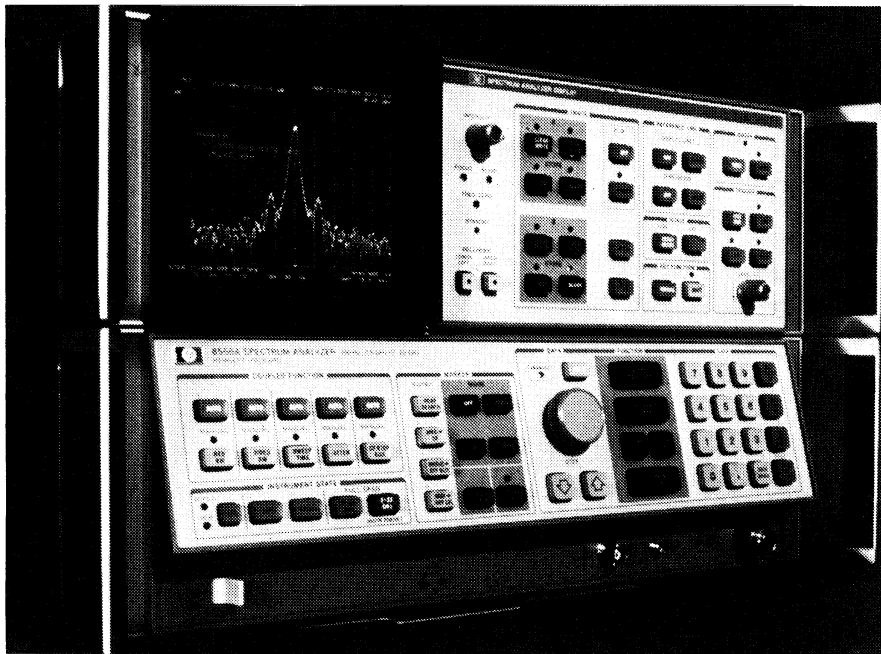


Amélioration de la précision des analyseurs de spectre

PAR R. IRWIN (*)

Les erreurs gain/réponse en fréquence des analyseurs de spectre sont en général plus significatives en mesures absolues et les erreurs de fidélité de l'amplificateur FI logarithmique dominant dans les mesures relatives, bien que les deux puissent avoir de l'importance dans certaines applications particulières. Cet exposé présente le résultat de nos investigations sur la stabilité et la répétabilité de ces analyseurs et sur l'identification des sources principales d'erreur. La stabilité du gain de ces analyseurs permet de développer pour ces caractéristiques des modèles d'erreurs scalaires très intéressants. Nous présentons une mise en œuvre de techniques d'étalonnage par logiciel. De telles techniques peuvent apporter de très sérieuses améliorations de la précision tant relative qu'absolue.



Les mesures affichées sur l'écran d'un analyseur de spectre ont généralement pour axes de référence les fréquences et les amplitudes en fonction desquelles des mesures absolues et rela-

tives peuvent être réalisées. Normalement, la précision obtenue pour une mesure dépend :

- de la précision propre de l'équipement de test ;

- de la technique de mesure.

Si la stabilité à long terme et à court terme de l'appareil et la fidélité des mesures le permettent, la précision peut être améliorée grâce à un étalonnage minutieux approprié mettant en œuvre un équipement externe ayant une précision suffisante pour servir d'étalon. Un tel étalonnage sera effectué point par point dans la plage utile. La précision des mesures pour un appareil ainsi étalonné dépendra alors :

- de la précision ; des éléments d'étalonnages utilisés
- de la technique utilisée pour l'étalonnage (qui doit tenir compte par exemple des ambiguïtés inévitables dues aux désadaptations d'impédances, de la reproductibilité des raccordements, etc.) ;
- de la fidélité des mesures à court terme et à long terme données par l'appareil soumis à l'étalonnage.

Si des mesures ultérieures sont effectuées se rapportant à des valeurs de paramètres ne correspondant pas exactement à celles des tables d'étalonnage, un facteur de correction approximatif pourra être obtenu en interpolant sur ces tables les valeurs qui encadrent la valeur à corriger. La précision obtenue est fonction du nombre de points d'étalonnage permettant la « modélisation » linéaire, section par section de la fonction erreur.

