

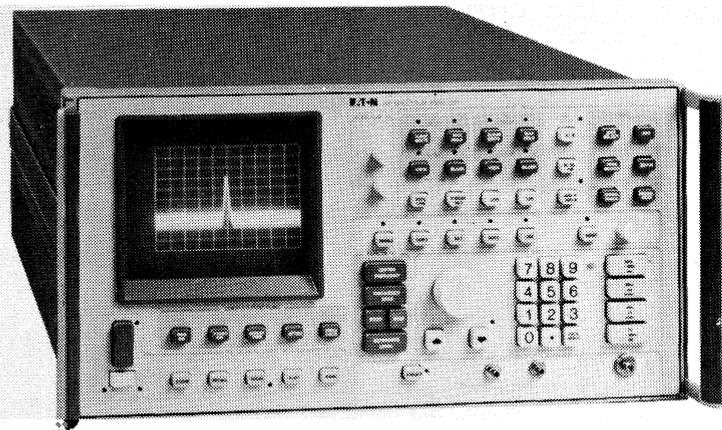
# Un analyseur de spectre 100 MHz/26,5 GHz

Par Joseph ENGEMAN et Gunther SORGER, (\*)

*Les progrès réalisés en automatisation et en « processing » de signaux numériques ont grandement contribué à l'amélioration des instruments de mesure HF et hyperfréquence durant la dernière décennie.*

*Les analyseurs de spectre, particulièrement, ont grandement bénéficié de l'automatisation par microprocesseur. Cependant, leurs paramètres des performances HF de base sont pratiquement restés inchangés depuis que les filtres à YIG (présélecteurs) sont apparus comme partie intégrante du circuit d'entrée, il y a plus de 15 ans.*

*Récemment commercialisé, l'analyseur de spectre Ailtech modèle 787 est notamment caractérisé par des solutions très intéressantes au plan technique dont on peut dire qu'elles ont sensiblement fait progresser la conception de ce type d'appareil.*



L'analyseur de spectre modèle AILTECH 787 fait faire un grand pas en avant aux caractéristiques de réception de l'analyseur de spectre. Les réductions de la valeur du facteur de bruit et des signaux parasites ainsi que des niveaux de compression élevés ont été combinées afin de fournir des améliorations de la gamme dynamique de l'ordre de 20 à 40 dB.

## Généralités

Le standard IEEE des analyseurs de spectre (IEEE standard 748-1979) définit la gamme dynamique d'un analyseur de spectre comme étant le rapport maximal de deux signaux présents simultanément à l'entrée et pouvant être mesurés avec une précision bien spécifiée. Cette gamme est nécessairement limitée par le niveau de bruit moyen (à l'extrémité inférieure) et par le point de compression à 1 dB (à l'extrémité supérieure). Le standard divise également cette définition en 3 catégories séparées qui, généralement, ont des spécifications différentes. Les deux premières sont relatives aux produits de distorsion de l'analyseur, tandis que la troisième concerne sa gamme dynamique de visualisation.

### Gamme dynamique harmonique :

C'est le rapport maximal de deux signaux, sinusoïdaux, en relation harmonique présents en même temps à l'entrée qui peuvent être mesurés avec une précision bien spécifiée.

### Gamme dynamique non harmonique :

C'est le rapport maximal de deux signaux sinusoïdaux, qui ne sont pas en relation harmonique, présents en même temps à l'entrée et qui peuvent être mesurés avec une précision bien spécifiée.

### Gamme dynamique de visualisation :

C'est le rapport maximal de deux signaux sinusoïdaux qui ne sont pas en relation harmonique, chacun d'entre eux pouvant être mesuré simultanément sur l'écran avec une précision bien spécifiée. L'utilisateur de l'analyseur de spectre doit être concerné par ces 3 cas de figure.

## Niveau de bruit moyen

Examinons d'abord la limite des performances à bas niveau du 787. Son niveau de bruit moyen typique, dans une bande passante de 10 Hz, est donné dans le Tableau I.

