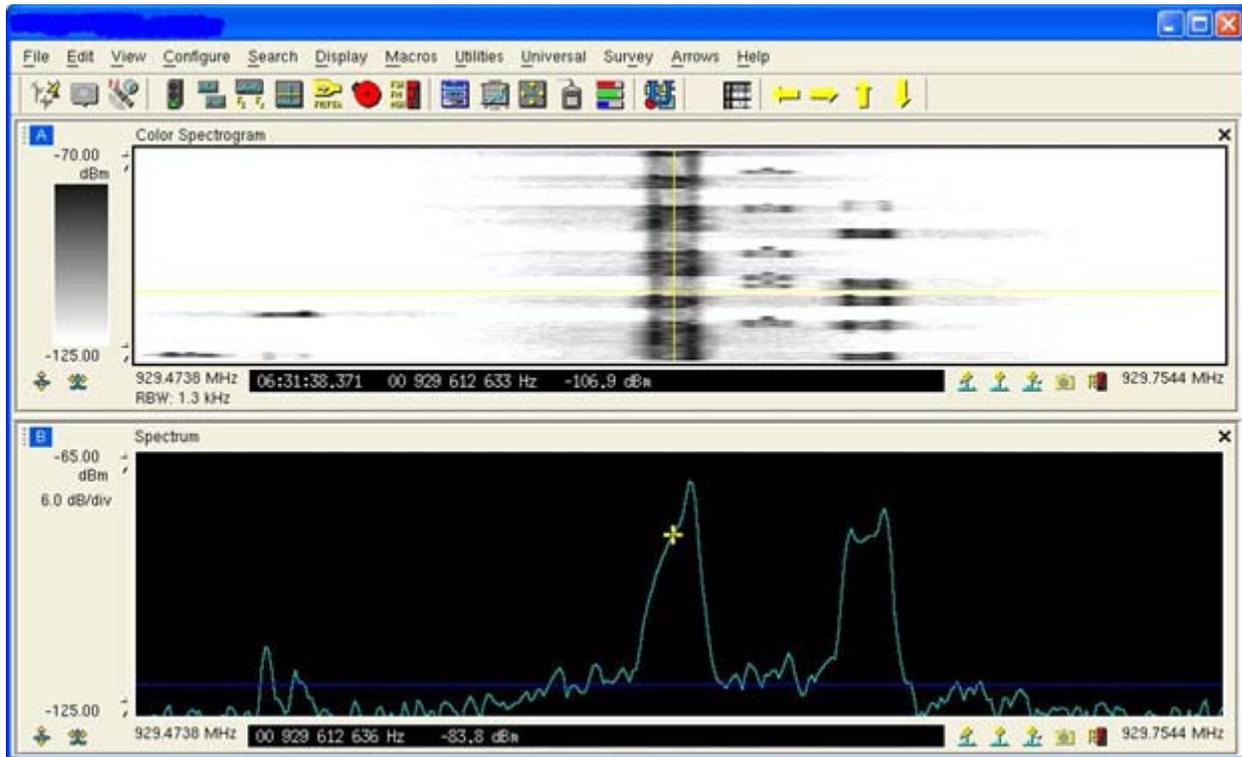
Exemple de largeur de bande de canal pour les signaux numériques courants

| Type de signaux | Largeur de bande de canal |
|-------------------------|--|
| GSM | 200 kHz |
| CDMA (IS-95) | 1,25 MHz |
| CDMA2000 | 1,25 MHz (regroupement de canaux, 1xEv-DO Rev. B, C) |
| 3GPP WCDMA | 5 MHz |
| 3GPP TD-CDMA | 5 MHz |
| 3GPP LTE | 1,4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz |
| WIMAX IEEE 802.16xxx | 3,5, 5, 7, 8,75, 10, 20 MHz |
| TETRA | 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 150 kHz |
| WLAN & WIFI | 22 MHz (IEEE 802.11b) 20 MHz (IEEE 802.11a, g) 20 MHz, 40 MHz (IEEE 802.11n) 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz (IEEE 802.11ac) |
| DECT | 1,728 MHz |
| ZigBee | 5 MHz |
| ATSC | 6 MHz |
| DVB-H | 5, 6, 7, 8 MHz |
| T-DMB | 1,536 MHz |

- Détermination de la durée de l'enregistrement: en général, on n'aura besoin que d'une courte durée d'enregistrement (moins d'une seconde) pour déterminer le format de modulation et la rapidité de modulation du signal. Les analyseurs VSA et les récepteurs de contrôle ont une mémoire fixe pour l'enregistrement du signal, si bien que la mémoire d'acquisition se remplira plus rapidement pour des signaux à bande élargie que pour des signaux à bande étroite. Si nécessaire, l'utilisateur pourra observer la durée du signal sur un analyseur VSA pour vérifier que la durée d'enregistrement est correcte et utiliser au mieux la mémoire d'acquisition.
- La durée d'un signal peut être observée sur un spectrogramme ou un affichage en cascade. Ce type d'affichage spectral montre les caractéristiques de fréquence, de puissance et de temps sur un même écran (voir les Fig. 3 et 4 ci-dessous). La puissance du signal est représentée par une nuance de couleur ou un niveau de gris selon l'échelle située à gauche de l'affichage. A mesure que le temps passe, l'affichage défile de bas en haut et le spectre au moment considéré s'affiche en dessous du spectrogramme.

FIGURE 3

Exemple de spectrogramme avec affichage du spectre

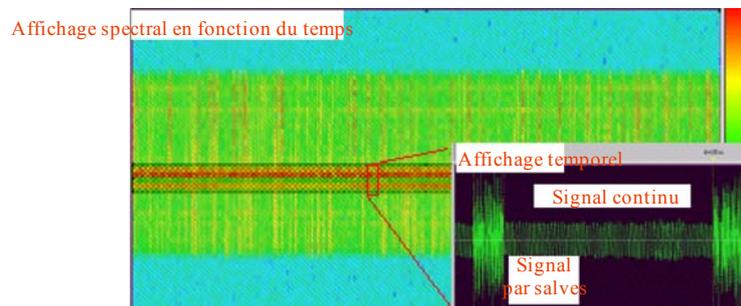


SM.1600-03

On peut utiliser un logiciel d'analyse vectorielle du signal pour créer un affichage spectral en fonction du temps qui aidera le régulateur à comprendre l'environnement du signal à la fréquence considérée et à déterminer la durée correcte à utiliser pour enregistrer les données I/Q. Il convient d'employer des techniques appropriées de séparation des signaux sur la même fréquence pour pouvoir analyser efficacement les caractéristiques internes des signaux.

FIGURE 4

Affichage spectral en fonction du temps (fréquence/amplitude sur l'axe des y et temps sur l'axe des x):



SM.1600-04

- Déclenchement de l'enregistrement: si le facteur d'utilisation du signal est faible, on peut utiliser un déclencheur en fonction de l'amplitude IF pour commencer l'enregistrement. Ce déclencheur, dont les analyseurs VSA et les récepteurs de contrôle sont dotés, permet à l'utilisateur de spécifier le niveau de puissance RF prédétectée reçue auquel l'enregistrement des données I/Q va commencer. Il est important de régler correctement le niveau de déclenchement et ce réglage nécessite d'avoir une certaine

connaissance du signal et du comportement de bruit à la fréquence considérée. Si le niveau est réglé à un niveau trop bas, l'enregistrement risque d'être déclenché par un pic de bruit présent à l'intérieur de la largeur de bande d'enregistrement. Si le niveau est réglé à un niveau trop haut, on risque de manquer le signal souhaité. Si le signal considéré est un signal par salves ou de très courte durée, il convient d'utiliser la mémoire du convertisseur ADC ou une mémoire à retard pour qu'en pratique, l'enregistrement commence avant le déclenchement et se termine après la fin du signal ou à l'issue d'une durée d'enregistrement adéquate.

- Vérification de la forme d'onde enregistrée: le logiciel VSA permet à l'utilisateur de visualiser immédiatement le signal enregistré et de vérifier que la fréquence centrale, la largeur de bande, la durée et le déclenchement utilisés sont corrects.

b) *Détermination de la catégorie du signal à l'aide d'un logiciel de reconnaissance de la modulation*

Une fois les données I/Q enregistrées, l'utilisateur peut «lire» le signal à l'aide d'un ensemble de divers progiciels afin de découvrir les caractéristiques internes du signal. Les analyseurs VSA et les récepteurs de contrôle de différents fabricants enregistrent les données I/Q brutes avec leur propre en-tête propriétaire qui contient des informations sur le signal comme la fréquence centrale, la largeur de bande de l'enregistrement, la fréquence d'échantillonnage, les date et heure, etc. La structure des données, qui est généralement publiée dans les manuels techniques, peut être utile lors de la configuration du logiciel d'identification du signal ou de reconnaissance de la modulation.