La collecte manuelle d'un nombre suffisant d'informations d'étalonnage implique un traitement ennuyeux et long, indépendamment des risques d'erreurs par l'opérateur. D'autre part, la manipulation d'une masse d'informations avec des appareils à commande manuelle est peu pratique. Lorsque l'appareillage utilisé, c'est-à-dire les éléments d'étalonnage et l'appareil à étalonner, peut être commandé par un ordinateur programmé de manière adéquate, le traitement est plus rapide et plus fiable, du fait d'une intervention humaine limitée qui libère l'opérateur pour des tâches plus utiles.

Théoriquement, il faudrait étalonner un nombre infini de points pour obtenir la précision maximale de l'appareil, ce qui nécessiterait une grande capacité de stockage et beaucoup de temps pour collecter les informations. En fait, la stabilité à long terme des paramètres étalonnés rendrait les informations non valides avant que l'étalonnage soit terminé !

En pratique, le véritable problème est de trouver un compromis tel que le modèle de l'appareil à étalonner comporte assez peu de points pour être

(*) *Symposium sur les mesures en radio et hyperfréquences de Hewlett Packard.*

physiquement réalisable en un laps de temps raisonnablement court, ce nombre de points étant cependant suffisamment grand pour permettre d'obtenir une meilleure précision en un temps raisonnable. Evidemment, un ré-étalonnage périodique s'impose et, à cause de la plus grande précision requise, il faut s'attendre à un intervalle plus court entre deux étalonnages que pour un appareillage étalonné « normalement ».

Traitement du signal dans un analyseur de spectre

Pour obtenir un modèle valable de l'erreur affectant les mesures effectuées, il faut d'abord connaître la disposition culturelle des circuits de l'appareil voir schéma synoptique (figure 1). Un analyseur de ce type est fondamentalement un récepteur superhétérodyne muni d'un système de balayage couvrant une gamme de fréquences déterminée et visualisant l'amplitude des signaux reçus en fonction de la fréquence d'accord. Un signal linéaire en forme de rampe est appliqué à l'un des oscillateurs locaux internes (normalement le premier) et aux plaqu岸s de déflexion horizontales du tube cathodique, ce qui se traduit par un balayage de fréquence dans la plage désirée. Lors d'un balayage, l'amplitude instantanée d'un signal quelconque « RF » présent à l'entrée, est détectée et visualisée sur l'écran du tube cathodique qui affiche ainsi la réponse amplitude/fréquence du signal considéré. En mode « récepteur » (Zéro span), le signal en forme de rampe cesse d'être appliqué à l'oscillateur local de sorte que l'affichage obtenu correspond à une fréquence d'accord fixer.

Dans un récepteur superhétérodyne, la quasi-totalité du traitement du signal est effectuée en « F.I. ». Contrairement à un récepteur de communications qui est conçu pour recevoir et traiter quelques catégories de signaux en vue d'une récupération optimisée des informations modulées sur ces signaux, un analyseur de spectre doit pouvoir recevoir toutes sortes de signaux: télégraphiques, en modulation de fréquence, en modulation d'amplitude, en rafales, signaux de complexités diverses et même signaux de bruit. Effectivement, toute une variété de signaux peut être rencontrée pour un seul balayage !

Le fonctionnement d'un récepteur diffère également de celui d'un analyseur de spectre dans son amplification. Un récepteur peut employer un contrôle de gain automatique (AGC) pour s'adapter au niveau du signal reçu, ou utiliser des limiteurs pour minimiser les fluctuations d'amplitude indésirables en modulation de fréquence. Au contraire, un analyseur de spectre est un dispositif de mesure dont la loi d'amplification, linéaire ou logarithmique, doit être connue et dont la stabilité doit permettre la mesure précise des amplitudes de tous les signaux reçus et de leurs variations.

Pour ces raisons, l'opérateur d'un analyseur de spectre a le choix entre différents réglages: résolution et largeur de bande vidéo réglable, gain « F.I. » linéaire ou logarithmique, etc. L'utilisation de ces différents modes d'exploitation doit être prise en compte lors de l'étalonnage de l'appareil.