Tableau I : Niveau de bruit moyen de l'analyseur AILTECH 787

Gamme de fréquences (GHz)	Niveau de bruit moyen (- dBm/10 Hz)
0,001 - 0,125	- 153
0,1 - 1,5	- 146
0,7 - 3,5	- 149
3,3 - 8,3	- 141
8 - 16,3	- 139
15 - 26,5	- 136

(\*) EATON CORPORATION.

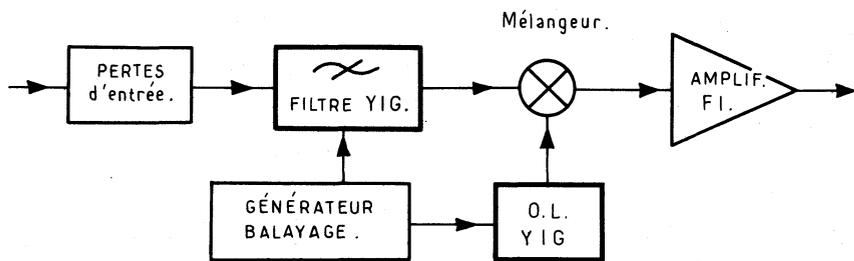


Fig. 1 : Ce récepteur, avec présélection YIG, couvre la gamme de fréquence de 2 à 22 GHz.

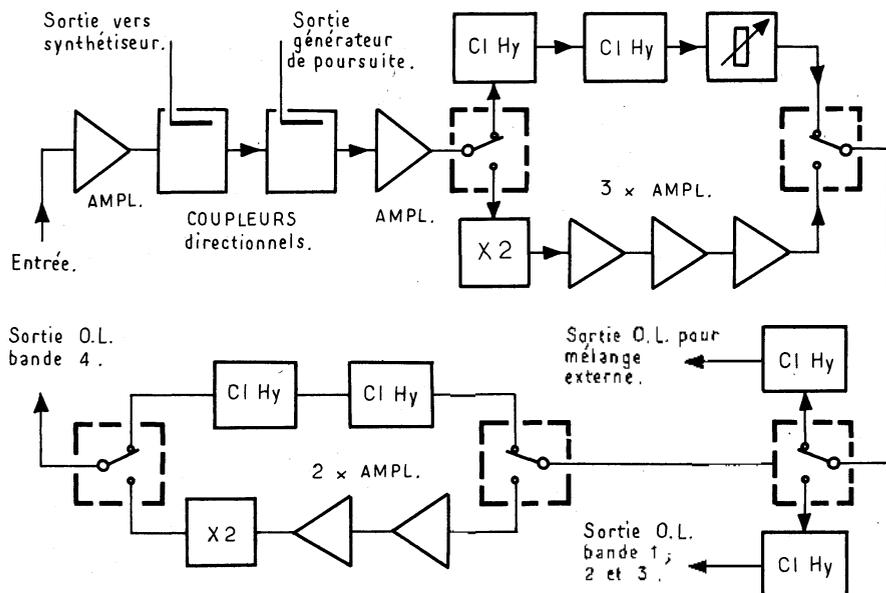


Fig. 3 : La partie complète récepteur du 787 est réalisée à partir de la technique des circuits intégrés hyperfréquences (CIHy), ce qui minimise la taille, le poids, et le nombre d'interconnexions. Le module contient 23 sous-ensembles séparés.