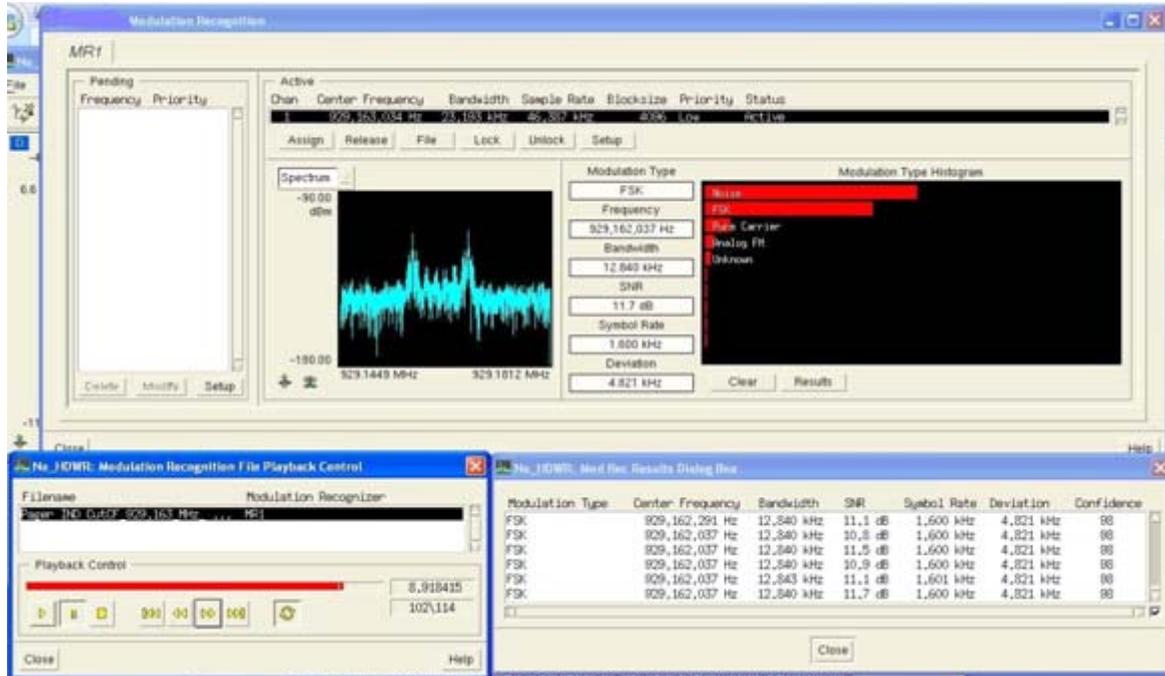
Pour pouvoir déterminer la catégorie de modulation, le logiciel doit être configuré pour traiter correctement l'enregistrement. Les paramètres du logiciel à ajuster sont les suivants:

- fréquence centrale;
- fréquence d'échantillonnage ou largeur de bande du signal;
- filtrage du canal adjacent;
- détection de salves;
- taille de bloc: elle détermine la quantité de données I/Q qui seront analysées pour obtenir le type de modulation. Par exemple, si l'échantillon I/Q est de 16 kilo-octets et que la taille de bloc est fixée à 2 kilo-octets, le logiciel de reconnaissance de la modulation estimera le type de modulation et la rapidité de modulation 8 (huit) fois entre le début et la fin du fichier. Si le signal n'est présent que dans une petite partie du fichier, il est possible que seulement une ou deux des mesures contiennent des informations utiles.

Sur la Fig. 5, la lecture dans un progiciel de reconnaissance de la modulation de données I/Q enregistrées fait apparaître qu'il s'agit d'une modulation non linéaire FSK. La taille de bloc utilisée pour chaque mesure est de 4 k (ou 4 096) et ces données I/Q enregistrées correspondent au total à 114 blocs (comme on peut le voir dans la fenêtre en bas à gauche). Une mémoire à retard a été utilisée afin de faire commencer l'enregistrement avant le déclenchement du signal. Les 61 premières mesures ont alors été classées comme étant soit du bruit soit une porteuse pure. Le processus a été interrompu au moment de la première apparition du signal, qui a été classé comme étant un signal FSK à 1 600 bauds comme indiqué.

FIGURE 5

Exemple de logiciel de reconnaissance de la modulation



SM.1600-05

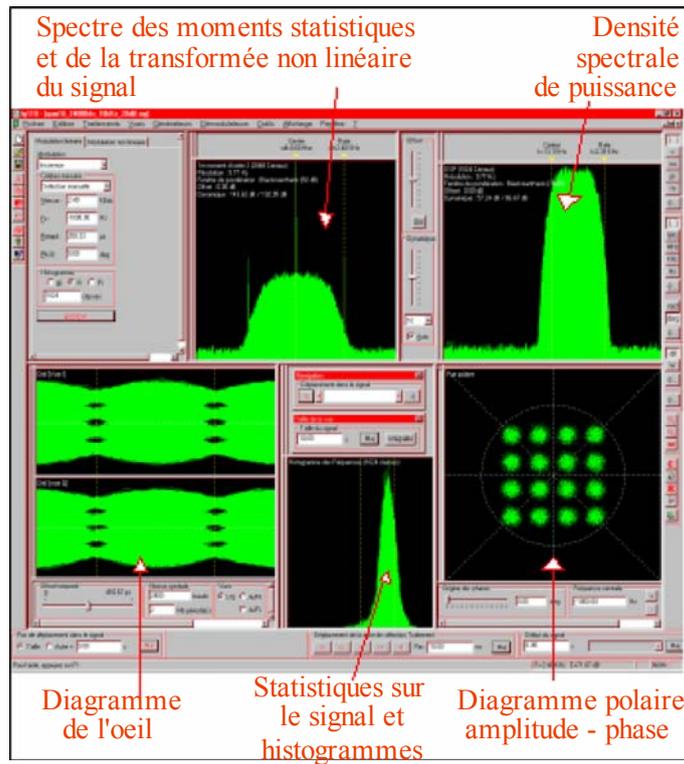
Après le traitement d'une majorité des données I/Q enregistrées, le pourcentage de résultats de mesure FSK avec une rapidité de modulation de 1 600 a nettement augmenté, comme le montre l'histogramme des résultats de modulation (bâtons rouges) représenté dans la fenêtre en haut à droite. On constate en outre que 102 blocs de données ont été traités.

A la fin du traitement, les 114 blocs de données ont été traités et le signal n'est plus visible dans la fenêtre d'affichage. Le résultat de mesure correspond de nouveau à du bruit mais on dispose de suffisamment d'informations pour conclure qu'il s'agit d'un signal FSK à 1 600 bauds avec une excursion de 4,821 kHz et un rapport signal/bruit d'environ 11 dB. Pour le traitement de ce fichier, on a utilisé un bloc à la fois et on est passé manuellement d'un bloc à l'autre. Cette technique permet d'avoir le maximum de contrôle sur le processus d'analyse.

La Fig. 6 illustre un autre exemple de traitement utilisé pour estimer les paramètres de modulation sur un signal à modulation linéaire (16 QAM). Les résultats de ce traitement sont un spectre des moments statistiques et de la transformée non linéaire du signal en haut à gauche et la densité spectrale de puissance en haut à droite. Ce type de logiciel est très utile pour la détermination des paramètres internes du signal; cette étape est utile en vue de la démodulation des paramètres.

FIGURE 6

Exemple de traitement du signal pour l'estimation des paramètres de modulation



SM.1600-06

La Fig. 7 illustre les estimateurs statistiques appliqués aux signaux numériques à porteuse unique tels que PMR, GSM et UMTS qui peuvent être utilisés pour mesurer les paramètres internes d'un signal.

FIGURE 7

Utilisation d'estimateurs statistiques pour l'estimation des paramètres de modulation

| Objet | Mesure de la puissance et de la largeur de bande | Estimation de la fréquence centrale | Estimation de la rapidité de modulation | | Synchronisation des symboles et démodulation | |
|---|--|-------------------------------------|---|--------------------------------|--|--|
| | Estimateur statistique | Spectre | Spectre | Spectre | Diagramme de l'oeil et histogrammes | Diagramme de l'oeil et diagramme polaire |
| Exemple de signal | Densité de puissance | 1er moment ordre 2 $E(x ^2)$ | 2ème moment ordre 2 $E(x ^2)$ | 2ème moment ordre 4 $E(x ^4)$ | I/Q, amplitude phase fréquence | |
| FSK2 Ind. 1 SNR 20 dB de type "PMR" | | | | | | |
| GMSK Ind. 0.5 SNR 20 dB de type "PMR" | | | | | | |
| O-QPSK Décroissance 0.25 SNR 20 dB de type "CDMA 2 000 UL" | | | | | | |
| QPSK Décroissance 0.25 SNR 20 dB de type "UMTS" | | | | | | |

SM.1600-07

Le Tableau 4 donne des indications supplémentaires sur les méthodes d'extraction des paramètres internes du signal au moyen d'opérations mathématiques lorsqu'aucun logiciel d'analyse du signal n'est disponible sur le marché ou lorsque ceux qui sont disponibles ne sont pas adaptés au traitement du signal considéré.