La partie RF comprend l'atténuateur RF, les commutateurs RF et le mélange d'entrée; ce sont des éléments à large bande passante qui contribuent le plus à l'obtention d'une courbe de réponse en fréquence plate. Lors des

mesures dans la bande hyperfréquences 2-22 GHz, la perte d'insertion et le réglage point par point « tracking » du filtre passe-bande YIG du présélecteur, compliquent encore davantage l'établissement d'une courbe de réponse plate. La partie inférieure de la bande 8566 A (100 Hz à 2,5 GHz) est semblable au 8568 A en ce que la présélection RF est assurée uniquement par un filtre passe-bas fixe éliminant toute réponse en dehors de la bande, à des mélanges de fréquences harmoniques et images. Pour la gamme 2-22 GHz, le 8566 A utilise un mélangeur séparé ayant un présélecteur RF intégré (filtre passe-bande YIG). Ce schéma synoptique simplifié ne montre ni les deux itinéraires des signaux mélangés ni les commutateurs « RF » et « F.I. » nécessaires pour la commutation de bande. Un schéma synoptique plus détaillé des organes RF sera présenté à l'occasion de l'étalonnage gain/fréquence.

Il faut remarquer qu'une fois que le signal d'entrée a été converti en signal « F.I. » par le mélangeur d'entrée et le premier oscillateur local, tout traitement ultérieur a lieu à des fréquences fixes indépendantes de la fréquence du signal d'entrée. Ce traitement inclut la limitation de la bande au moyen de filtres de résolution à bande variables et l'amplification (ou atténuation) précise pas-à-pas. Dans la plupart des applications, l'amplification du signal est logarithmique, ce qui permet d'obtenir sur l'écran une grande dynamique d'affichage (90 dB pour le 8566 A et le 8568 A); l'opérateur peut, cependant, choisir une amplification linéaire. Le signal vidéo à la sortie du détecteur peut être « moyenné » en choisissant des constantes de temps relativement longues pour le filtre de bande vidéo, ce

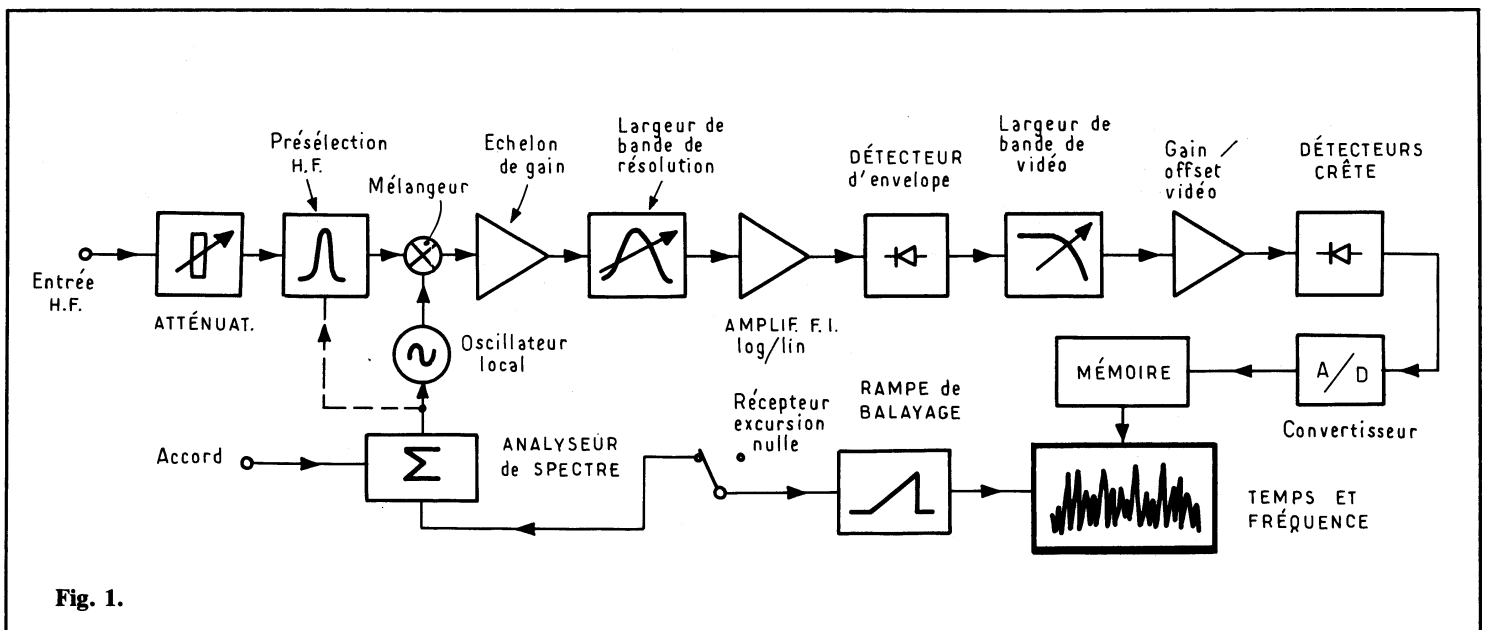
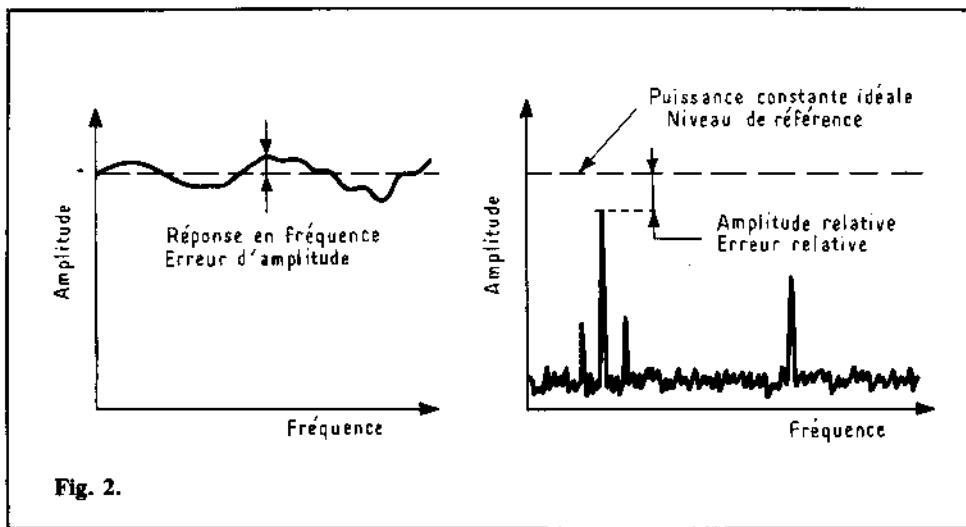