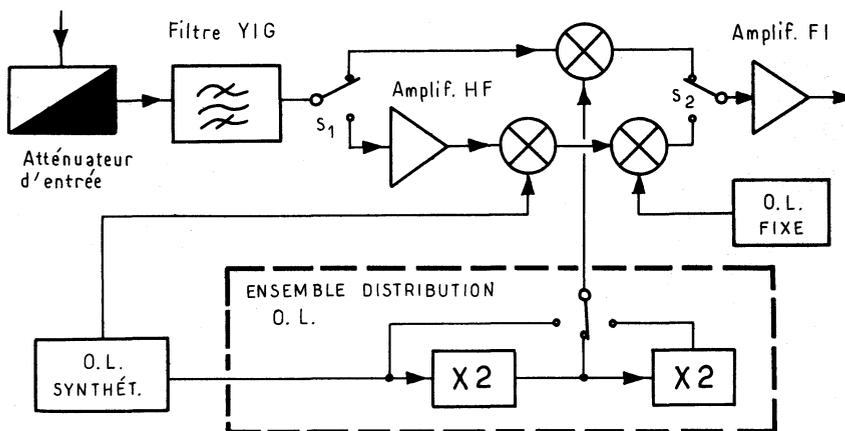


Fig. 2 : Dans l'analyseur de spectre 787, le circuit inférieur entre S1 et S2 utilise une conception à conversion en fréquence haute et incorpore le préamplificateur pour améliorer le facteur de bruit.

Pour apprécier ces résultats, il faut savoir que la valeur moyenne du niveau de bruit d'un analyseur de spectre standard est de  $-135$  dBm/10 Hz à 10 MHz, et seulement  $-115$  dBm/10 Hz à 18 GHz.

Pour mieux comprendre comment ce très faible niveau de bruit a été obtenu sur le 787, il convient de rappeler la conception d'un analyseur de spectre classique.

Ce sont, en général, des récepteurs hétérodynes où l'oscillateur local est balayé d'une manière répétitive sur une gamme de fréquences qui correspond directement, ou à l'aide d'une relation harmonique, à la fréquence à mesurer. Un bloc diagramme simplifié d'un récepteur à conversion de fréquence, avec présélection YIG, couvrant la gamme 2 à 22 GHz, est représenté figure 1.

Les niveaux de bruit moyen de ce récepteur conventionnel ( $-135$  dBm à  $-115$  dBm/10 Hz) sont 30 à 50 dB au-dessus de ceux d'un récepteur idéal pour deux raisons principales :

- 1) Les pertes de transmission entre l'entrée et le premier amplificateur sont très importantes. Elles sont dues :
  - à la perte d'insertion de l'atténuateur ;
  - aux pertes de circuits de commutation et des réseaux d'adaptation ;
  - au présélecteur filtre YIG ;
  - à la perte de conversion du mélangeur et au facteur de bruit du premier amplificateur FI.

- 2) Le mélange harmonique, utilisé pour une large gamme de fréquences, augmente la perte de conversion à chaque multiplication.

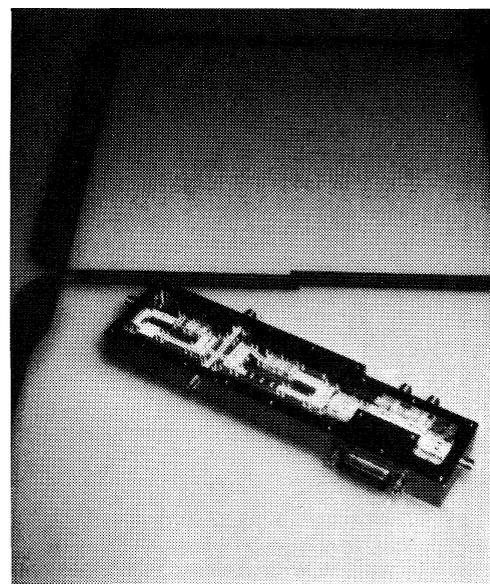


Fig. 4 : Photo du circuit intégré hyperfréquence.

Une solution simple à ces problèmes consisterait à ajouter un préamplificateur à l'entrée de l'analyseur afin de compenser les pertes et d'obtenir ainsi un meilleur facteur de bruit.

On peut effectivement utiliser cette solution mais, sans changer en même temps le niveau de compression du circuit d'entrée ; dans ce cas, le résultat final sera simplement un décalage de la gamme dynamique sans l'augmenter.