TABLEAU 4

Méthodes manuelles d'extraction des paramètres internes du signal

| Paramètres à mesurer | Outils d'analyse | Type de modulation | Type d'environnement radioélectrique |
|---|---|---|--|
| Rapidité de modulation dans le cas d'une modulation asynchrone ou synchrone | Spectre d'amplitude instantanée, A_i | PSK (avec ou sans filtrage) CPM sans filtrage ou après un filtrage sévère QAM (avec ou sans filtrage) | SNR moyen à élevé |
| | Spectre de fréquence instantanée, F_i à la puissance N ($N = 2$ (2FSK), 4 (4FSK)) | FSK (sans filtrage) | Idéal uniquement: SNR élevé. Pas de trajets multiples. |
| | Spectre de franchissement du zéro pour la fréquence instantanée, F_i | FSK (avec ou sans filtrage) PSK, QAM, MSK | Idéal uniquement: SNR élevé. Pas de trajets multiples. |
| | Spectre de module du signal à la puissance N (=2 ou 4 ou ...) après un filtrage sévère en fréquence | PSK, QAM (avec ou sans filtrage) FSK (avec ou sans filtrage) | SNR positif |
| | Spectre du signal à la puissance N ($N = 1/h$) | CPM (avec ou sans filtrage) | SNR positif |
| | Spectre du signal à la puissance N | $\pi/2$ DBPSK, $\pi/4$ DQPSK, SQPSK | SNR positif |
| | Autocorrélation et autocorrélation cyclique | OFDM, SC-FDMA, SC-FDE | N'importe quel environnement |
| | Analyse de corrélation spectrale | PSK, QAM, ASK, SQPSK, $\pi/2$ DBPSK, $\pi/4$ DQPSK | N'importe quel environnement |
| | Spectre de la transformée par ondelettes de Haar | FSK | N'importe quel environnement, en particulier canaux complexes avec trajets multiples |

TABLEAU 4 (*fin*)

| Paramètres à mesurer | Outils d'analyse | Type de modulation | Type d'environnement radioélectrique |
|--|--|--|--|
| Nombre d'états (type de modulation) | Diagramme de constellation/diagramme vectoriel en association avec une égalisation à l'aveugle (algorithme à module constant (CMA), Beneviste Goursat) | N'importe quelle modulation linéaire, principalement PSK, QAM, ASK | SNR moyen à élevé Canaux complexes avec trajets multiples |
| | Spectre à la puissance N ($N=2$, SQPSK et $\pi/2$ DBPSK; $N=4$, $\pi/4$ DQPSK) | SQPSK, $\pi/2$ DBPSK, $\pi/4$ DQPSK, | SNR positif |
| | Densité spectrale de puissance à haute résolution | OFDM, COFDM, multiplexage | SNR moyen à élevé |
| | Histogramme de fréquence instantanée, F_i | FSK | SNR moyen à élevé |
| Nombre de sous-porteuses ou de tonalités | Densité spectrale de puissance | N'importe quelle modulation | SNR moyen à élevé |
| | Histogramme de fréquence instantanée, F_i | FSK | SNR moyen à élevé |
| Synchronisation des symboles | Diagramme de l'œil I/Q, A_i F_i Φ_i diagramme vectoriel | PSK et QAM avec ou sans filtrage | SNR moyen à élevé |
| | Diagramme de l'œil A_i F_i Φ_i affichage de l'histogramme de fréquence, F_i | FSK avec ou sans filtrage | SNR moyen à élevé |
| | Diagramme de constellation, affichage de l'histogramme de fréquence, F_i et de phase, Φ_i | CPM avec ou sans filtrage | SNR moyen à élevé |
| | Autocorrélation cyclique | OFDM, SC-FDMA, SC-FDE | N'importe quel environnement |
| | Corrélation croisée avec des signaux connus | TDMA, CDMA Plusieurs OFDM et SC-FDMA et SC-FDE | N'importe quel environnement |

Ces méthodes doivent être associées à des représentations convenables du signal après les diverses transformations appliquées afin d'en extraire les diverses caractéristiques et de les valider.

3 Utilisation de logiciels d'analyse du signal pour obtenir des données supplémentaires

Les deux premières étapes ont permis d'obtenir les caractéristiques de base du signal considéré:

- fréquence centrale;
- largeur de bande du signal;
- rapport signal/bruit;
- durée;
- format de modulation;
- rapidité de modulation.

En général, ces informations permettent d'identifier sans ambiguïté le type de signal grâce à une comparaison avec les tableaux d'attribution des bandes de fréquences publiés et les spécifications techniques des systèmes de communication utilisés dans la zone considérée. Si l'on a besoin de données supplémentaires sur le signal considéré, il pourra être nécessaire de procéder à une analyse approfondie ou au décodage du signal.

Les logiciels d'analyse vectorielle du signal permettent de décoder la plupart des formats modernes de communication numérique. Les algorithmes de démodulation et de décodage n'ont pas pour objet de traiter les données I/Q enregistrées pour remonter au contenu d'origine, mais de mesurer la qualité du signal par rapport à un modèle idéal. Ils fournissent des données supplémentaires permettant de déterminer si les données I/Q enregistrées ont été correctement identifiées.

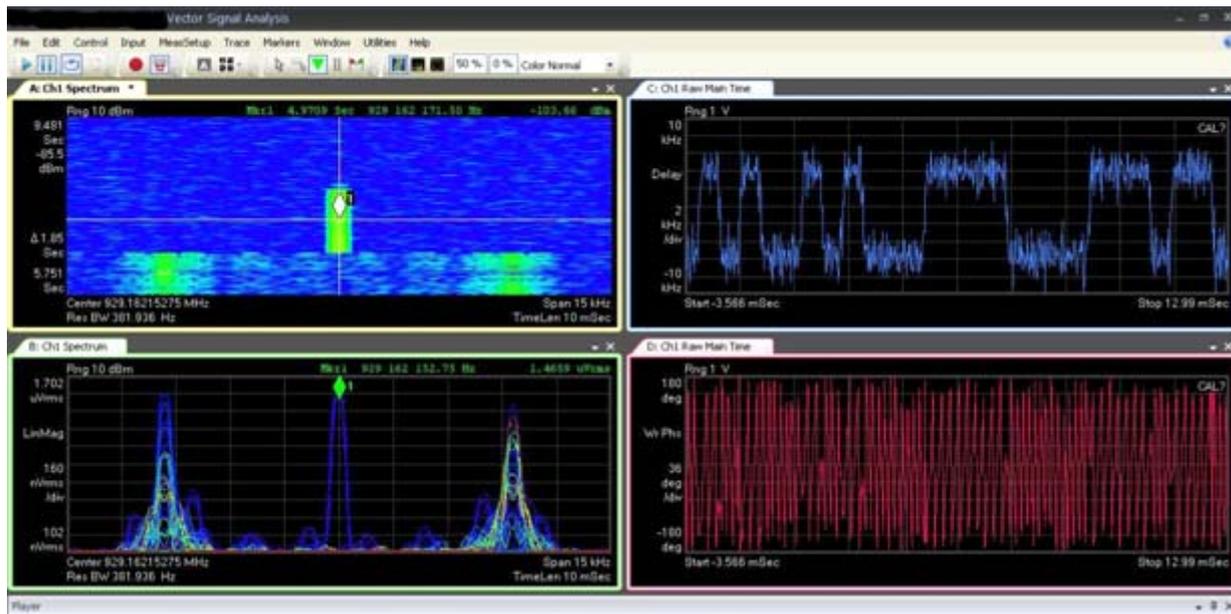
Pour pouvoir identifier sans ambiguïté une émission particulière, un progiciel de décodage du signal ou des techniques d'intercorrélation, d'autocorrélation ou de corrélation croisée seront nécessaires. On trouve sur le marché des progiciels de décodage, qui sont utiles pour certains formats modernes de communication mais pas pour tous.

a) *Visualisation, à l'aide de logiciels VSA, des données I/Q enregistrées*

Les logiciels VSA offrent à l'utilisateur différentes vues analytiques du signal. La Fig. 8 montre l'affichage obtenu à l'aide d'un logiciel VSA pour le signal utilisé ci-dessus. La fenêtre en haut à gauche est un spectrogramme, qui permet de voir le démarrage du signal, ainsi que la porteuse et la première partie du signal modulé. La fenêtre en bas à gauche montre le spectre avec persistance numérique, ce qui permet à l'utilisateur d'observer les caractéristiques de courte durée dans le contexte des aspects plus persistants d'une émission. La fenêtre en haut à droite montre le temps de propagation de groupe ou la fréquence en fonction du temps. Etant donné qu'il s'agit d'un signal à modulation par déplacement de fréquence, on peut observer les différents symboles émis. La fenêtre en bas à droite montre la phase en fonction du temps, qui est particulièrement utile si le signal considéré est modulé en phase.

FIGURE 8

Logiciel VSA – Sélection de fenêtres d'analyse du signal



SM.1600-08

Le lecteur notera que ce signal a été reçu à un niveau de puissance très faible. La porteuse a été mesurée à un niveau de $-103,7$ dBm à l'entrée du récepteur, d'où la présence d'un bruit important sur l'affichage en haut à droite (qui montre la forme d'onde FM). Etant donné que les logiciels VSA fonctionnent à partir des données I/Q enregistrées, il est possible d'effectuer des mesures sur la base des informations de puissance, de fréquence et de phase du signal.

b) *Confirmation de la reconnaissance et de l'identification par la démodulation, à l'aide de logiciels VSA, des données I/Q enregistrées*

Il est recommandé que le même outil d'analyse intègre de nombreux démodulateurs numériques applicables à des types de modulation non linéaires et linéaires, associés à divers algorithmes d'égalisation de canal, et à des diagrammes et affichages permettant d'évaluer la convergence de la démodulation.