Fig. 1.



- Un étalonnage d'amplitude relative de l'analyseur de spectre et
- Un étalonnage de réponse en fréquence qui procure également une référence du niveau de puissance.

Etant donné que les performances de la chaîne « F.I. » sont indépendantes de la fréquence du signal d'entrée, la « F.I. » peut être étalonnée sur toute la fréquence désirable. Dans ce but est prévu, pour chaque analyseur de spectre un oscillateur d'étalonnage dont la fréquence et l'amplitude sont stables.

L'oscillateur d'étalonnage étant connecté à l'entrée « RF » de l'analyseur de spectre, l'étalonnage est déclenché en appuyant sur les touches *shift* et *frequency span* (code programme « KSw »). Il en résulte l'exécution par le microprocesseur interne d'un programme enregistré dans les mémoires ROM faisant partie de l'ap-

qui améliore notablement la fidélité des mesures et par voie de conséquence leur précision. Le signal logarithmique peut être amplifié avant d'être appliqué au convertisseur A/N (analogique/numérique), ce qui améliore la résolution d'amplitude qui peut atteindre 0,01 dB/bit.

La poursuite de mesures d'amplitudes précises nécessite de rechercher dans quelles proportions chaque élément de l'analyseur de spectre contribue à l'imprécision des mesures et d'exploiter toute possibilité d'amélioration de la précision.

Etalonnage amplitude/fréquence

Suivant le cas, un analyseur de spectre peut servir à mesurer :

- l'amplitude absolue d'un ou plusieurs signaux.
- l'amplitude relative de signaux de fréquences presque identiques (en sorte que l'erreur de réponse en fréquence est sans importance) ou
- l'amplitude relative de signaux dont les fréquences diffèrent suffisamment pour que la réponse en fréquence soit prise en compte.

Bien entendu, à chaque cas d'utilisation sont liées des contraintes de précision bien définies.

La généralisation de ce problème de mesure peut être concrétisée par une matrice des amplitudes disponibles suivant la fréquence. La solution du problème est plus facile si les différents mécanismes d'erreurs sont classés en deux groupes (figure 2) : l'un représentant les erreurs d'amplitude en fonction de la fréquence, l'autre représentant les erreurs d'amplitude en fonction de l'amplitude du signal. Il s'agit en fait d'un diagramme en coordonnées cartésiennes dans lequel n'importe quel couple amplitude/fréquence arbitrairement choisi, peut être introduit.

