

Les progrès de la technologie des semiconducteurs ont permis la réalisation de circuits intégrés pouvant fonctionner à des fréquences de plusieurs GHz, que l'on nomme MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits), notamment des familles d'amplificateurs large bande, cascadables, présentant des impédances d'entrée et de sortie de 50 Ω. Ces petits amplificateurs, qui se présentent en boîtier à quatre broches, ont été popularisés par AvanteK (aujourd'hui division de Hewlett Packard) avec la famille MSA et Mini-circuits avec la famille MAR. Ils représentent pour les amateurs et les professionnels un progrès considérable grâce à leurs performances, à leur simplicité d'emploi et à leur faible coût.

Guide d'utilisation des amplificateurs large bande intégrés (MMIC)

F6CSX Joël Redoutey

Constitution

Les amplificateurs des familles MAR et MSA sont des circuits intégrés monolithiques bipolaires silicium. Leur structure interne est constituée d'une paire de transistors montés en Darlington avec une double contre réaction, en série par l'intermédiaire de la résistance RE et en parallèle entre sortie et entrée par l'intermédiaire de la résistance RF, comme le montre le **figure 1**. La résistance Rb contribue à la stabilité du point de repos de l'ensemble.

L'alimentation s'effectue à partir de la source de tension continue Vcc par l'intermédiaire de la résistance extérieure Rc et de la self de choc RFC.

Les condensateurs C1 et C2 servent à bloquer la composante continue en entrée et en sortie. Leur valeur n'est pas critique mais doit présenter une impédance $Z = 1/2 \pi fC$ faible devant 50 Ω à la fréquence de travail la plus basse. Aux fréquences élevées, c'est l'inductance parasite de ces condensateurs qui limite les performances (on utilisera de préférence des condensateurs CMS).

Le condensateur C3 sert au découplage de l'alimentation.

Établissement du point de fonctionnement optimal

Pour chaque circuit, le constructeur spécifie un point de fonctionnement optimal, c'est à dire la tension continue Vd entre la broche de sortie et la masse et le courant Id consommé par cette broche. Le **tableau** en bas de page donne le point de fonctionnement optimal des circuits les plus courants.

Le circuit étant alimenté par une source de tension continue Vcc, le calcul de la résistance Rc est très simple :

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_d}{I_d}$$

Par exemple, le circuit MAR 4 est spécifié à Vd = 5,25 V et Id = 50 mA.

Si l'on désire l'alimenter à partir d'une source Vcc = 12 V on a :

$$R_c = \frac{12 - 5,25}{0,05} = 135 \Omega$$

La puissance dissipée dans cette résistance est alors de :

$$P = R_c \cdot I_d^2 = 135 \cdot 0,05^2 = 0,34 \text{ W}$$

On utilisera par exemple deux résistances de 270 Ω - 1/4 W montées en parallèle.

Hewlett Packard	MSA 0185	MSA 0285	MSA 0385	MSA 0485	MSA 0685	MSA 0785	MSA 0885	MSA 1104
Mini-circuits	MAR1	MAR2	MAR3	MAR4	MAR6	MAR7	MAR8	MAV11
Vd (V)	5	5	5	5,25	3,5	4	7,8	5,5
Id (mA)	17	25	35	50	16	22	36	60

Figure 1
Schéma de principe d'un amplificateur à MMIC.