Toujours à partir des données I/Q enregistrées précédentes, on peut utiliser la capacité de démodulation numérique du logiciel VSA pour valider le format de modulation et la rapidité de modulation du signal considéré. En mettant le logiciel VSA en mode démodulation numérique, on peut utiliser comme données d'entrée le format de modulation (FSK à 2 niveaux) et la rapidité de modulation (1600) déterminés lors de l'étape précédente pour valider les paramètres internes du signal.

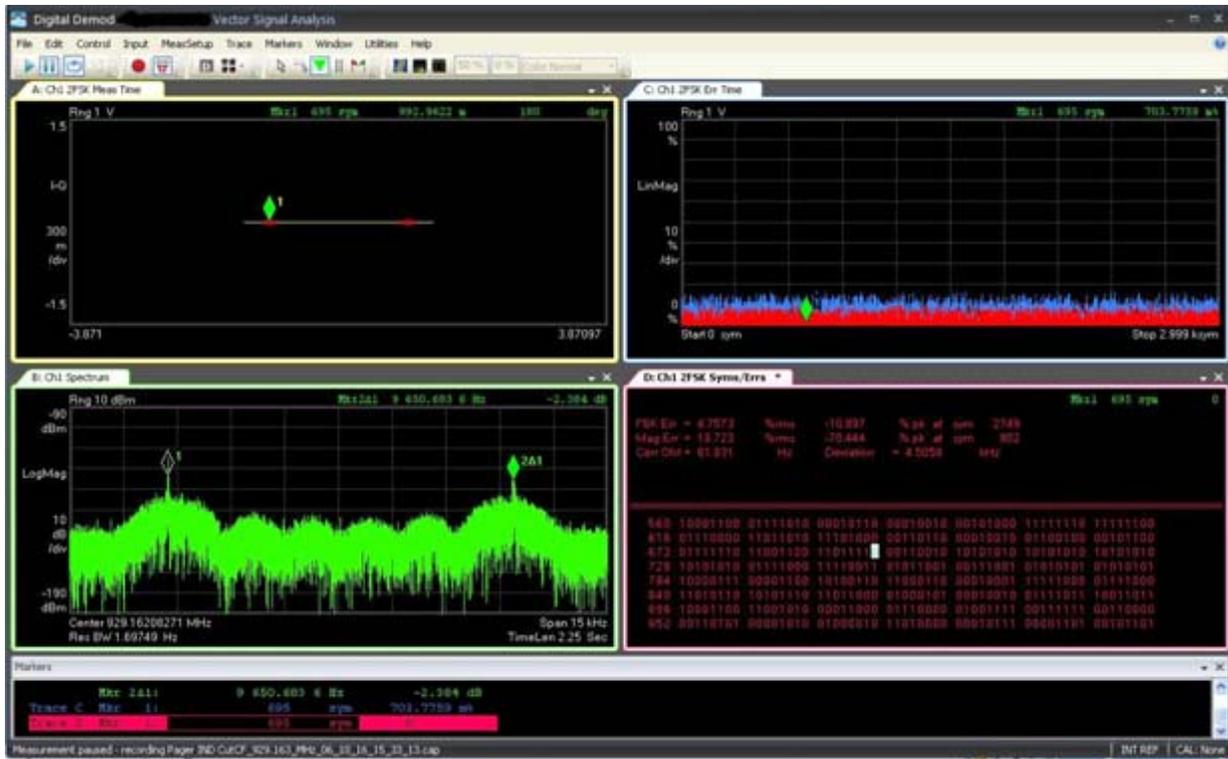
Sur la Fig. 9, qui illustre l'exemple du signal FSK non linéaire, la fenêtre en haut à gauche représente un diagramme I/Q (ou polaire) avec 2 états de fréquence du signal – l'état de gauche (point rouge) correspond au symbole «0» et l'état de droite correspond au symbole «1». Si le format de modulation et la rapidité de modulation ont été déterminés correctement, ce diagramme I/Q devrait être très stable et les points rouges (ou états) devraient correspondre aux champs corrects. Cette convergence suppose un choix correct des valeurs de démodulation et une application correcte du filtrage et de l'égalisation.

La fenêtre en bas à gauche représente le spectre du signal intégré sur le nombre de symboles démodulés – dans ce cas, 3 000 symboles ont été démodulés. Cet affichage spectral devrait être très proche du signal observé au départ.

La fenêtre en haut à droite représente l'amplitude du vecteur d'erreur (EVM) pour chaque symbole qui a été démodulé. La valeur EVM correspond à la différence de phase et d'amplitude entre un état de référence idéal de «0» ou de «1» et les états démodulés effectivement obtenus avec les paramètres utilisés dans la configuration de démodulation numérique. On peut visualiser la valeur EVM sous la forme d'une valeur moyenne ou symbole par symbole. Toutes les valeurs d'erreur associées à cette démodulation sont inférieures à 1%, de sorte qu'il est très probable que les bits associés à ce signal soient corrects.

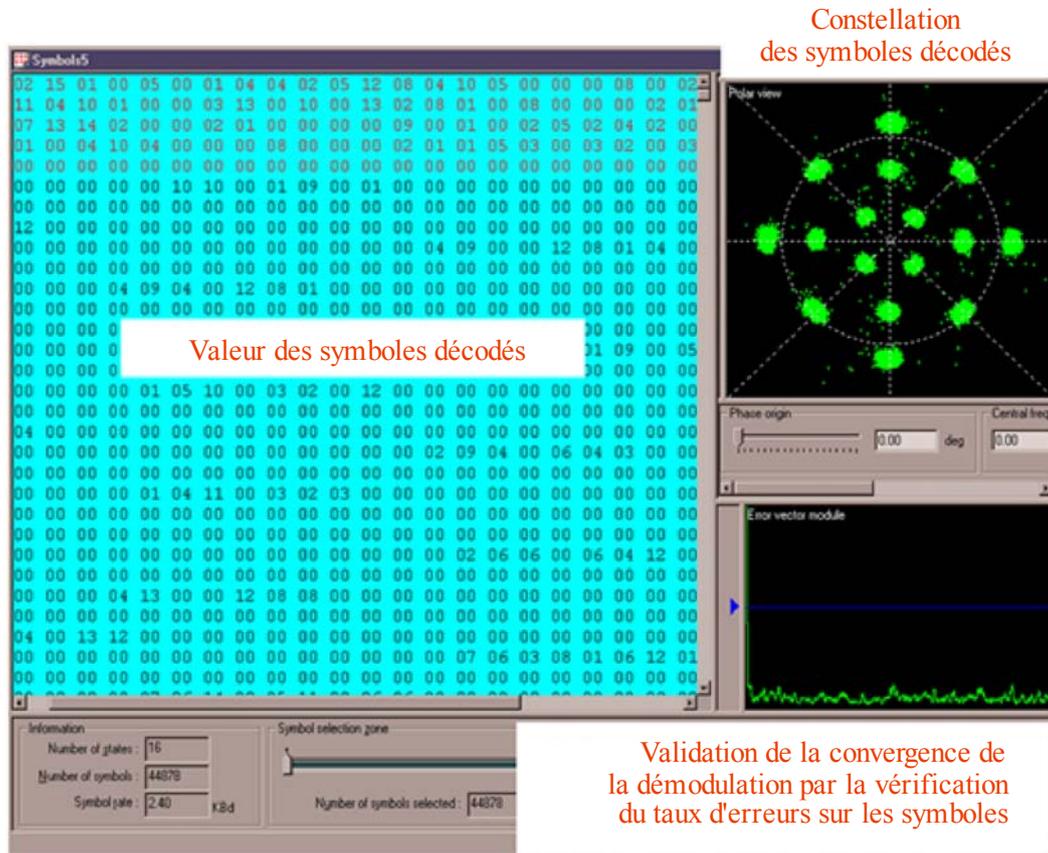
La fenêtre en bas à droite récapitule les bits démodulés effectifs et les erreurs. On remarquera que les marqueurs présents dans les quatre fenêtres sont liés et représentent le symbole «0» associé au symbole N° 695 parmi les 3 000 symboles. Ces marqueurs se déplacent au fur et à mesure que l'on avance dans l'enregistrement des données I/Q afin que l'utilisateur sache si les paramètres de démodulation sont corrects.