A cet effet, il est avantageux de profiter des possibilités d'auto-étalonnage of-

fertes par le programme incorporé entré en mémoires ROM (firmware) et d'y ajouter deux étalonnages particuliers :

HP 8566A SPECTRUM ANALYZER CALIBRATION DATA

Serial No.: _____
Date: _____

No.	Error Parameter	Amplitude (dB)	Frequency (Hz)
1	LOG/LIN Scales, RES BW >=100 kHz	-0.08	
2	LOG. offset error: 10 dB/ scale	-0.20	
3	LOG. offset error: 5 dB/ scale	0.05	
4	LOG. offset error: 2 dB/ scale	-0.10	
5	LOG. offset error: 1 dB/ scale	-0.07	
6	RES BW = 3 MHz	0.04	100000
7	RES BW = 1 MHz	0.00	20000
8	RES BW = 300 kHz	-0.06	-7000
9	RES BW = 100 kHz	-0.06	2000
10	RES BW = 30 kHz	0.15	-700
11	RES BW = 10 kHz	0.15	-200
12	RES BW = 3 kHz	0.16	70
13	RES BW = 1 kHz	0.01	-40
14	RES BW = 300 Hz	0.03	-13
15	RES BW = 100 Hz	0.01	-8
16	RES BW = 30 Hz	-0.02	-8
17	RES BW = 10 Hz	0.04	-3
18	LOG/LIN Scales, RES BW <100 kHz	-0.13	
19	I.F. Atten: 20 dB	0.06	
20	I.F. Atten: 10 dB	0.04	
21	I.F. Gain: 20 dB	-0.01	
22	I.F. Gain: 20 dB	-0.06	
23	I.F. Gain: 10 dB	-0.09	
24	I.F. Gain (Linear): 20 dB	0.00	
25	I.F. Gain (Linear): 10 dB	0.01	
26	ATTEN = 20 dB	-0.08	
27	ATTEN = 30 dB	0.04	
28	ATTEN = 40 dB	-0.06	
29	ATTEN = 50 dB	0.02	
30	ATTEN = 60 dB	-0.06	
31	ATTEN = 70 dB	0.02	

SYSTEM OPERATIONAL

Fig. 3.

pareil. La procédure d'auto-étalonnage du 8566 A est relativement rapide et ne nécessite pas plus de 30 secondes; le 8568 A a besoin d'environ 90 secondes à cause de son dispositif d'accord basé sur un compteur de fréquences. En vue de l'auto-étalonnage du 8566 A, il est nécessaire d'effectuer une série de mesures permettant l'établissement d'un tableau de 37 coefficients d'erreur. Vingt-cinq d'entre eux sont des coefficients d'erreur d'amplitude, douze sont des coefficients d'erreur de fréquence.

Les valeurs consécutives à un auto-étalonnage peuvent être affichées sur l'écran du tube cathodique ou une liste annotée des différents coefficients d'erreur (figure 3).

Fidélité des mesures d'auto-étalonnage

La fidélité d'étalonnage est vérifiée par des mesures statistiques effectuées sur un échantillonnage de fabrication, à un rythme de 1 mesure toutes les 2 minutes pendant 10 heures.

L'examen des relevés montre que ces appareils ont une remarquable stabilité à long terme et à court terme; les écarts-types et les valeurs de dérive sont normalement 0,02 dB ou moins, bien que certaines variations discrètes atteignent 0,1 dB.

Dans les tableaux, les écarts de fréquence des coefficients d'erreur ont été normalisés et sont indiqués en pourcentage de la bande passante du filtre. Ils ont également des valeurs très stables, typiquement 5% ou moins.

Technique de correction des erreurs

Il existe deux techniques principales pour l'application de ces coefficients d'erreur auto-générés:

- Exploitation de l'analyseur en mode corrigé. Le microprocesseur de l'appareil ajuste alors le gain du système pour compenser le coefficient d'erreur applicable aux valeurs effectuées suivant les différents réglages d'exploitation.