Le modèle 787 a tenu compte de ces considérations pour les fréquences jusqu'à 3,5 GHz en incorporant des préamplificateurs HF tout en maintenant un niveau de compression supérieur à 8 dBm. Pour surmonter la seconde difficulté, le modèle 787 utilise le *mélange fondamental* pour toutes les fréquences jusqu'à 26,5 GHz.

La perte de conversion due au mélange harmonique a été aussi éliminée et le résultat final donne un récepteur très sensible avec une grande gamme dynamique.

Dans le 787, le circuit inférieur entre S1 et S2 (Fig. 2) utilise le principe de la conversion en fréquence supérieure et incorpore le préamplificateur pour améliorer le facteur de bruit.

Le circuit supérieur obtient une amélioration en gain en utilisant le mélange fondamental.

Le 787 utilise un oscillateur local synthétisé qui permet une grande précision et une très bonne stabilité. Un soin tout particulier a été apporté dans sa conception afin d'obtenir un bruit de phase et des niveaux de signaux para-

sites très faibles, ce qui permet au 787 de mesurer directement les bruits de phase des signaux HF. Cet oscillateur peut générer des pas de fréquence jusqu'à 1 Hz.

Tableau II : Niveau bruit moyen - Mélangeurs externes

Gamme de fréquence (GHz) (*) guide d'onde	Rang harmonique	Niveau bruit moyen (- dBm/MHz)
26,5 - 40	3	
33 - 50,1	4	- 82
40 - 50	4	- 80
50 - 75	6	- 78
60 - 90	6	- 76
75 - 110	8	- 72
		- 69

(\*) Des mélangeurs allant jusqu'à 220 GHz sont également disponibles.

La partie entière récepteur du 787 a été construite en utilisant les techniques du circuit intégré hyperfréquences, ce qui minimise la taille, le poids et le nombre d'interconnexions. Le bloc diagramme complet de la distribution de l'oscillateur local est présenté figure 3.

On peut noter que le module entier contient 23 sous-ensembles séparés. Une autre amélioration dont profite l'utilisateur, à partir d'un tel système intégré, est la performance réelle de l'analyseur. La réponse en fréquence, non corrigée, de la bande de fréquence 0,1 à 1,5 GHz (fig. 5) a une variation maximum de  $\pm 0,5$  dB. La réponse en fréquence de 18 à 26 GHz (fig. 6) a une variation maximale, non corrigée, de  $\pm 2,5$  dB.

## Filtre YIG à basse fréquence

Comme mentionné précédemment, tout utilisateur est directement concerné par les produits de distorsion qui limitent la gamme dynamique utilisable. Ces différents produits sont peu importants généralement au-dessus de 2 GHz dans les analyseurs conventionnels car ils sont réduits d'une manière significative par le filtre YIG d'entrée.

Cependant, en dessous de 2 GHz, l'utilisateur doit être spécialement attentif à ne pas confondre ces signaux avec sa mesure. Grâce à la conception des filtres YIG (brevet déposé) développés par les Docteurs *Sorger* et *D. Raicu* au Centre de Recherche et de Développement de *Eaton*, l'analyseur de spectre 787 fournit une présélection sur toute la gamme de 100 MHz à 26,5 GHz.

Ceci a pour résultat d'éliminer presque complètement le problème des produits de distorsion qui compliquent toujours les mesures. De plus, l'utilisateur bénéficie de deux avantages supplémentaires :

- Le mélangeur d'entrée est protégé jusqu'à 100 MHz : en effet, le filtre YIG est capable d'absorber une puissance importante et bloque les tensions continues.
- L'émission oscillateur-local au connecteur d'entrée, qui résulte d'une faible isolation entre les portes OL et HF d'un mélangeur typique, est bloquée. De plus, cela empêche toute interaction avec les circuits à analyser.



Fig. 5 : La réponse en fréquence non corrigée de la bande 0,1 à 1,5 GHz a une variation maximale de seulement  $\pm 2,5$  dB.