FIGURE 9
Logiciel VSA – Outils de démodulation numérique



Dans un souci d'exhaustivité, la Fig. 10 présente le résultat de l'identification d'un signal d'ordre plus élevé (16QAM V29) obtenu au moyen d'une technique analogue et d'un progiciel d'analyse différent s'appliquant uniquement aux modulations de type linéaire:

FIGURE 10
Exemple de signal 16QAM V29 démodulé



SM.1600-10

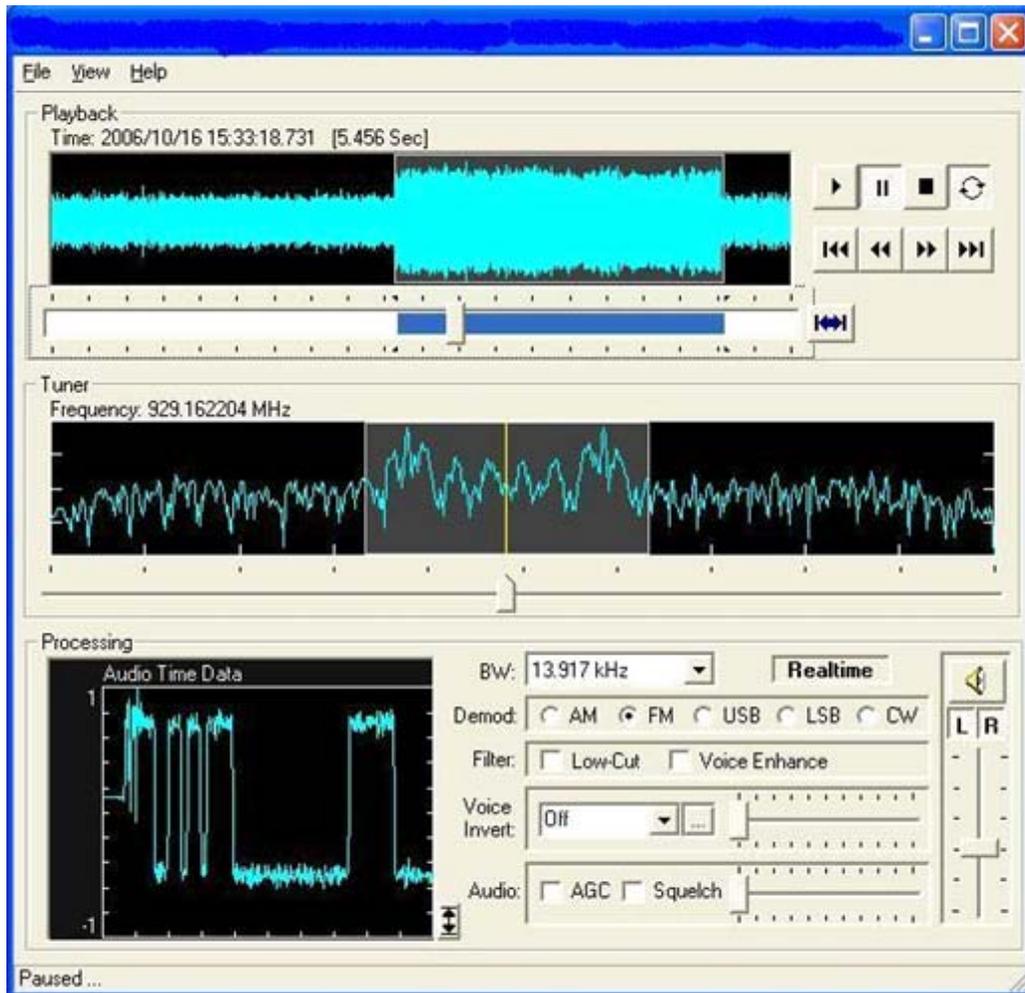
4 Traitement des données I/Q enregistrées

La dernière étape de l'identification technique d'un signal numérique inconnu consiste à décoder les données I/Q enregistrées afin d'extraire tout ou partie du contenu d'origine. Elle doit se dérouler conformément aux restrictions juridiques et éthiques en matière d'utilisation de l'information. Dans notre exemple, les données I/Q enregistrées peuvent être traitées à l'aide de logiciels de décodage disponibles sur le marché afin d'identifier sans ambiguïté la source de l'émission.

a) Traitement à l'aide d'un logiciel de démodulation audio

Le fonctionnement de certains logiciels de décodage consiste à traiter le signal audio créé par la démodulation du signal selon un format standard (AM, FM, U/LSB ou CW). Dans ce cas, on aura besoin d'un programme logiciel capable de créer le signal audio. Le programme représenté sur la Fig. 11 est un exemple. Il consiste à créer un signal audio à partir de la lecture des données I/Q enregistrées. Etant donné que les données enregistrées n'ont pas été «détectées» précédemment, le programme permet à l'utilisateur d'ajuster la fréquence centrale et la largeur de bande du processus de démodulation. On dispose ainsi d'une certaine souplesse lorsqu'on utilise des algorithmes de décodage qui sont très sensibles à la fréquence centrale et à l'étendue du signal audio.

FIGURE 11
Exemple de logiciel de lecture audio I/Q



SM.1600-11

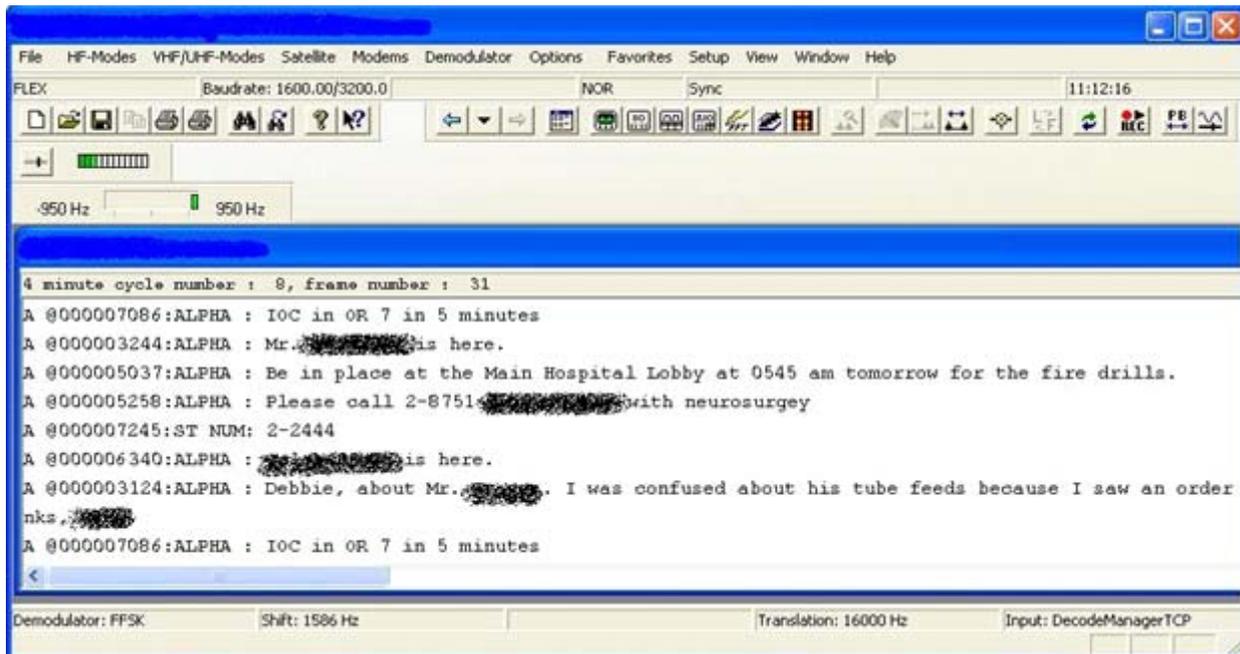
L'utilisation des données I/Q enregistrées présente comme autre avantage qu'il est possible d'employer différents mécanismes de détection pour obtenir le meilleur signal audio pour le décodage. Cette souplesse simplifie la tâche de l'opérateur qui effectue les enregistrements «sur le terrain». Si la fréquence centrale de la forme d'onde I/Q enregistrée est décalée par rapport au centre, il est possible de rééchantillonner l'enregistrement et/ou de le recentrer (comme indiqué ci-dessus) pour obtenir de bons résultats.

b) Traitement à l'aide d'un logiciel de décodage du signal

Le logiciel de décodage du signal appliquera le mécanisme choisi aux données enregistrées et affichera les résultats dans une fenêtre ou les sauvegardera dans un fichier texte. En général, pour chaque mécanisme de décodage, plusieurs ajustements sont opérés. Certains programmes comportent des «identificateurs de signal» mais ils concernent souvent des méthodes de modulation très simples comme FSK ou PSK. Dans l'exemple ci-dessous, on a utilisé les données I/Q enregistrées comme données d'entrée d'un mécanisme de décodage et on a choisi les formats FLEX et POCSAG, deux signaux de radiorecherche couramment utilisés. Ces formats ont été choisis sur la base de la fréquence centrale (929,162 MHz) et de la largeur de bande (12,5 kHz) – caractéristiques externes du signal – ainsi que du format de modulation (FSK) et de la rapidité de modulation (1600) – caractéristiques internes du signal. Aucun résultat de décodage n'a été obtenu pour le format POCSAG. Pour le format FLEX, les résultats du décodage sont présentés ci-dessous.

FIGURE 12

Exemple de logiciel de décodage disponible sur le marché



SM.1600-12

Le contenu en information extrait de l'émission d'origine permettra à l'utilisateur d'identifier sans ambiguïté la source et de prendre les mesures réglementaires appropriées sur la base d'une preuve suffisante.

5 Méthodes de corrélation et autres méthodes évoluées

Le présent paragraphe décrit des algorithmes évolués que le régulateur peut employer pour l'identification des signaux numériques. Il décrit les méthodes générales et met l'accent sur des exemples spécifiques qui sont examinés dans l'Annexe 2.

a) Méthodes de corrélation

Corrélation croisée: la corrélation croisée détermine dans quelle mesure deux formes d'onde sont analogues en fonction d'un décalage temporel appliqué à l'une d'elles. On parle également de produit scalaire glissant.

Autocorrélation: l'autocorrélation est la corrélation croisée d'un signal avec lui-même. Il s'agit de déterminer dans quelle mesure les observations sont analogues en fonction d'un décalage temporel entre elles. L'autocorrélation est un outil mathématique utilisé pour rechercher des séquences qui se répètent, par exemple la présence d'un signal périodique qui a été enfoui sous le bruit, ou pour identifier la fréquence fondamentale manquante dans un signal à partir de ses fréquences harmoniques. Elle est souvent utilisée en traitement du signal pour analyser des fonctions ou des séries de valeurs, par exemple des signaux dans le domaine temporel.