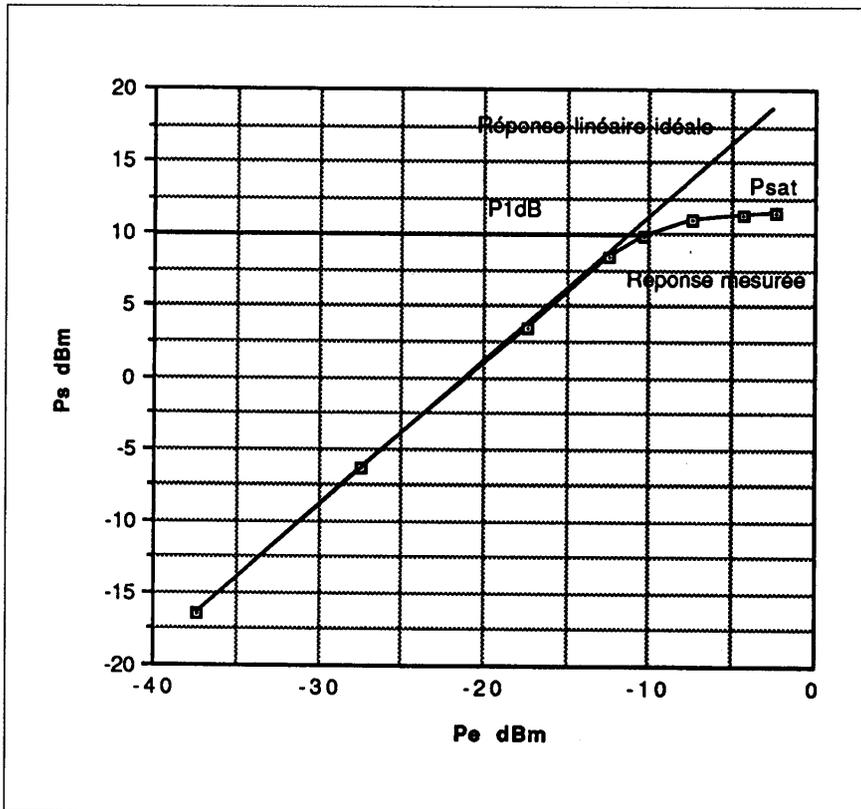
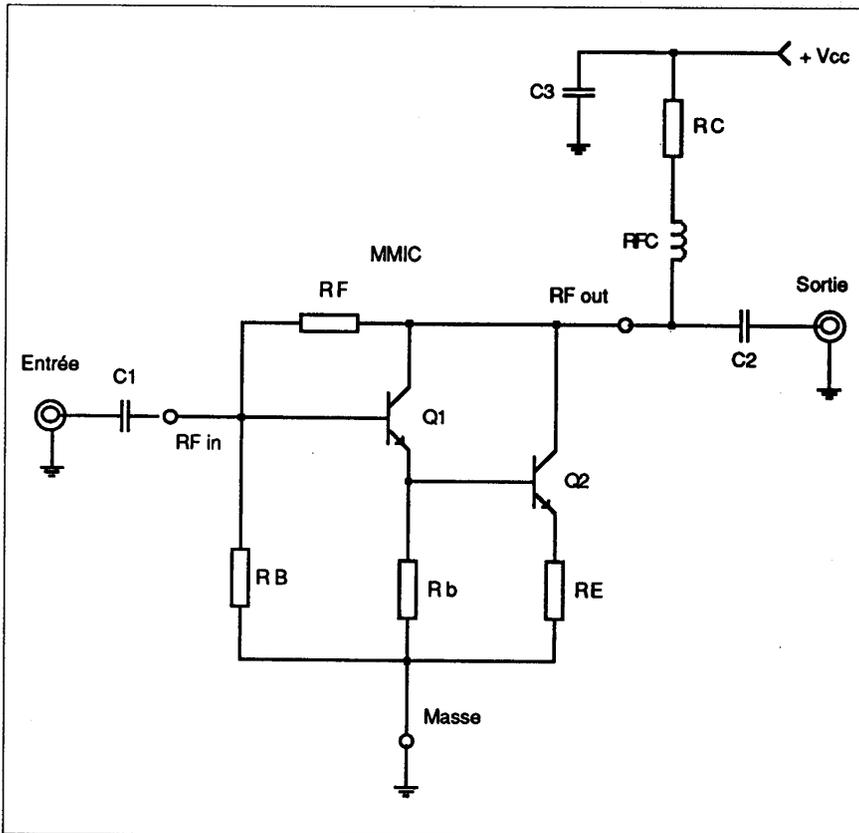


Figure 2
Courbe de réponse d'un amplificateur linéaire montrant l'effet de compression du gain à fort niveau.

Lorsqu'on utilise des circuits à faible consommation comme le MAR 1 (17 mA) ou lorsque la tension d'alimen-

tation est élevée, donc quand la valeur de Rc est grande, on peut omettre la self de choc. Cependant, dans la majorité

des cas il est préférable de la conserver. En effet, sans self de choc, la résistance Rc se trouve connectée en parallèle avec la sortie de l'amplificateur, ce qui provoque une désadaptation se traduisant par une chute du gain et de la puissance disponible. Une bonne règle consiste à utiliser une self de choc dont l'impédance à la fréquence de travail la plus basse soit environ dix fois supérieure à l'impédance de sortie, soit 500 Ω. On en déduit la valeur de l'inductance à utiliser :

$$Z = 2 \pi f L \text{ d'où } L = \frac{Z}{2 \pi f}$$

$$\text{soit ici } L = \frac{500}{2 \pi f}$$

$$\text{ou encore } L (\mu\text{H}) = \frac{80}{f (\text{MHz})}$$

Principales caractéristiques

Lorsque le point de fonctionnement continu est correctement établi, on peut attendre du montage des performances très proches de celles qui sont spécifiées dans la notice du constructeur. Sans entrer dans le détail de toutes les caractéristiques, notamment en ce qui concerne les paramètres S, nous allons passer en revue celles qui sont essentielles pour une bonne utilisation.