- Lecture à partir de l'analyseur des valeurs non corrigées et de coefficient d'erreur au moyen d'un contrôleur, suivie d'une correction arithmétique des valeurs. Cette méthode est supérieure, car les corrections d'amplification des petites valeurs décimales de la méthode ne sont pas étalonnées elles-mêmes.

Le tableau de la figure a été établi en comparant le fonctionnement d'un analyseur avec et sans correction, dans un cas relativement simple. Après auto-

	MEAN ABS. ERRDR *****	MEAN ERROR *****	STD. DEV. *****	MAX. NEG. ERROR *****	MAX. POS. ERROR *****	PK-PK ERROR *****
UNCORRECTED:	0.15	0.11	0.16	-0.30	0.50	0.80
SELF-CORRECTED:	0.05	0.01	0.07	-0.20	0.20	0.40
MATH-CORRECTED:	0.04	-0.01	0.05	-0.17	0.17	0.34
ERROR DIFFERENCE:	0.05	-0.02	0.05	-0.19	0.14	0.33
NUMBER OF TESTS:	500					

Fig. 4.

étalonnage 500 mesures ont été réalisées avec l'oscillation d'étalonnage. Pour chaque mesure, un paramètre de largeur de bande de résolution et un paramètre d'échelle logarithmique ou linéaire ont été aléatoirement choisis; dans l'hypothèse d'un paramètre logarithmique, un facteur d'échelle de 1, 2, 5 ou 10 dB par division a été également choisi de manière aléatoire. Le niveau de référence correspondant à la valeur utilisée pendant l'auto-étalonnage a été maintenu constant (-7 dBm) afin qu'il n'y ait pas introduction d'erreurs d'amplification logarithmique pour lesquelles il n'y ait pas de valeurs d'auto-étalonnage. Cependant, l'atténuation « RF » a été modifiée aléatoirement dans les limites d'un rapport signal/bruit acceptable pour stimuler les erreurs liées à la fois aux variations d'atténuation « RF » et à celles des variations discrètes de gain « F.I. » mises en jeu par l'analyseur pour comparer les modifications d'atténuation.

Il faut remarquer que les valeurs d'erreur indiquées sur la ligne « error difference » (figure 4) correspondent aux réglages de la méthode 1. L'importance de l'amélioration apportée varie selon les appareils étant donné qu'elle dépend de la précision des corrections d'amplification des valeurs décimales non étalonnées, mais la correction via le code programme « KS 91 » est statistiquement préférable.

Etalonnage de l'amplificateur logarithmique

Les mesures d'amplitudes relatives entrant dans la plupart des mesures, on examinera maintenant une technique spécifique d'étalonnage de la caractéristique de transfert de l'amplificateur logarithmique du 8566 A.

Sauf si des techniques de substitution « F.I. » sont utilisées, la précision des mesures d'amplitudes relatives est essentiellement la précision de la caractéristique de transfert de l'amplificateur

logarithmique, lui-même. Pour les analyseurs 8566 A et 8568 A, cette précision est spécifiée à « $\pm 0,1$ dB/dB sans dépasser ± 1 dB pour une plage supérieure à 80 dB et $\pm 1,5$ dB pour une plage de 90 dB ». Bien que ces spécifications soient supérieures à celles d'autres analyseurs de spectre, une précision encore meilleure est nécessaire pour beaucoup d'applications. L'excellente stabilité de gain du 8566 A permet l'étalonnage de l'amplificateur logarithmique au moyen d'étalons externes afin d'améliorer sa précision. Les résultats obtenus atteignent une précision d'étalonnage effective d'environ $\pm 0,05$ dB/10 dB pour des mesures d'amplitudes relatives telles que des mesures d'atténuation pas par pas.

De nombreuses méthodes d'étalonnage permettent d'améliorer la précision des mesures. La plus simple est de construire une table des coefficients d'erreur correspondant à chaque augmentation de 1 dB de l'amplification logarithmique sur toute la plage de 90 dB; pour cela, l'analyseur de spectre est utilisé pour mesurer l'atténuation pas par pas d'un atténuateur de précision homologué pour une fréquence de test déterminée.