Ces algorithmes permettent de détecter et de reconnaître les séquences périodiques intégrées qui peuvent être utilisées comme signal de référence connu dans le traitement ultérieur.

Ils sont couramment utilisés pour rechercher dans un signal de longue durée une caractéristique connue plus courte (par exemple un préambule ou un mi-ambule, un mot de synchronisation ou un code pilote). En pratique, ces caractéristiques connues sont modulées à l'intérieur de formes d'onde numériques standard et offrent une séquence qui peut être utilisée pour déterminer sans ambiguïté la catégorie d'un signal donné:

- on trouve des mots de synchronisation dans de nombreuses formes d'onde continues standard, par exemple dans les signaux à multiplexage par répartition en fréquence (FDM) ou à accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) rencontrés dans de nombreux systèmes radio, de radiorecherche et PMR (NMT, TETRAPOL, etc.);
- on trouve des séquences de conditionnement dans les formes d'onde normalisées TDMA, par exemple la forme d'onde rencontrée dans plusieurs systèmes cellulaires 2G et PMR (GSM, D-AMPS, TETRA, PHS);
- on trouve des codes pilotes ou des mots de synchronisation dans les formes d'onde normalisées CDMA ou TDMA/CDMA, etc., fréquentes dans les systèmes cellulaires 3G (3GPP/UMTS, 3GPP2/CDMA2000);
- on trouve des symboles pilotes ou des sous-porteuses pilotes réparties dans les signaux modulés OFDM, OFDMA, COFDM et SC-FDMA/SC-FDE, très fréquents dans les systèmes de radiodiffusion (DAB, DVB-T/H) et dans les systèmes cellulaires 4G (3GPP/LTE).

Pour la mise en œuvre pratique de ces techniques, on utilise des fenêtres glissantes dans le domaine temporel pour déterminer l'instant d'arrivée du signal, et des techniques de compensation de l'effet Doppler pour compenser le mouvement de la source du signal. En général, ces méthodes se décomposent en deux étapes:

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 de la source.

b) *Autres méthodes évoluées*

Transformée par ondelettes de Haar: «A l'aide de ce mécanisme, il est possible de procéder automatiquement à la détermination de la catégorie de la modulation et à la reconnaissance des signaux de communication sans fil avec des paramètres non connus à l'avance. Les spécificités de ce mécanisme sont sa possibilité d'adaptation dynamique à pratiquement tous les types de modulation, et sa capacité d'identification. Ce mécanisme, qui repose sur une transformée par ondelettes et des paramètres statistiques, a été utilisé pour identifier des modulations PSK à M états, QAM à M états, GMSK et FSK à M états. Les résultats simulés montrent qu'une identification correcte de la modulation est possible jusqu'à une limite inférieure de 5 dB. Le pourcentage d'identification a été analysé sur la base d'une matrice de confusion³. Lorsque le rapport signal/bruit est supérieur à 5 dB, la probabilité de détection du système proposé est supérieure à 0,968.

³ En intelligence artificielle, une matrice de confusion est un tableau particulier permettant de visualiser la performance d'un algorithme, en général un algorithme d'apprentissage supervisé (dans le cas d'un algorithme d'apprentissage non supervisé, on l'appelle généralement matrice de correspondance). Chaque colonne de la matrice représente les instances d'une classe prédite, tandis que chaque ligne représente les instances d'une classe réelle. Le nom vient du fait que cette matrice permet de voir facilement si le système confond deux classes (autrement dit les intervertit). Dans les domaines autres que celui de l'intelligence artificielle, la matrice de confusion est souvent appelée tableau de contingence ou matrice d'erreur.

La performance du mécanisme proposé a été comparée aux méthodes existantes et il a été déterminé que ce mécanisme permettrait d'identifier tous les signaux à modulation numérique ayant un faible rapport signal/bruit». (Voir la référence [1].)

Analyse de corrélation spectrale: de nombreux signaux utilisés dans les systèmes de communication présentent des périodicités de leurs paramètres statistiques de deuxième ordre en raison d'opérations telles que l'échantillonnage, la modulation, le multiplexage et le codage. Ces propriétés cyclostationnaires, appelées caractéristiques de corrélation spectrale, peuvent être utilisées pour la détection et la reconnaissance du signal. Pour analyser les caractéristiques cyclostationnaires du signal, on utilise généralement deux fonctions principales:

- 1) la fonction d'autocorrélation cyclique (CAF), qui est employée pour l'analyse dans le domaine temporel; et
- 2) la fonction de corrélation spectrale (SCF), qui présente la corrélation spectrale et est obtenue à partir de la transformée de Fourier de l'autocorrélation cyclique.

Il est possible de faire la distinction entre différents types de signaux (à savoir AM, ASK, FSK, PSK, MSK, QPSK) sur la base de plusieurs paramètres caractéristiques des SCF et SCC. Cet algorithme est également efficace sur des signaux faibles et peut être utilisé pour déterminer la catégorie de signaux inconnus. (Voir la référence [2].)

6 Résumé

Les exemples fournis dans la présente Recommandation ont pour objet d'illustrer le processus d'identification et l'utilisation des techniques et outils logiciels disponibles sur le marché afin d'obtenir des données sur les signaux numériques modernes. Les exemples de corrélation fournis permettent d'illustrer les techniques de traitement évoluées qui peuvent être employées pour l'identification de signaux complexes.

La capacité d'enregistrer les données I/Q dans les analyseurs vectoriels de signal et dans les récepteurs de contrôle est devenue plus courante ces dernières années. Les outils d'analyse du signal, de reconnaissance de la modulation et d'identification du signal sont également devenus nettement plus accessibles, en particulier sur le plan financier. Ces outils permettent aux régulateurs du spectre de recourir à davantage d'automatisation pour détecter, enregistrer, catégoriser et identifier les émissions numériques considérées et de reconnaître et de résoudre plus efficacement les problèmes de brouillage.

Références relatives aux outils logiciels

Méthodes de démodulation généralement prises en charge par les logiciels VSA:

- FSK: 2, 4, 8, 16 niveaux (y compris GFSK);
- MSK (y compris GMSK) type 1, type 2;
- CPMBPSK;
- QPSK, OQPSK, DQPSK, D8PSK, $\pi/4$ DQPSK;
- 8PSK, $3\pi/8$ 8PSK (EDGE); $\pi/8$ D8PSK;
- QAM (codage absolu): 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024;
- QAM (codage différentiel selon la norme DVB): 16, 32, 64, 128, 256;
- QAM en étoile: 16, 32;
- APSK: 16, 16 avec DVB, 32, 32 avec DVB, 64 VSB: 8, 16, APSK personnalisé.

Formats standard de communications numériques généralement pris en charge par les logiciels VSA:

- cellulaire: CDMA (base), CDMA (mobile), CDPD, EDGE, GSM, NADC, PDC, PHP (PHS), W-CDMA, LTE, LTE-Advanced;
- réseaux sans fil: Bluetooth™, HiperLAN1 (HBR), HiperLAN1 (LBR), IEEE 802.11b, ZigBee 868 MHz, ZigBee 915 MHz, ZigBee 2 450 MHz;
- vidéo numérique: DTV8, DTV16, DVB16, DVB32, DVB64, DVB128, DVB256, DVB 16APSK, DVB 32APSK;
- autres: APCO 25, APCO-25 P2 (HCPM); APCO-25 P2 (HDQPSK), DECT, TETRA, VDL mode 3, MIL-STD 188-181C: CPM (option 21).

Références

- [1] PRAKASAM P. and MADHESWARAN M., Digital modulation identification model using wavelet transform and statistical parameters, Journal of Computer Systems, Networks, and Communications Volume 2008 (2008),
Article ID 175236, 8 pagesdoi:10.1155/2008/175236.
- [2] HAO Hu, JUNDE Song, Signal Classification based on Spectral Correlation Analysis and SVM in Cognitive Radio, 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication and Yujing Wang, Dept. of Telecommunication Engineering, Xidian University.