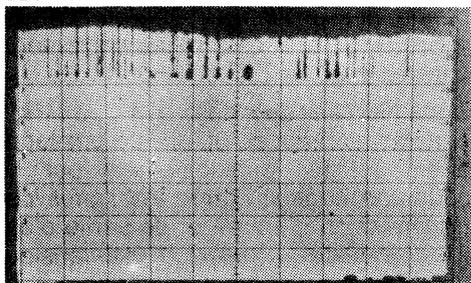


Fig. 6 : La réponse des fréquences de 18 à 26 GHz a une platitude typique non corrigée de  $\pm 2,5$  dB.

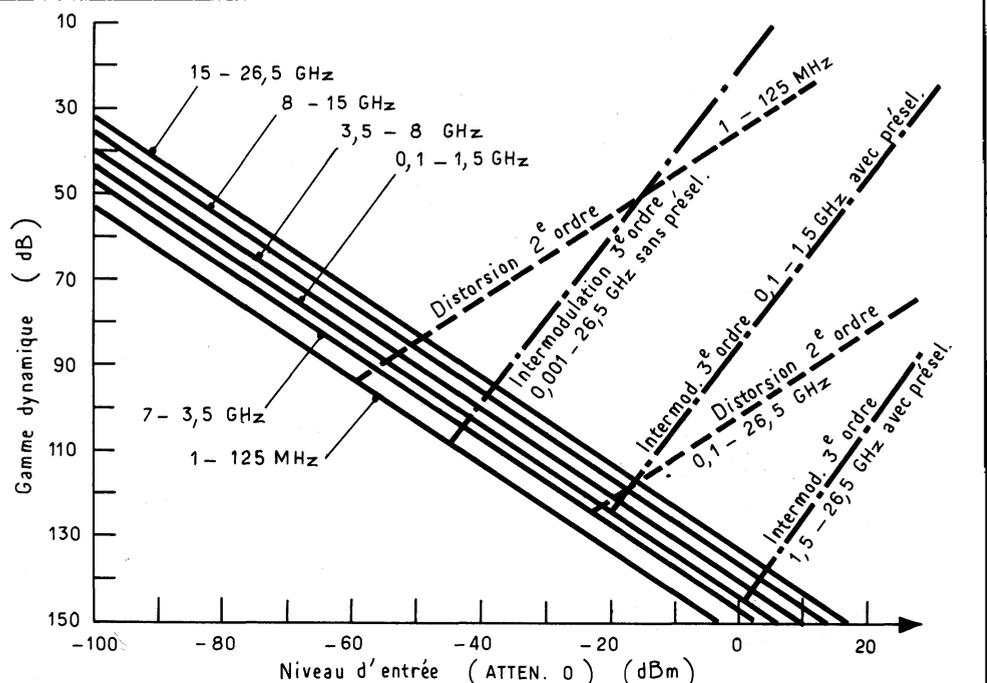


Fig. 7 : Dans la bande 100 à 1 500 MHz, la présélection YIG fournit une réjection minimum de 30 dB et, entre 1,5 et 26,5 GHz, elle est d'au moins 60 dB.

Pour les fréquences comprises entre 100 et 1 500 MHz, la présélection de l'appareil fournit une rejection minimale de 30 dB.

Entre 1 500 MHz et 26,5 GHz, la rejection est d'au moins 60 dB.

L'effet de ce filtrage sur la gamme dynamique optimale est représenté graphiquement sur la figure 7. Au premier coup d'œil, cette figure peut paraître confuse, mais examinons plus en détail la manière dont elle a été tracée et comment on doit l'utiliser.

La gamme dynamique (axe vertical) est comprise entre 0 dB, le point d'interception où le signal et les parasites ont le même niveau, et une faible valeur qui représente typiquement le même nombre en dB, que le meilleur niveau moyen de bruit en dBm.

Etant donné que le niveau d'entrée, sur l'axe horizontal, est tracé à la même échelle que la gamme dynamique, le niveau de bruit moyen de chaque bande tombera sur les lignes inclinées à 45° croissant vers la gauche de la figure. Les limites du second harmonique et des deux harmoniques du troisième ordre sont tracées jusqu'à leur point d'interception avec leur pente appropriée.