Gain et bande passante

Le gain en puissance du circuit est une caractéristique fondamentale. Rappelons qu'il est toujours exprimé en décibels et par définition s'exprime par la relation :

$$G_p (\text{dB}) = 10 \log \frac{P_s}{P_e}$$

où Pe représente la puissance d'entrée et Ps la puissance de sortie (exprimées dans la même unité !).

Le gain est une caractéristique qui dépend de la fréquence. Le constructeur fournit donc le plus souvent une courbe de variation du gain en fonction de la fréquence (toujours décroissante, voir figure 4).

La bande passante est définie comme l'intervalle de fréquence dans lequel le gain reste constant à 3 dB près.

Selon la constitution interne du circuit, la courbe de gain peut avoir une allure plus ou moins plate.

Par exemple les MSA 02 et MAR 2 présentent une bande passante à 3 dB s'étendant du continu à 2,6 GHz, avec un gain de 12 dB quasiment constant du continu à 1 GHz.

En revanche, les MSA 08 et MAR 8 sont

peu « contre-réactionnés » et possèdent un gain très élevé (30 dB à 300 MHz) qui chute régulièrement pour atteindre 6 dB entre 5 et 6 GHz.

L'utilisation de ces deux types de circuits n'est évidemment pas la même et selon les applications on choisira l'amplificateur le mieux adapté selon des critères que nous verrons plus loin.

Puissance de sortie et linéarité

Les circuits que nous étudions sont des amplificateurs linéaires, mais comme tous les amplificateurs, dans les limites de leurs possibilités (prenez un amplificateur opérationnel comme le 741, alimenté en ± 15 V, fixez lui un gain de 100 et mettez 1 V à l'entrée ; qu'obtenez vous à la sortie ?). Lorsque la puissance de sortie de l'amplificateur se rapproche de son maximum, la linéarité se dégrade, c'est-à-dire que la puissance de sortie devient inférieure au produit de la puissance d'entrée par le gain à faible niveau du circuit (**figure 2**).

Fonctionnement linéaire : $P_s = G_p \times P_e$
Saturation : $P_s < G_p \times P_e$.

Tout se passe comme s'il y avait compression du gain lorsqu'on s'approche de la saturation de l'amplificateur.

Pour caractériser ce phénomène, on définit la puissance de sortie à 1 dB de compression comme le niveau pour lequel la puissance de sortie chute de 1 dB par rapport à la valeur théorique $P_s = G_p \times P_e$ que l'on obtiendrait si l'amplificateur était parfaitement linéaire. La puissance de sortie à 1 dB de compression, notée P_{1dB} , s'exprime généralement en dBm et chute aux fréquences élevées (voir **figure 5**).

Rappelons que le dBm est une unité de mesure de puissance commode qui se définit par rapport à un niveau de référence fixé à 1 mW.

$$P(\text{dBm}) = 10 \log (P(\text{mW})/1\text{mW}) = 10 \log (P(\text{mW}))$$

Par exemple une puissance de 25 mW peut s'exprimer en dBm par :

$$P(\text{dBm}) = 10 \log (25) = 14 \text{ dBm}$$

Inversement, une puissance de 17 dBm correspond à :

$$P(\text{mW}) = 10^{\frac{P(\text{dBm})}{10}}$$

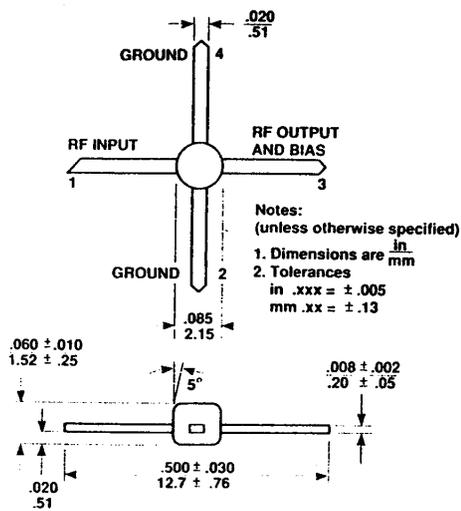
$$\text{soit } P(\text{mW}) = 10^{\frac{17}{10}} = 10^{1.7} \approx 50 \text{ mW}$$

L'intérêt de cette notation est démontré dans l'exemple suivant.