Annexe 2

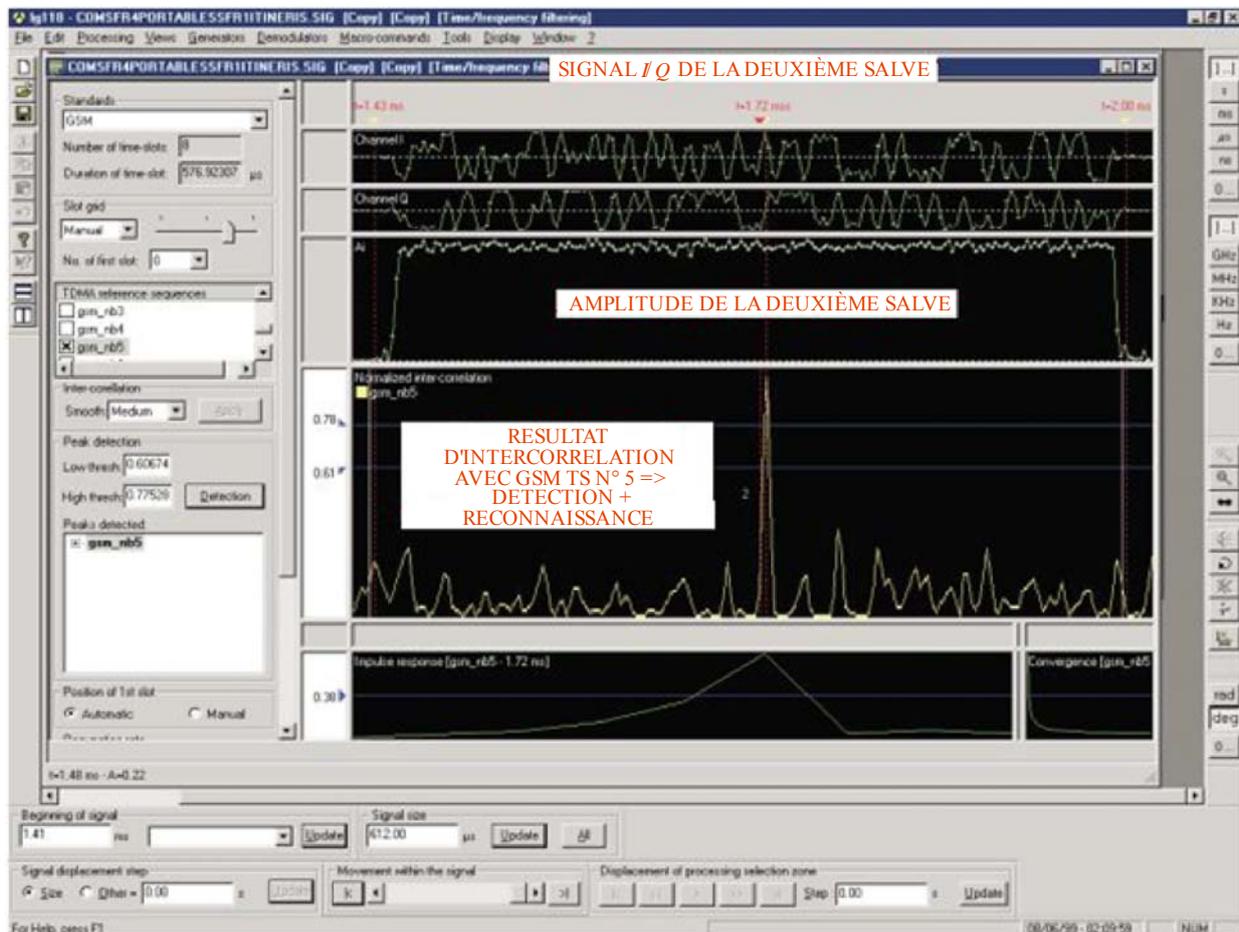
La présente Annexe donne des exemples de signaux numériques complexes particuliers et décrit les méthodes d'identification.

a) Exemple d'identification d'un signal GSM (TDMA)

Un exemple de corrélation d'une salve GSM est illustré ci-dessous. Dans cet exemple, les données I/Q enregistrées sont comparées avec un élément connu du signal GSM (mi-ambule) et les résultats de corrélation sont présentés dans la deuxième fenêtre en partant du bas.

FIGURE 13

Exemple de technique d'intercorrélation pour l'identification du signal



SM.1600-13

b) Exemple de méthode d'identification de signaux OFDM, SC-FDMA, SC-FDE

L'autocorrélation cyclique offre de nombreux avantages lorsqu'il s'agit d'analyser des signaux partiellement connus tels que les signaux OFDM, OFDMA, SC-FDE et CDMA. Elle aide à déterminer les caractéristiques périodiques et cycliques de la forme d'onde. Une application du traitement par autocorrélation cyclique est la reconnaissance des séquences répétées à l'intérieur des signaux d'émission, tels que les intervalles de garde dans des symboles de type OFDM. Par exemple, un calcul d'autocorrélation cyclique permet de détecter et de reconnaître précisément des signaux modulés OFDM, (O)FDMA et SC-FDE.

Pour la détermination de la vitesse de modulation et de la synchronisation des symboles, il est possible d'exploiter la duplication présente au début ou à la fin du symbole pour constituer l'intervalle de garde. Pour exploiter la duplication du signal dans le cas de signaux OFDM, les fonctions mathématiques de base sont la fonction d'autocorrélation et la fonction d'autocorrélation cyclique qui sont présentées plus haut.

La mise en œuvre pratique de l'identification d'un signal OFDM peut être réalisée en trois étapes:

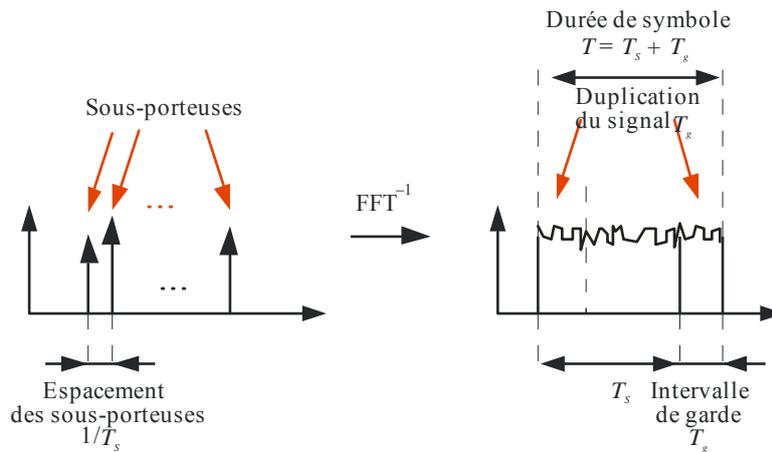
Etape 1: Comptage des sous-porteuses, qui peut être effectué sur un affichage spectral à très haute résolution (résolution en fréquence meilleure que $1/(2.TS)$). Il est recommandé d'utiliser:

- des représentations panoramiques du signal avec une résolution spectrale variable (et un temps d'intégration adapté);

- un grand nombre de points pour le calcul de la FFT avec des techniques d'interpolation appropriées;
- des fonctions zoom et des fonctionnalités de mesure par curseur.

Etape 2: Calcul de l'autocorrélation du signal pour faire apparaître une crête correspondant au retard $\tau = T_s$ afin de déterminer l'espacement entre les sous-porteuses $1/T_s$ (voir la Fig. 14, partie de gauche). Il est à noter qu'on ne peut confondre la série de crêtes correspondant aux échos du canal avec la crête donnant la durée de symbole des sous-porteuses en raison de leur valeur.

FIGURE 14
Structure d'un symbole (C) OFDM dans les domaines temporel et fréquentiel



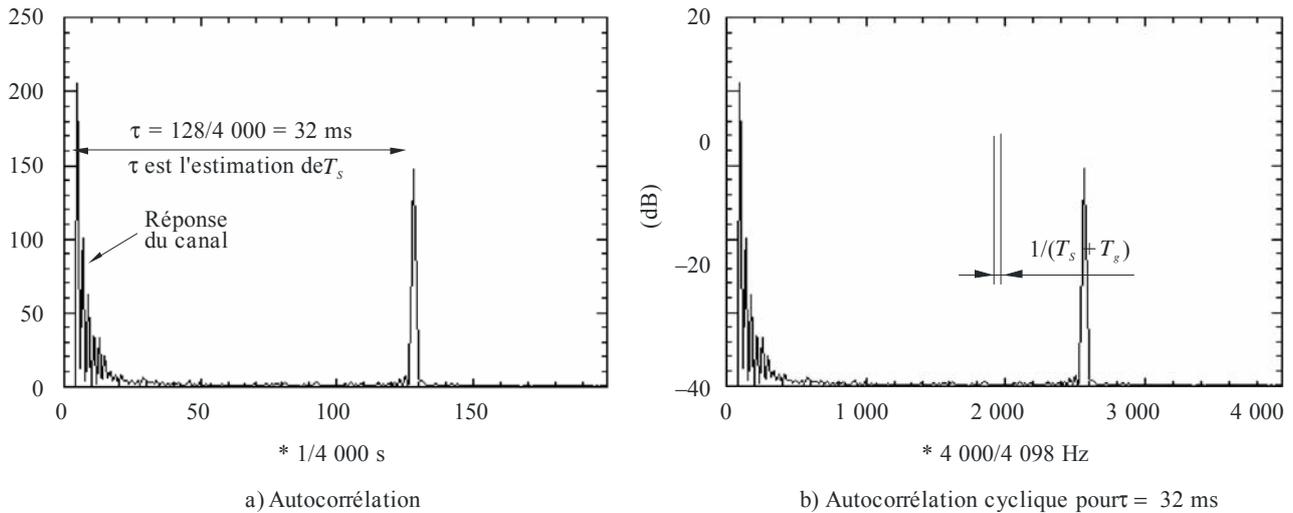
SM.1600-14

Etape 3: Calcul d'autocorrélation cyclique pour le retard τ (τ étant l'estimation de T_s) donné par l'autocorrélation de manière à pouvoir extraire les parties corrélées du signal correspondant à la partie dupliquée du symbole pour constituer l'intervalle de garde (voir la Fig. 14, partie de droite):

- 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 caractéristiques);
- pour déterminer la vitesse de modulation des sous-porteuses $1/(T_s + T_g)$ et l'intervalle de garde T_g .

