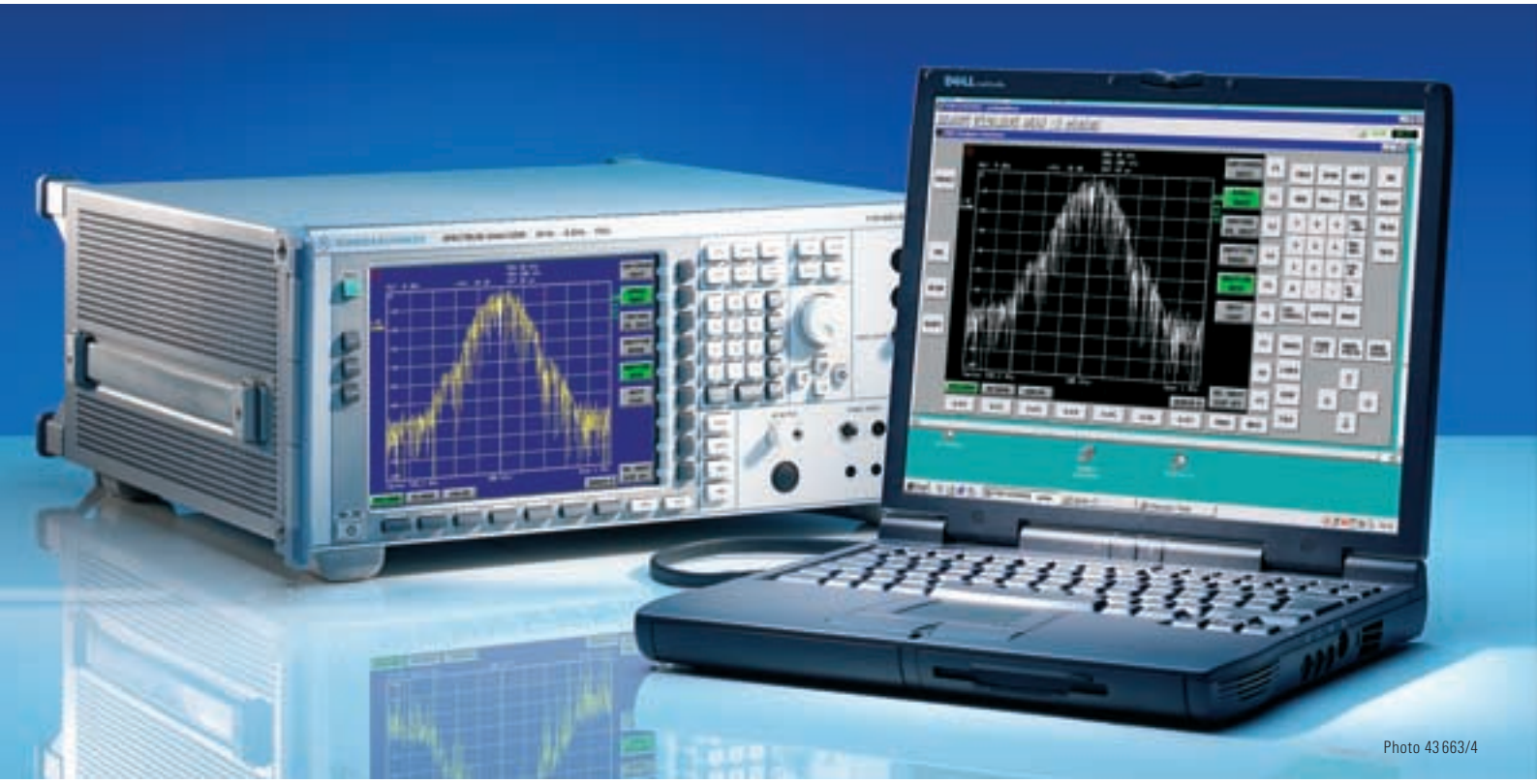

Fig. 1 La famille FSU se compose dans un premier temps de deux analyseurs pour la gamme RF et pour le bas des hyperfréquences : le FSU 3 (20 Hz à 3,6 GHz) et le FSU 8 (20 Hz à 8 GHz). Le logiciel PCAnywhere permet de les télécommander par souris.