Etant donné que les caractéristiques « F.I. » des analyseurs de spectre sont indépendantes de la fréquence de test RF, la valeur exacte de celle-ci est théoriquement sans objet. Toutefois, en pratique, l'étalonnage doit être réalisé à une fréquence relativement basse, par exemple 30 MHz, pour laquelle des éléments d'étalonnage, sont facilement disponibles; par ailleurs, il est relativement facile à une fréquence, de minimiser toute désadaptation d'impédance « RF » ainsi que les ambiguïtés dans la reproductibilité des raccordements, liées à la nature scalaire des mesures effectuées. Lorsqu'une méthode par substitution « RF » est employée pour l'étalonnage, il convient de veiller à ce que des effets de surcharge/compression ne se produisent pas sur le mélangeur d'en-

trée de l'analyseur de spectre; le niveau de puissance au mélangeur ne doit pas dépasser -20 dBm. Une autre méthode d'étalonnage par substitution « F.I. » peut être mise en œuvre, mais cela nécessite de modifier l'appareil standard pour avoir accès à la fréquence « F.I. » de 21,4 MHz.

L'étalonnage de la totalité de la plage de 90 dB de l'amplificateur logarithmique est très utile dans de nombreuses applications, et sa mise en œuvre est relativement simple. Cependant, sa précision est limitée, par la résolution de 0,1 dB/bit du convertisseur A/N de l'analyseur de spectre. Les modes d'affichage logarithmique étendu (50, 20 et 10 dB) permettent une plus grande résolution (0,05 dB/bit, 0,02 dB/bit et 0,01 dB/bit respectivement) mais nécessitent de la part de l'opérateur des procédures de mesures auto-réglables plus complexes si l'amélioration de la résolution est obtenue en étendant section par section la plage à couvrir.

La méthode d'étalonnage qui va être décrite est une forme de substitution « RF ». Les pas de 1 dB d'un atténuateur sont d'abord étalonnés dans une plage de 10 dB, en utilisant un milliwattmètre tel que le modèle HP 436 A. Les valeurs d'étalonnage sont alors utilisées pour l'étalonnage de l'amplificateur logarithmique. Cette méthode offre plusieurs avantages :

- Elle est facilement automatisable.
- Les milliwattmètres sont plus facilement disponibles pour la plupart des utilisateurs que les atténuateurs d'étalonnage. (En fait, l'utilisation d'un milliwattmètre est probable dans un tel système si un étalonnage de réponse en fréquence doit également être réalisé).

Etalonnage de la courbe de réponse en fréquence

Pour le modèle 8568 A et la bande de fréquence inférieure (100 Hz - 2,5 GHz) du 8566 A, la seule forme de présélection « RF » est assurée par un filtre passe-bas fixe qui empêche les réponses hors bande des mélanges de fréquences harmoniques en images. Dans les bandes dont il s'agit, la « modélisation » de la courbe de réponse en fréquence est immédiate et la fidélité des mesures est normalement meilleure que 0,1 dB.

Etant donné que la courbe de réponse en fréquence est directement affectée par chacun des éléments large bande « RF » de l'analyseur, l'étalonnage final d'un système devrait comporter l'enregistrement des valeurs d'étalonnage pour chaque valeur d'atténuation et à chaque fréquence, ce qui se traduirait non seulement par une perte de