En utilisant ce graphique, on peut maintenant déterminer que, pour des fréquences comprises entre 100 MHz et 26,5 GHz, et pour les niveaux d'entrée de 0 dBm ou moins, tous les produits harmoniques de second ordre sont inférieurs de 100 dB, l'utilisateur ne les verra jamais sur l'écran.

Entre 100 et 1 500 MHz, on obtient une amélioration de 60 dB en ce qui concerne les produits d'intermodulation du 3<sup>e</sup> ordre avec le 787, par rapport aux autres instruments sans présélection.

Cette amélioration est de 120 dB pour les fréquences comprises entre 1 500 MHz et 2 GHz. Ainsi on élimine virtuellement toute erreur d'analyse des signaux réels par rapport aux faux signaux dûs à la distorsion.

De plus, l'appareil fournit une gamme dynamique écran de 100 dB. Ceci permet la visualisation simultanément des signaux erratiques à bas niveaux générés par le dispositif à tester et de la sortie haute puissance de ce même dispositif. En conséquence, tout effet de changement ou de réglage de circuit peut être rapidement observé sur le signal principal et sur les signaux parasites.

### Mesures EMI et mesures sur autres impulsions

L'analyseur de spectre est en train d'obtenir une acceptation de plus en plus grande dans le domaine de la me-

sure EMI, principalement à cause du gain de temps pour la mesure. Bien qu'il soit vrai que les analyseurs ne répondent pas à toutes les spécifications MIL-STD 461, CISPR, VDE, FCC, etc... ils offrent néanmoins l'avantage de balayer une très grande gamme de fréquence pour localiser les problèmes particuliers.

De plus, l'analyseur offre un meilleur moyen de localiser rapidement un signal d'interférences intermittent.

Dû au fait que nous sommes concernés par des signaux large bande, dans la plupart de ce type de mesure, la meilleure gamme dynamique est obtenue en utilisant le filtre le plus large sur l'analyseur.

Cette nécessité provient de ce que les signaux large bande sont des impulsions périodiques et que de plus, la tension crête variera proportionnellement avec la bande passante.

Ainsi, une augmentation d'un facteur de 10 de la bande passante provoquera une augmentation de tension crête de 20 dB. Cependant, la puissance de bruit erratique de l'analyseur n'augmentera que de 10 dB.

Un autre point à garder en mémoire lorsqu'on travaille sur des signaux de bruit en impulsion est le suivant : une bande passante en impulsion doit être définie pour l'analyseur lui-même plutôt que d'utiliser la bande passante à 3 dB.

Dans la plupart des applications, l'utilisation de la bande passante à 6 dB est une bonne approximation.

L'utilisation de l'analyseur pour la mesure de signaux large bande est fortement pénalisante : en effet, on note une perte importante de la gamme dynamique, même si on utilise l'analyseur sur sa bande passante la plus large.

Cette perte résulte de la saturation du circuit d'entrée. Le niveau de la tension crête qui provoque la compression dans l'analyseur reste constante, qu'elle soit due à un signal sinusoïdal simple ou à une impulsion très étroite qui se transforme en une multitude de raies spectrales sur la bande passante d'entrée.

Par exemple, soit un signal d'entrée en impulsion d'une densité spectrale constante sur la bande 1500 MHz ; la réduction de gamme dynamique d'un analyseur de spectre avec une bande passante d'entrée de 1500 MHz et une bande passante FI de 3 MHz (bande passante en impulsion de 4 MHz), sera donnée par l'expression suivante :