Avec les analyseurs de spectre FSU, Rohde & Schwarz lance à présent sur le marché sa troisième génération d'analyseurs de haut de gamme. Comme leurs prédécesseurs des générations FSA (1986) et FSE (1995) [1], ils établissent à nouveau des références et offrent des mesures jusqu'ici impossibles à réaliser ou difficilement réalisables avec des analyseurs de spectre.

Analyseur de spectre FSU

La troisième génération d'analyseurs de spectre de haut de gamme

Excellentes performances RF

Les analyseurs de spectre de haut de gamme se distinguent des appareils de milieu de gamme par leurs excellentes performances RF, surtout conditionnées par un minimum de bruit intrinsèque, de bruit de phase et d'intermodulation. Le FSU (fig. 1) anticipe largement, dans ces disciplines, sur les futures exigences accrues en matière de dynamique, précision et vitesse des mesures. Les FSU 3 et FSU 8 sont basés sur les analyseurs de spectre à usage général de la famille FSP [2], dont les circuits RF ont été remplacés par une solution haut de gamme répondant aux plus sévères exigences.

Le progrès qu'incarne le FSU se manifeste surtout dans le comportement aux grands signaux, comme l'intermodulation intrinsèque et les propriétés de compression, ainsi que dans le bruit de phase. Dans les gammes de fréquences autour de 1 GHz et 2 GHz, importantes pour les radiocommunications mobiles, le FSU garantit – et c'est la première fois pour un analyseur de spectre – un point d'interception du troisième ordre > +20 dBm, avec même +25 dBm en valeur typique. Le point de compression à 1 dB du mélangeur d'entrée est de +13 dBm. Une dynamique aussi élevée est associée à un haut niveau utile du mélangeur, le niveau de réfé-

rence pouvant se régler sans atténuation RF jusqu'à +5 dBm (niveau du mélangeur : niveau à l'entrée RF moins affaiblissement de l'atténuateur RF). Tous les autres analyseurs de spectre usuels du marché limitent le niveau maximal du mélangeur à –10 dBm. Le FSU visualise ainsi une dynamique bien supérieure à l'écran, par exemple pour les mesures de bruit de phase ou d'émissions parasites, sans que le signal de la porteuse ne sature les circuits.

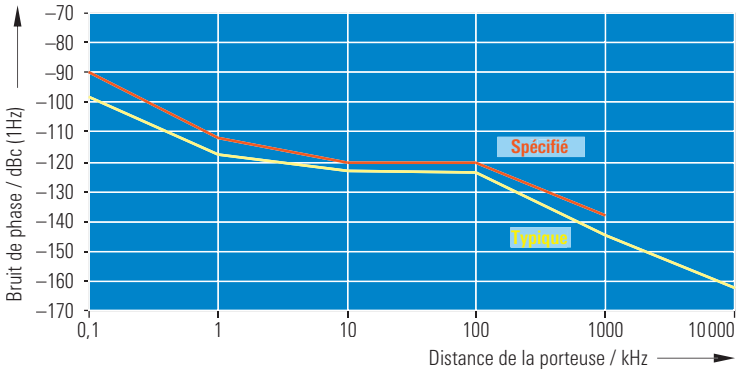

Fig. 2
Bruit de phase du FSU pour une fréquence d'entrée de 1 GHz.

Bruit de phase d'une faiblesse incomparable

La grande dynamique n'est cependant pas obtenue aux dépens d'une augmentation du bruit intrinsèque ; avec une indication moyenne du bruit intrinsèque < –145 dBm et –148 dBm en valeur typique pour une bande passante de résolution de 10 Hz, le FSU reste conforme à l'état de l'art. Cette excellente dynamique est le résultat d'une nouvelle conception symétrique du frontal, pour laquelle un brevet a été déposé.