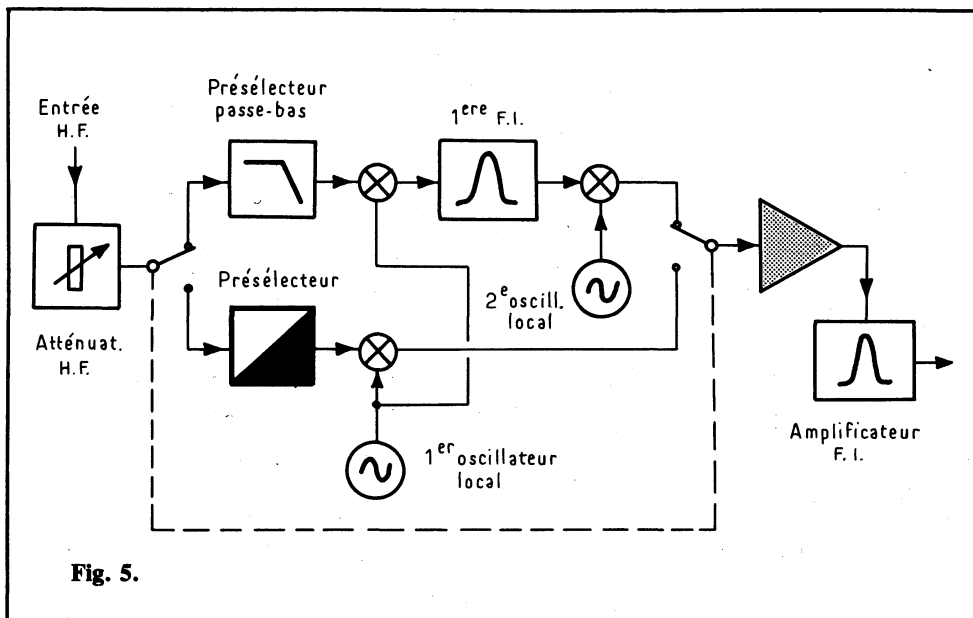


Fig. 5.

temps, mais aussi par la manipulation d'une masse importante d'informations. Pour ces bandes de fréquences basses, tout au moins, une précision suffisante peut généralement être obtenue en utilisant comme modèle pour chaque valeur d'atténuation une ligne droite dont les paramètres (pente et ordonnée « slope » et « offset ») simplifient la collecte et le stockage dans la partie inférieure de chaque bande.

Le schéma synoptique représenté (figure 5) illustre les deux itinéraires des signaux pour la conversion « RF »/« F.I. » d'un analyseur de spectre 8566 A. L'étalonnage de la courbe de réponse en fréquence pour la bande 2-22 GHz est rendu plus difficile à cause des cinq facteurs décrits dans les paragraphes qui suivent :

- La concordance de l'accord point par point (tracking) du pré-sélecteur YIG et de la fréquence de l'analyseur : la fidélité des mesures d'amplitudes d'un balayage à l'autre est affectée par les effets d'hystérésis des circuits magnétiques du pré-sélecteur YIG. Bien entendu, le réglage d'amplitude maximale du pré-sélecteur peut être repris pour chaque fréquence, mais cela nécessite beaucoup de temps. La concordance de l'accord point par point du pré-sélecteur YIG et les effets d'hystérésis sont à la base des erreurs affectant la fidélité des mesures d'amplitude dans ces bandes. Dans les systèmes automatisés, ce problème est facilement résolu par l'introduction dans le logiciel d'un sous-programme dénommé « hystérésis reset » (annulation hystérésis). Une recherche de l'accord d'une extrémité à l'autre de la bande (ce qui fait varier le courant du YIG entre ses valeurs maximales entre 2 et 22 GHz, renouvelée plusieurs fois, suffit généralement pour rétablir un état magnétique de référence connu.
- La largeur de bande effective du

pré-sélecteur YIG varie suivant la fréquence du signal ; elle passe d'une valeur nominale de 20 MHz à 2 GHz à l'environ 70 MHz à 22 GHz. La forme du filtre passe-bande varie aussi selon l'accord. En raison d'une largeur de bande plus étroite pour les fréquences basses (ce qui donne un facteur « Q » plus élevé), la concordance des réglages d'accord point par point est généralement plus critique dans la partie inférieure de chaque bande, et particulièrement pour la bande 2-5,8 GHz.

- Des problèmes plus importants de désadaptation d'impédance et de reproductibilité des raccordements rendent plus difficile la réalisation des montages bien adaptés et reproductibles permettant des mesures scalaires à ces fréquences.

- La bande de fréquence 2-22 GHz est en réalité composée de quatre bandes séparées, utilisant les harmoniques 1 à 4 du premier oscillateur local. Il est nécessaire pour chacune de ces bandes, d'une part d'étalonner l'écart de gain en raison des différences dans la perte de conversion des mélangeurs selon l'harmonique utilisé, et d'autre part d'optimiser la concordance des accords point par point du pré-sélecteur YIG. L'algorithme d'auto-étalonnage du 8566 A peut rétablir une référence absolue en bande basse à 100 MHz en utilisant l'oscillateur d'étalonnage de cet analyseur, mais il n'y a pas de méthode automatique prévue pour normaliser le gain global du système sur les bandes des fréquences élevées. Au lieu de cela, une source hyperfréquence externe et un milliwattmètre doivent être compris dans le système pour obtenir de meilleurs résultats.

- Il est nécessaire d'étalonner plus rigoureusement l'atténuateur « RF » pour chaque valeur d'atténuation. Un modèle de conception simple ne suffit pas pour les fréquences élevées. R.I.