$$DR = 20 \text{ Log } \frac{BW 1500}{BW 4}$$

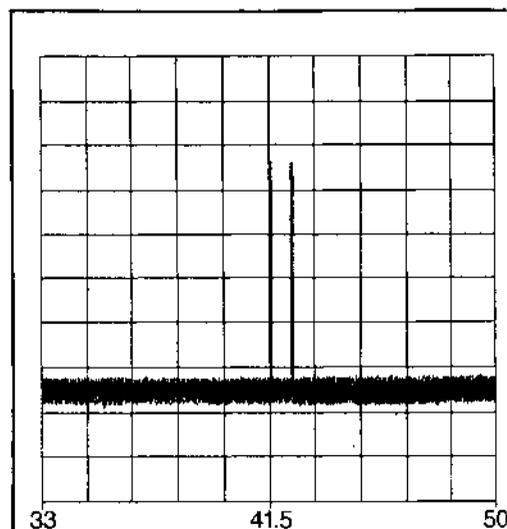


Fig. 8 : Si l'on choisit un début de balayage à 33 GHz et une fin de balayage à 50 GHz, nous verrons les deux réponses de la 4<sup>e</sup> harmonique sur l'écran.

DR = 51 dB,

DR = réduction dynamique.

En supposant que l'analyseur a un niveau de compression de -10 dBm (ou 97 dBμV pour utiliser les unités EMI), la limite supérieure de la gamme dynamique devient :

$$97 - 51 = 46 \text{ dB}\mu\text{V}.$$

La limite inférieure est déterminée par le niveau de bruit moyen. Typiquement, pour une bande passante de 3 MHz, cette valeur est de -80 dBm ou 27 dBμV. La gamme totale utilisable est alors :

$$46 - 27 = 19 \text{ dB}.$$

L'analyseur EATON 787 fournit une plus grande gamme dynamique pour trois raisons :

- Son niveau de compression supérieur de 10 dB ;
- Son facteur de bruit inférieur de 10 dB ;
- Sa présélection de 100 MHz à 26,5 MHz.

Le présélecteur, en bande basse, contribue à l'amélioration de la gamme dynamique. Le présélecteur a une bande passante en impulsion d'environ 20 MHz qui reste raisonnablement constante entre 100 et 1 500 MHz.

Dans le pire des cas, à 1 500 MHz, son isolation est de 30 dB. Le passage direct est fait principalement par le couplage capacitif entre les lignes de transmission d'entrée et de sortie d'où il en résulte un rapport de tension entrée/sortie qui est proportionnel à la fréquence. Ainsi, le rapport moyen de tension, en dehors de la bande passante, est égal à :

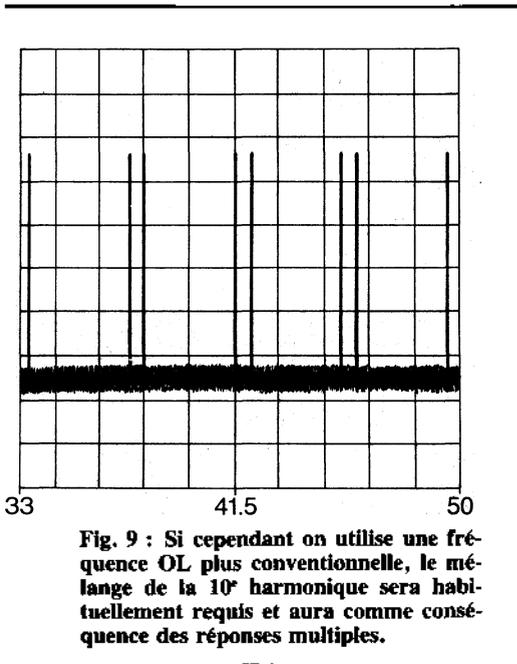


Fig. 9 : Si cependant on utilise une fréquence OL plus conventionnelle, le mélange de la 10<sup>e</sup> harmonique sera habituellement requis et aura comme conséquence des réponses multiples.