Le bruit de phase a notamment un effet particulier sur les mesures de spectres très denses comportant des signaux de niveaux très différents ainsi que sur les mesures de brouillages dans les canaux adjacents de systèmes de radiocommunication. Le bruit de phase extrêmement faible des oscillateurs internes du FSU empêche que ne soient noyés dans le bruit les très petits signaux. Dans les systèmes de transmission à large bande, comme le WCDMA à la norme 3GPP, il est important d'avoir un faible bruit de phase très loin de la porteuse. Mais les mesures d'émissions parasites, par exemple en GSM, sont, elles aussi, souvent limitées par le bruit de phase. Le FSU offre à cet égard les meilleures valeurs qu'ait jamais pu présenter un analyseur de spectre. A 10 MHz de la porteuse, par exemple, le bruit de phase est à –162 dBc (1 Hz), comme le montre la figure 2. Pour minimiser le bruit de phase dans les applications critiques et à différentes distances de la porteuse, l'utilisateur du FSU peut – comme sur les FSA et FSE – commuter les bandes passantes normales du premier oscillateur local. Pour les applications générales, le FSU est bien entendu aussi en mesure de régler automatiquement la bande passante normale.

Citons comme exemple d'application de la dynamique utile extrêmement élevée du FSU la mesure de la puissance dans les canaux adjacents sur un signal 3GPP-WCDMA. Avec un niveau de 77,5 dBc de cette puissance, le FSU surpasse même l'analyseur de signaux FSIQ de Rohde & Schwarz, qui, avec 75 dBc, présentait jusqu'ici les meilleures valeurs du marché. La figure 3 montre le niveau de puissance dans les canaux adjacents qu'il est possible d'obtenir en fonction du niveau appliqué au mélangeur.

Les pas de 5 dB de l'atténuateur RF étalonné garantissent un réglage optimal du niveau du mélangeur nécessaire à l'obtention de la dynamique maximale. Le FSU atteint ainsi une dynamique d'ACLR (« Adjacent Channel Leakage Ratio ») d'au moins 76 dB pour tous les niveaux de signaux RF.

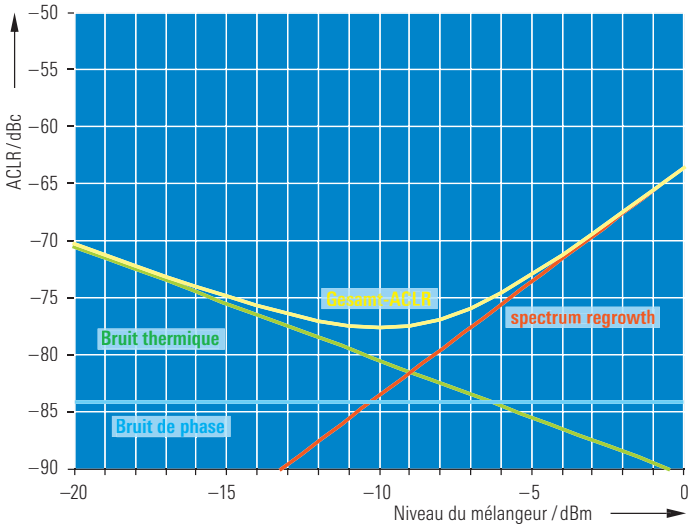

Fig. 3
ACLR pour un signal WCDMA (bande passante de 3,84 MHz, facteur de crête de 12 dB).

Précision de mesure de niveau jusqu'ici inconnue

Outre la dynamique RF, la précision de mesure de niveau joue toujours un rôle particulier dans toutes les applications. Dans cette discipline également, le FSU fait état de valeurs inconnues jusqu'ici. Or, une faible erreur de mesure de niveau en fabrication laisse davantage de place aux tolérances et aide ainsi, par exemple, à augmenter le rendement (fig. 4).

Un paramètre influençant la précision de niveau est la réponse en fréquence de l'entrée RF. Compte tenu de l'excellente adaptation à 50 Ω du premier mélangeur, la réponse en fréquence non corrigée est déjà extrêmement plane, si bien que grâce à des tables de correction fine, le FSU garantit des variations amplitude/fréquence de 0,3 dB seulement jusqu'à 3,6 GHz. Cette valeur s'applique à toutes les positions de l'atténuateur à partir de 10 dB. Suivant une technique brevetée par Rohde & Schwarz, le FSU règle durant le balayage le gain des circuits d'acheminement du signal de telle manière que toutes les erreurs de réponse en fréquence soient corrigées jusqu'à la première fréquence intermédiaire (fig. 5).