Nous savons que la puissance de sortie s'écrit $P_s = G_p \times P_e$. Prenons le logarithme

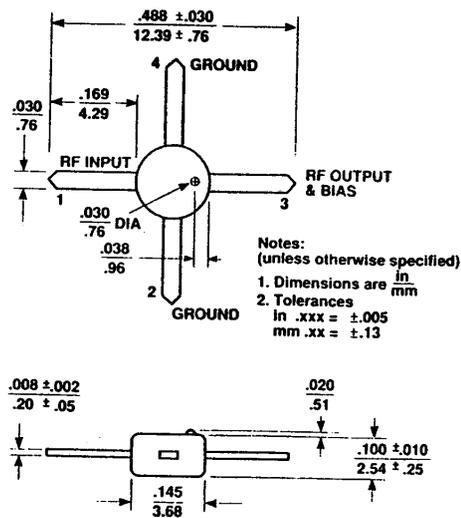
Série MAR xx et MSA xx85

85 Plastic Package



Série MAV xx et MSA xx04

04A Plastic Package



Série MAR xx/SM, MSA xx86 et INA xxx86

86 Plastic Package

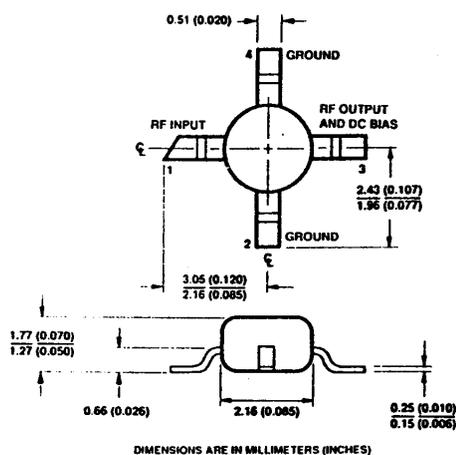


Figure 3
Brochage des différents boîtiers.

Figure 4
Évolution du gain en fonction de la fréquence.