$$R_v = \frac{1}{1500} \int_0^{500} R_v(F) dF \quad (2)$$

$$R_v = \frac{1}{1500} \int_0^{500} \frac{0,03 F}{1500} dF$$

$$R_v = 0,015 \text{ ou } 36 \text{ dB}$$

Pour calculer une bande passante équivalente pour ce rapport, on doit soustraire 3 dB pour la perte d'insertion et résoudre, l'équation suivante :

$$R = 20 \text{ Log } \frac{BW \cdot 1500}{BW_{eq}}$$

$$(36 - 3)/20 = \text{Log } \frac{1500}{BW_{eq}} \quad (3)$$

$$Bp \text{ équivalente} = 34 \text{ MHz}$$

La réduction totale de la dynamique, pour le 787, sur un signal en impulsions, est alors :

$$\Delta DR = 20 \text{ log } \frac{20 + 34}{4}$$

$$\Delta DR = 23 \text{ dB}$$

Le présélecteur d'entrée augmente la dynamique de  $51 - 23 = 28 \text{ dB}$  pour un signal en impulsions.

En ajoutant à cela l'amélioration de 10 dB du point de compression plus 10 dB pour son faible facteur de bruit, on obtient alors une augmentation totale de la dynamique de 48 dB par rapport aux analyseurs conventionnels.

### Sensibilité accrue avec mélangeurs externes

Un des avantages d'un oscillateur local à très haute fréquence, la réduction

de perte de conversion, a déjà été discuté. Cependant, lorsque ce type d'oscillateur est appliqué à l'analyse hyperfréquences, en utilisant des mélangeurs à guide d'onde avec l'analyseur de spectre, les avantages sont encore plus importants. En effet, non content d'avoir de faibles pertes, le nombre de signaux indésirables sur l'écran est grandement réduit.

L'approche du mélange fondamental utilisé sur le 787 fournit un signal de sortie de l'oscillateur local entre 8 et 16 GHz. Le niveau de sortie de ce signal est de  $\pm 10 \text{ dBm}$ .

Certains mélangeurs sont disponibles chez différents constructeurs : ils acceptent ce signal de l'oscillateur local et le convertissent en fréquence intermédiaire exploitable.

Deux connecteurs SMA sont montés sur le panneau avant, ce qui permet une interconnexion simple entre l'analyseur et le mélangeur à guide d'onde.

Pour illustrer les avantages d'utilisation d'une fréquence élevée pour l'oscillateur local, examinons la bande 33 à 50 GHz.

Le 787 est calibré pour utilisation du mélangeur sur le 4<sup>e</sup> harmonique. Si l'on choisit un début de balayage à 33 GHz et une fin de balayage à 50 GHz, nous verrons les deux réponses du 4<sup>e</sup> harmonique sur l'écran,

les bandes latérales inférieure et supérieure, comme le montre la figure 8. Notons que si l'on utilise un filtre passe-haut à 8 GHz pour éliminer la sous-harmonique  $2 F_0$ , l'écran ne montrera aucune autre réponse linéaire que la fréquence désirée et son image.

Les réponses dues aux harmoniques de 3<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> rang sont hors écran.

Si, cependant, on utilise une fréquence OL plus conventionnelle, le mélange de la 10<sup>e</sup> harmonique sera habituellement utilisé et aura comme conséquences des réponses multiples comme le montre la figure 9.

Les très faibles valeurs du niveau de bruit moyen dans la bande de 1 MHz (données par le tableau II avec mélangeur externe) résultent de la faible perte de conversion. Cette sensibilité supérieure et la quasi-absence de signaux indésirables rendent le 787 idéal pour l'analyse des signaux dans la bande millimétrique.

Etant donné que le point de compression des mélangeurs hyperfréquences est typiquement 0 dBm à cause de la forte puissance O.L. (+ 10 dBm), la gamme dynamique en dB est égale au niveau de bruit moyen donné au-dessus de -82 dB, et ceci entre 26,5 et 40 GHz.

J.G. et G.S.

## getelec

### le spécialiste français des produits de blindage EMI/RFI

propose une solution aux problèmes de

- **Silicone isolant** (fluoré ou non suivant les applications)
- ✦ **Joint conducteur** surmoulé

- joints co-extrudés
- joints moulés
- joints découpés
- vulcanisation directe sur capots en nos ateliers

## getelec