Les filtres numériques (10 Hz à 100 kHz de bande passante) donnent une erreur de linéarité extrêmement faible de l'affichage. La linéarité de niveau ne dépend pratiquement que de la linéarité du convertisseur A/N de 14 bits utilisé à la dernière fréquence intermédiaire, dont la non-linéarité par « dithering » est maintenue très faible.

La linéarité de l'affichage, qui, dans les appareils classiques, dépend d'amplificateurs logarithmeurs analogiques, est pratiquement sans erreur sur le FSU, grâce à une logarithmation par le calcul. Les valeurs garanties pour la linéarité de l'affichage du FSU constituent donc plutôt un problème au niveau de la vérification par des appareils de mesure externes et du référencement à des étalons. Le convertisseur lui-même a une non-linéarité d'environ 0,03 dB sur une gamme d'affichage de 70 dB. La valeur garantie pour la linéarité d'affichage, avec une complexité encore raisonnable des moyens d'étalonnage, est ≤0,1 dB.

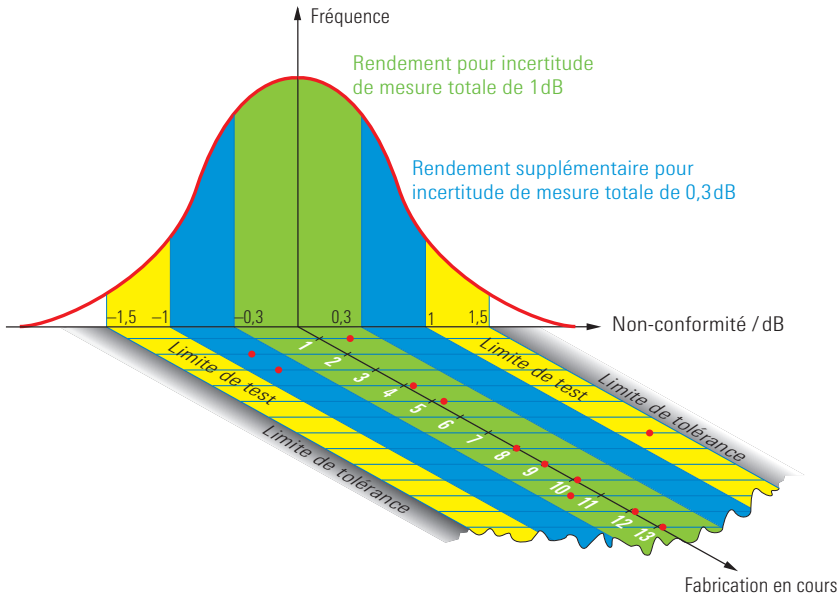

Fig. 4 L'extrême précision du FSU peut augmenter le rendement en fabrication.

L'incertitude de mesure totale du FSU dans la gamme de fréquence allant jusqu'à 3,6 GHz et pour une gamme d'affichage de 70 dB est de 0,3 dB (pour un intervalle de confiance de 95 %), ce qui, dans bien des cas, rend superflu un wattmètre et, en cas de mesure sélective de puissance, conduit à une précision jusqu'ici inconnue, sans que des techniques complexes de correction ne soient nécessaires. Dans le cas de signaux à modulation numérique, notamment, comme en WCDMA, le détecteur RMS contribue pour beaucoup à la mesure précise et stable de la puissance, dont le résultat est indépendant de la caractéristique du signal. L'utilisateur peut agir sur sa reproductibilité par un choix approprié de la période de balayage.

Sur le FSU, le signal vidéo d'intégration de puissance est disponible avec une résolution de 24 bits, ce qui se traduit pour le détecteur RMS par une dynamique de plus de 100 dB.