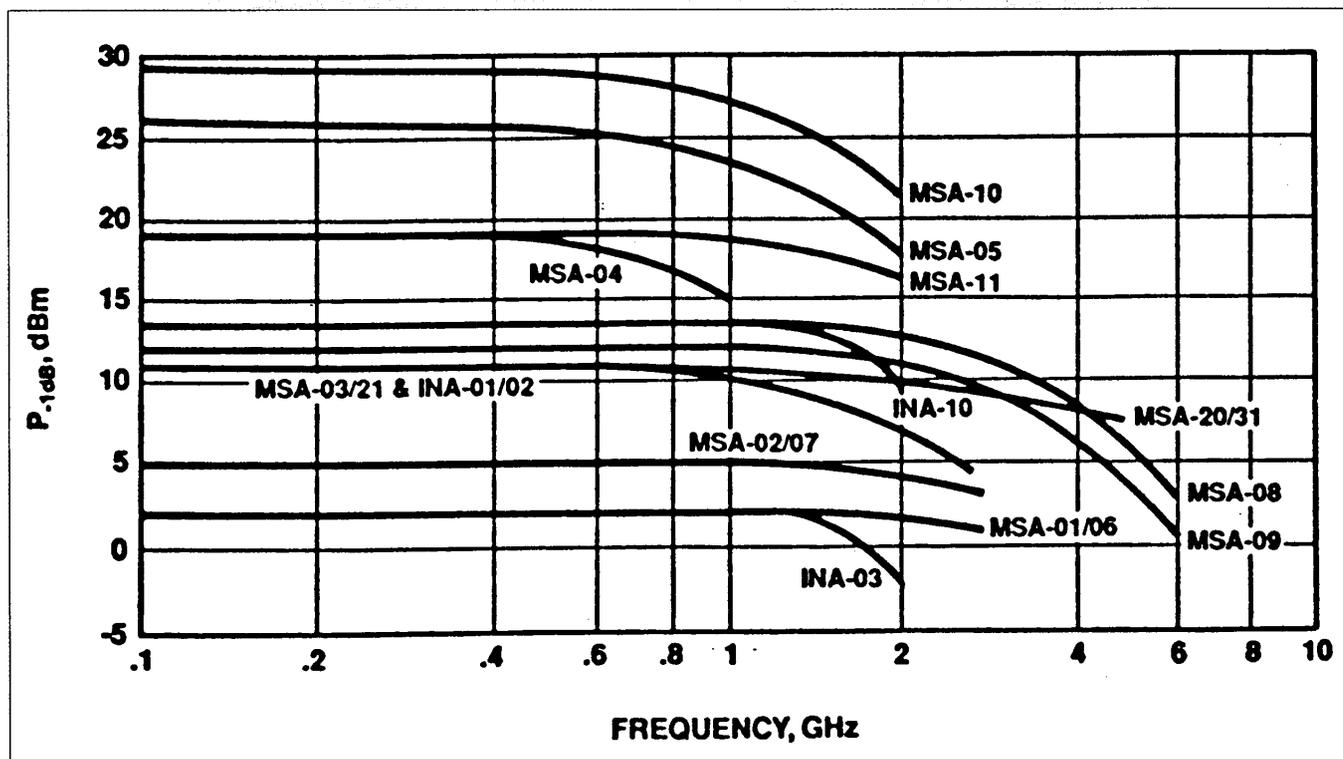
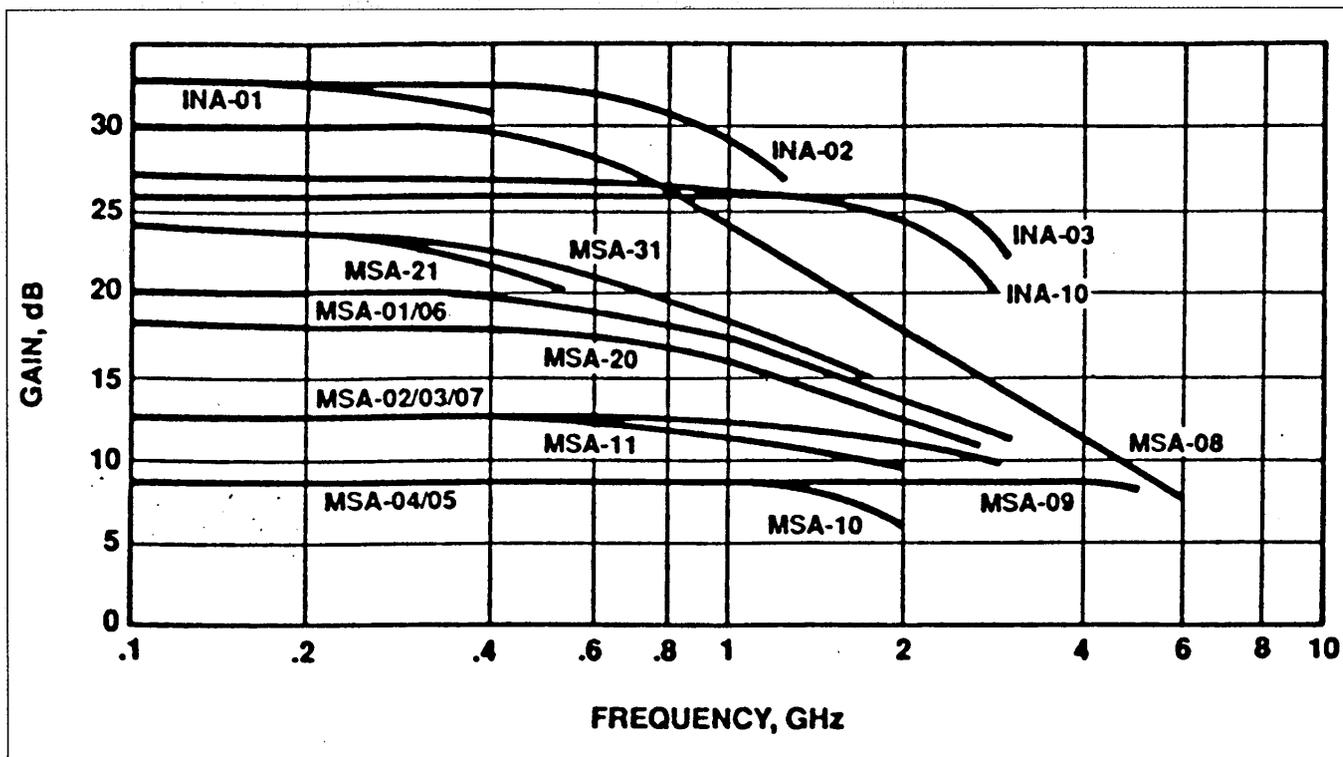