FIGURE 15

Méthodes de corrélation et d'autocorrélation cyclique appliquées à un signal (C) OFDM



SM.1600-15

c) Exemple de méthode d'identification d'un signal WCDMA

La mise en œuvre de l'analyse d'un signal WCDMA peut se décomposer en trois étapes:

Etape 1: Estimation de la rapidité de modulation

A titre d'exemple, la rapidité de modulation des signaux 3GPP/WCDMA est de 3,84 MHz et peut être estimée par un calcul de corrélation spectrale. Cette rapidité de modulation normalisée peut être comparée à la valeur estimée obtenue par traitement du signal. Dans le cas de réseaux 3GPP/WCDMA, il est alors possible, pour le calcul de la corrélation spectrale, de restreindre le domaine de recherche concernant la rapidité de modulation à des valeurs proches de 3,84 MHz afin de réduire le nombre de calculs. La Fig. 16 a) montre le résultat d'estimation de la rapidité de modulation.

Etape 2: Recherche de cellule: la recherche de cellule se déroule généralement en trois étapes:

Etape 1: Synchronisation d'intervalle: en règle générale, cette opération est réalisée à l'aide d'un seul filtre adapté au code de synchronisation principal du canal de synchronisation (SCH) qui est commun à toutes les cellules. La synchronisation d'intervalle de la cellule est obtenue par détection des crêtes à la sortie du filtre adapté.

Etape 2: Synchronisation de trame et identification de groupe de code: pour cette opération, on corrèle le signal reçu avec tous les codes de synchronisation secondaires possibles du canal SCH et on identifie la valeur maximale. Etant donné que les décalages cycliques des séquences sont uniques, on détermine le groupe de code et la synchronisation de trame.

Etape 3: Identification de code d'embrouillage: à partir de la synchronisation de trame et du groupe de code déterminés à la deuxième étape, on corrèle le canal pilote commun (CPICH) avec les huit séquences différentes possibles à l'intérieur du groupe de code. Le code correspondant à la corrélation maximale est considéré comme étant le code d'embrouillage de la cellule.

On trouvera une description détaillée de la recherche de cellule dans la spécification technique du projet de partenariat pour la troisième génération (3GPP TS) 25.214.

Etape 3: Réalisation de mesures concernant la modulation du signal WCDMA.

Désembrouillage du signal reçu pour acquérir le symbole CPICH: pour obtenir les symboles CPICH, on multiplie le signal reçu avec la séquence du code d'embrouillage en commençant à la limite de trame déterminée à l'*étape 2* et en procédant à une sommation sur 256 échantillons.

Confirmation de la modulation QPSK: après avoir multiplié le signal désembrouillé avec le code de canal physique commun de commande (CCPCH) principal et avoir compensé le décalage de fréquence, on peut vérifier le type de modulation du signal CCPCH principal. Le décalage de fréquence est estimé à partir du symbole CPICH comme ci-dessus.

Les Fig. 16 b) et c) représentent respectivement la constellation de la modulation QPSK et les résultats de la recherche de cellule fournis par l'analyse recommandée précédemment pour des signaux WCDMA (3GPP/UMTS) réels qui utilisent en partage une porteuse commune (9 stations de base (BS) sont détectées et mesurées).

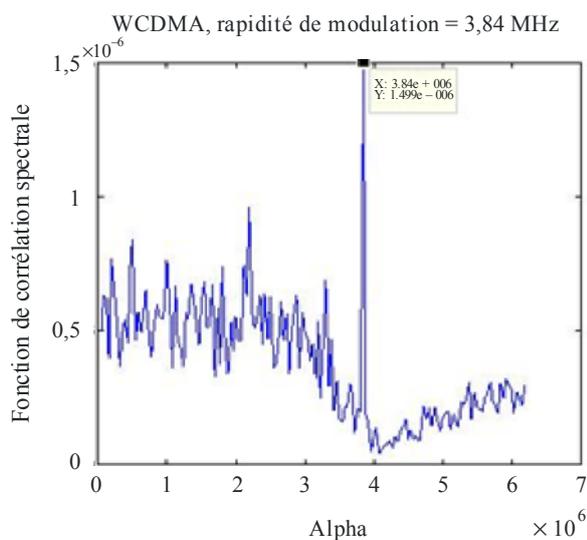
FIGURE 16

Illustration du processus complet d'identification de signaux 3GPP/WCDMA en trois étapes

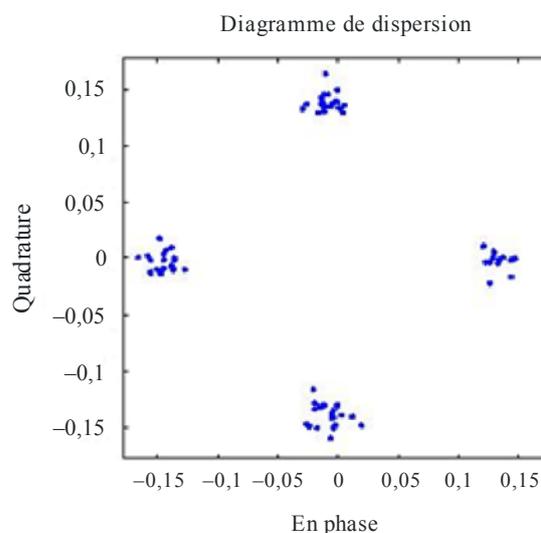
16-a) détermination de la rapidité de modulation

16-b) synchronisation d'intervalle, désembrouillage CPICH et démodulation CCPCH

16-c) application des étapes a) et b) pour rechercher les cellules WCDMA qui utilisent en partage le même porteuse



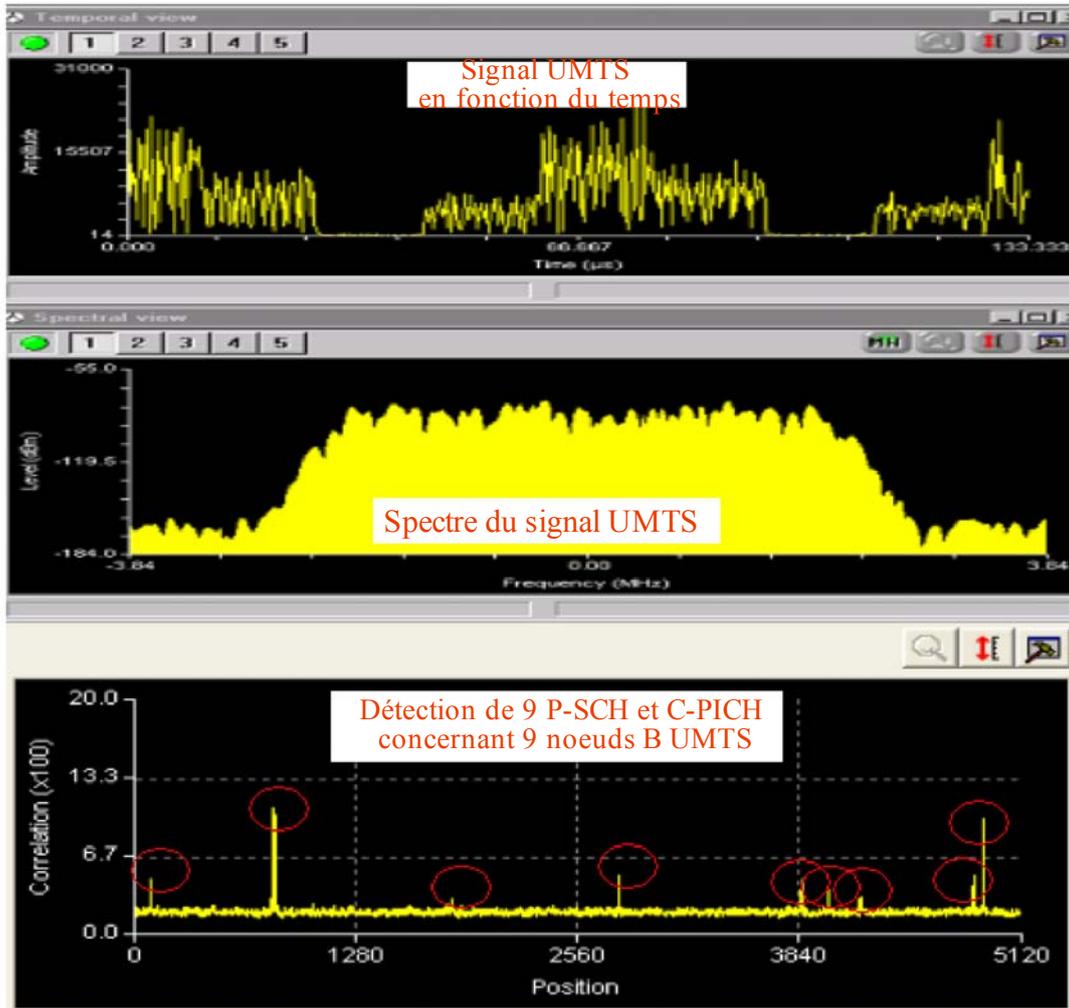
a) Estimation de la rapidité de modulation



b) Constellation du signal CCPCH

FIGURE 16c

Détection et identification de plusieurs cellules WCDMA utilisant en partage la même porteuse après la synchronisation d'intervalle, le désembrouillage CPICH et la démodulation CCPCH



Synthèse de la détection complète de SCH et P-CPICH