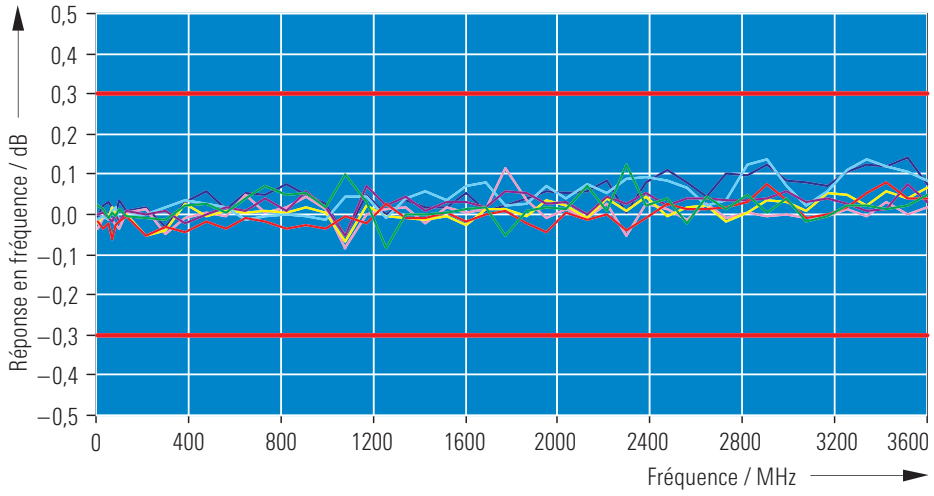

Fig. 5 Réponse en fréquence du FSU entre 10 MHz et 3,6 GHz (7 appareils différents).

Nombreuses bandes passantes

Une caractéristique essentielle des analyseurs de spectre est la dotation en bandes passantes de résolution, car ce sont elles qui déterminent la résolution des spectres mesurés. Le FSU offre une multitude de bandes passantes et de caractéristiques de filtrage. Pour les très

Fig. 6
Le FSU dispose de tous les détecteurs.

petites bandes passantes de résolution, de 1 Hz à 30 kHz, on dispose de filtres FFT, surtout avantageux dans l'étude de spectres très proches de la porteuse, par exemple du bruit de phase au voisinage immédiat d'oscillateurs. L'algorithme FFT réduit nettement la durée de la mesure par rapport aux filtres de balayage, surtout dans le cas de très petites bandes passantes.

Dans la gamme de 10 Hz à 100 kHz, le FSU utilise des filtres de balayage à caractéristique de Gauss (gradation 1/2/3/5) réalisés en numérique. Ils disposent non seulement d'une plus grande sélectivité (facteur de forme de 60 dB : 3 dB = 4,5) que les filtres à 5 pôles de réalisation classique (facteur de forme de 60 dB : 3 dB = 9), mais permettent aussi, en raison de leur caractéristique connue avec précision et de leur régime transitoire, un balayage plus rapide d'un facteur 2,5. Leur plus grande sélectivité permet d'utiliser dans de multiples applications un filtre plus large : une bande passante doublée réduit à un quart la durée du balayage. Enfin, des filtres de balayage numériques améliorent la précision des mesures, car leur gain est connu avec précision et aucune erreur de niveau additionnelle n'apparaît ainsi à la commutation des bandes passantes.

Dans la gamme des bandes passantes de 200 kHz à 50 MHz, on dispose de filtres de balayage analogique à gradation 1/2/3/5, réalisés, jusqu'à une bande passante de 5 MHz, sous forme de filtres à 5 pôles. Les bandes passantes de 10 MHz, 20 MHz et 50 MHz, elles, sont réalisées sous forme de filtres de canaux accordés une fois pour toutes. Avec ses 50 MHz, le FSU offre la plus grande bande passante jamais réalisée dans un analyseur de spectre pour applications industrielles générales et tient compte ainsi du développement des systèmes de télécommunications à large bande.

Comme déjà le FSP, le FSU contient, lui aussi, des filtres de canaux additionnels à caractéristique quasi rectangulaire, associés à 38 bandes passantes à partir de 100 Hz. Le FSU et le FSP comportent ainsi – à nouveau pour la première fois sur un analyseur de spectre – les filtres de type « Root Raised Cosine » imposés pour les mesures de puissance aux normes IS136, TETRA ou WCDMA. Des filtres de canaux destinés à la mesure de puissance sur canaux adjacents selon ETS 300… pour systèmes de transmission radio analogiques à bande passante de 12,5 kHz ou 25 kHz sont en outre disponibles. Là aussi, le FSU permet d'effectuer des mesures jusque là impossibles ou difficiles à réaliser avec des analyseurs de spectre.

Jeu complet de détecteurs

Le FSU dispose d'un jeu complet de détecteurs (fig. 6). Outre les détecteurs usuels, « Max Peak », « Min Peak », « Auto Peak » et « Sample », il comprend également, bien entendu, les détecteurs « RMS » et « Average » introduits dans la famille FSE. Pour les mesures de contrôle d'émissivité, il est en outre possible d'utiliser les détecteurs « Quasi Peak » CISPR 16, avec les bandes passantes à 6 dB associées de 200 Hz, 9 kHz et 120 kHz. Tous les détecteurs sont réalisés en numérique, si bien qu'il n'y a pas de temps d'acquisition ni de blocage, de dérive en température, de vieillissement ni d'erreur de commutation. Les opérations de traçage « Max Hold », « Min Hold » et « Average » sont bien entendu

Multiples fonctions standard pour laboratoire et production

Pour bien des applications générales de laboratoire et de production, le FSU offre de nombreuses fonctions contribuant pour beaucoup à faciliter les mesures et à éviter les erreurs :

- Deux configurations indépendantes commutables par simple bouton
- Subdivision de l'écran avec configuration indépendante dans les deux fenêtres
- 4 marqueurs absolus ou delta
- Marqueur de bruit pour mesure de la densité de puissance de bruit
- Marqueur de bruit de phase pour mesure du bruit de phase d'oscillateurs
- Mesure automatique d'intermodulation pour détermination du point d'interception du troisième ordre
- Compteur de fréquence à résolution de 0,1 Hz pour une période de mesure de 30 ms seulement
- Mesure du taux de modulation d'amplitude
- Démodulateur d'écoute AM et FM
- Mesure de puissance dans le domaine temporel (« Mean », « RMS » et « Peak Power »)
- Mesure de la bande occupée
- Lignes de limites définissables en toute liberté (en absolu ou relatif) avec seuils réglables et évaluation « Pass/Fail »

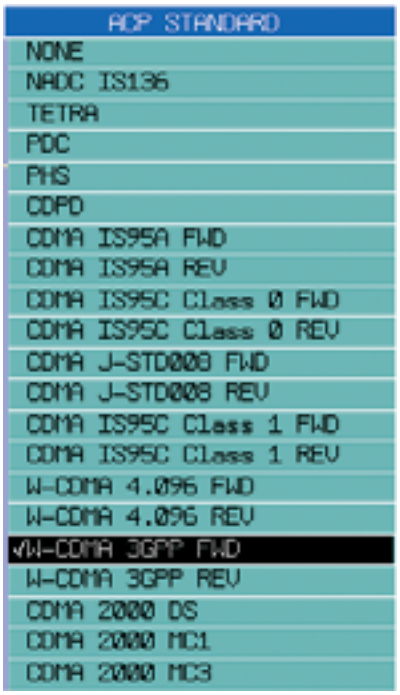

Fig. 7 Le FSU met à disposition, pour toutes les grandes normes de transmission, des fonctions simples à utiliser.

mises en œuvre, le moyennage pouvant s'opérer aussi bien en échelle logarithmique qu'en linéaire.

Fonctions additionnelles pour mesures conviviales

Le FSU combine son excellente dynamique RF à toute une série de fonctions facilitant considérablement les mesures, notamment sur signaux à modulation numérique, ou les rendant même possibles pour la première fois avec un analyseur de spectre. Une attention particulière est accordée à cet égard aux techniques de transmission numériques, qu'il s'agisse du TDMA, comme en GSM ou EDGE, ou du CDMA, comme en WCDMA à la norme 3GPP.

Puissance sur les canaux adjacents

L'une des mesures les plus importantes dans le domaine spectral est celle de la puissance sur les canaux adjacents, qui détermine le brouillage éventuel des abonnés sur les canaux voisins. Le FSU met à disposition, pour toutes les grandes normes de transmission (fig. 7), des fonctions simples à utiliser qui configurent l'analyseur de manière à ce que la mesure en question s'opère avec le bon réglage et avec la dynamique optimale. L'utilisateur choisit dans une liste la norme désirée, le FSU réglant alors l'atténuation et le niveau de référence aux valeurs optimales.

Dans toutes les normes, le FSU utilise automatiquement les filtres de mesure prescrits et calcule la puissance sur les différents canaux par intégration des mesures opérées au sein du canal. Le détecteur RMS garantit à cet égard des résultats très précis et reproductibles. Outre la méthode de l'intégration, le FSU offre également la mesure de puissance sur canaux adjacents dans le domaine temporel, la puissance étant alors mesurée dans les différents canaux sur une période sélectionnable, ce qui fait gagner du temps par rapport à la méthode de l'intégration. On obtient ainsi, pour la norme WCDMA, un gain de vitesse d'un facteur 4,5 pour des résultats de mesure tout aussi stables. Ceci est particulièrement intéressant dans la production de masse, lorsqu'il faut par exemple effectuer un contrôle à 100 % de tous les composants.

La mesure de la puissance ou de la puissance sur canaux adjacents dans les systèmes TDMA exige des fonctions spéciales, telles que le déclenchement sur une salve TDMA, le « Gated Sweep » et la mesure de la puissance dans le domaine temporel. Pour le déclenchement, le FSU génère un seuil réglable déduit du signal RF. Avec une bande passante de 50 MHz et la fonction « Gated Sweep », il déclenche dans le domaine temporel ou fréquenciel sur un signal TDMA et effectue la mesure dans l'intervalle de temps sélectionné. Les dispositifs à mesurer ne fournissant pas de signal de déclenchement peuvent ainsi être manipulés sans circuits additionnels. Dans le domaine temporel, le FSU mesure la puissance par intégration sur l'intervalle de temps choisi et donne même, en plus de la valeur numérique, l'écart-type, renseignant sur la stabilité du résultat de la mesure.

Statistique des amplitudes

Les signaux modulés en numérique contiennent souvent, à côté de la composante FM, une composante AM, par exemple le signal 3GPP-WCDMA à modulation QPSK. La grandeur intéressante pour le dimensionnement d'émetteurs et de récepteurs est donc non seulement la puissance moyenne, mais aussi les pointes de puissance et leur fréquence. Le FSU mesure en plus du spectre et de l'al-

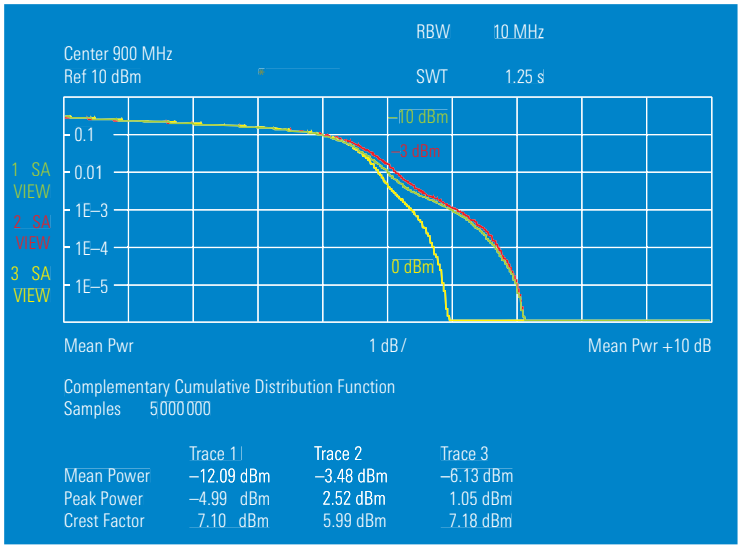

Fig. 8 CCDF mesurée en sortie d'un amplificateur de puissance pour différents niveaux d'entrée.

lure temporelle la distribution des amplitudes des signaux ; le mode de présentation usuel dans ce cas est la fonction CCDF (« Complementary Cumulative Distribution Function »). En commençant par la puissance moyenne, elle donne les pourcentages de pointes de puissance dans le signal. La figure 8 montre la CCDF d'un signal WCDMA, mesurée en sortie d'un amplificateur de puissance pour différents niveaux d'entrée. Avec cette fonction, le FSU ajoute une nouvelle dimension à l'appréciation de signaux RF.

Données IQ

Pour les applications qui ont besoin non seulement du module d'un signal RF mais aussi de sa phase, le FSU délivre par bus IEC ou interface LAN les composantes en phase et en quadrature. Il enregistre les données associées dans deux RAM d'un demi-mégamot chacune. La fréquence d'échantillonnage de 32 MHz maximum pour le signal IQ et la capacité mémoire (0,5 k à 0,5 M) sont configurables.

Grande vitesse de mesure

L'emploi d'analyseurs de spectre en production impose absolument, en plus de la précision de mesure, une haute cadence. Celle-ci conditionne le montant de l'investissement nécessaire à un objectif de production donné.

Une haute cadence de mesure, aussi bien en manuel qu'en mode télécommandé, est la condition nécessaire à de grandes vitesses de mesure. Avec ses 25 courbes de mesure visualisées par seconde, le FSU assure un travail agréable lors des opérations d'alignement. En mode télécommandé, sa capacité de transfert de plus de 60 courbes de mesure de 625 points chacune sur bus IEC ou interface LAN en « Zero Span » en fait un appareil extrêmement rapide.

Ceci ne dit toutefois pas tout sur la vitesse avec laquelle peuvent s'opérer des mesures au FSU. Dans cet appareil de haut de gamme, des routines et fonctions intelligents contribuent pour beaucoup à éviter tout « overhead » dans les mesures. Ainsi, le FSU dispose d'un mode « Frequency List », permettant de définir via l'interface de télécommande un jeu de fréquences, avec les réglages associés, tels que bande passante, détecteur, durée de mesure et niveau de référence. Sur commande, le FSU effectue la mesure aux fréquences imposées et transmet le résultat sous forme d'enregistrement. Il est ainsi possible, par exemple dans les mesures d'harmoniques, de ne prendre en considération que les fréquences intéressantes et de sauter les plages inintéressantes. Et, enfin, le court temps de réglage du synthétiseur du FSU contribue aussi à accélérer les mesures.

Autres informations et fiche technique :
www.rohde-schwarz.com
(mot-clé FSU)

BIBLIOGRAPHIE
[1] Analyseurs de spectre FSEA/FSEB – Nouvelles dimensions en analyse spectrale. Actualités de Rohde & Schwarz (1995), N° 148, p. 4–8.
[2] Analyseur de spectre FSP – Des ambitions de haut de gamme. Actualités de Rohde & Schwarz (1999), N° 166, p. 4–7.

AUTRE BIBLIOGRAPHIE
– Measurement of Adjacent Channel Leakage Power on 3GPP WCDMA Signals with the FSP. Note d'application 1EF41.

Le FSU compatible avec le FSE

La famille FSU élargit techniquement les possibilités de la famille FSE. La compatibilité revêt ainsi une importance particulière, notamment en termes de télécommande. Les investissements antérieurs dans des programmes de test ne sont pas perdus lors du passage au FSU puisqu'il est compatible, au niveau des instructions, avec le FSE ou le FSIQ, dans la mesure où les fonctions considérées existent bien dans les deux familles. Même les fonctions du FSE mises en œuvre différemment sur le FSU – par exemple le « Summary Marker » – sont contenues dans le jeu d'instructions du FSU et peuvent continuer d'être utilisées.

Josef Wolf

Résumé des caractéristiques – Analyseur de spectre FSU

Gamme de fréquence FSU3 / FSU8	20 Hz … 3,6 GHz / 8 GHz
Gamme de mesure d'amplitude	–155 dBm … 30 dBm
Gamme de visualisation d'amplitude	10 dB … 200 dB, pas de 10 dB, linéaire
Incertitude de mesure d'amplitude	< 0,3 dB (jusqu'à 3,6 GHz), < 2 dB (3,6 GHz … 8 GHz)
Bandes passantes de résolution	1 Hz … 30 kHz, filtres FFT par pas de 1/2/3/5, 10 Hz à 20 MHz par pas de 1/2/3/5 et 50 MHz, bandes passantes de mesure d'émissivité de 200 Hz, 9 kHz et 120 kHz, filtres de canaux de 100 Hz à 4,096 MHz
Détecteurs	Max Peak, Min Peak, Auto Peak, Sample, Average, RMS, Quasi Peak
Ecran	TFT-LC couleur de 21 cm (8,4"), résolution SVGA
Télécommande	IEC 625-2 (SCPI 1997.0), RS-232-C, LAN via 100Base-T
Dimensions (L x H x P)	465 mm x 197 mm x 517 mm
Poids FSU3 / FSU8	14,6 kg / 15,4 kg