Figure 5
Évolution du point de compression à 1 dB en fonction de la fréquence.

me de cette expression :

$$\log P_s = \log (G_p \times P_e) = \log G_p + \log P_e$$

En multipliant par 10 les deux membres de cette équation, il vient :

$$10 \log P_s = 10 \log G_p + 10 \log P_e$$

c'est-à-dire :

$$P_s \text{ (dBm)} = G_p \text{ (dB)} + P_e \text{ (dBm)}$$

Autrement dit, la puissance de sortie en dBm s'obtient en ajoutant à la puissance d'entrée en dBm la valeur du gain en dB. Cette notation est extrêmement commode surtout dans les systèmes comportant plusieurs étages.

Exemple : Le gain d'un MAR 1 (ou MSA 01) est de 17,5 dB à 500 MHz.

Si l'on applique à l'entrée un signal de -20 dBm (ou 0,01 mW) on obtient en sortie un signal :

$$P_s = -20 + 17,5 = -2,5 \text{ dBm (ou } 0,56 \text{ mW)}$$

Si l'on applique maintenant un signal 10 fois plus puissant à l'entrée, on a

$$P_e \text{ (dBm)} = -10 \text{ dBm et } P_s = -10 + 17,5 = +7,5 \text{ dBm}$$

Cependant le point de compression à 1 dB du MAR 1 étant de 1,5 dBm, l'amplificateur sera saturé.

Pour éviter ceci, il suffit d'intercaler à l'entrée un atténuateur de : $7,5 - 1,5 = 6$ dB.

Le bilan global sera alors donné très simplement par :

$$P_s = -10 - 6 + 17,5 = 1,5 \text{ dBm}$$

Facteur de bruit et stabilité

Le facteur de bruit est un paramètre important pour la réalisation d'amplificateur bas niveau tel que les préamplificateurs d'antenne ou les étages d'entrée de récepteurs. Il est exprimé le plus souvent en dB et on peut l'exprimer en terme de rapport signal sur bruit par la relation :

$$NF = 10 \log \frac{S/B \text{ à l'entrée}}{S/B \text{ à la sortie}}$$

Le circuit présentant le plus faible bruit dans les familles MAR/MSA est le MAR 6 ou MSA 06 dont le facteur de bruit est inférieur à 3 dB pour des fréquences inférieures à 1 GHz.

Il existe chez Hewlett Packard des produits plus performants, notamment dans la série INA, mais les performances atteintes restent nettement inférieures à ce que l'on peut obtenir avec des composants discrets (en utilisant par exemple

un GaAs FET on arrive facilement à un facteur de bruit inférieur à 1 dB).

Le constructeur donne en général dans ses notices une courbe d'évolution du facteur de bruit en fonction de la fréquence. On notera que le facteur de bruit augmente avec la fréquence ainsi qu'avec la température (voir **figure 6**). La stabilité est un paramètre dont on parle peu et qui pourtant est primordial. La plupart des circuits de la famille des MAR/MSA sont inconditionnellement stables, ce qui veut dire que quelles que soient les conditions d'adaptation en entrée et en sortie l'amplificateur n'auto-oscille pas.

Cette propriété se traduit par un paramètre appelé facteur de stabilité et noté k , dérivé de la mesure des paramètres S . Un circuit est inconditionnellement stable si k est supérieur à 1.

Si k est inférieur à 1, le circuit est conditionnellement stable, c'est-à-dire que dans certaines conditions de désadaptation d'entrée ou de sortie, il peut se mettre à osciller. C'est notamment le cas de beaucoup de préamplificateurs lorsque l'entrée est en l'air...

Le circuit MAR 8 par exemple n'est pas inconditionnellement stable, il faudra donc prendre certaines précautions lors de son utilisation (stable si ROS < 3 en entrée et en sortie).

Impédances d'entrée et de sortie et ROS

Comme indiqué précédemment, les impédances d'entrée et de sortie sont préadaptées à 50Ω , ce qui simplifie énormément l'utilisation et permet de monter directement plusieurs étages en cascade. Pour caractériser l'adaptation d'impédance en sortie et en entrée, le constructeur donne une valeur du rapport d'onde stationnaire ROS (VSWR en anglais).

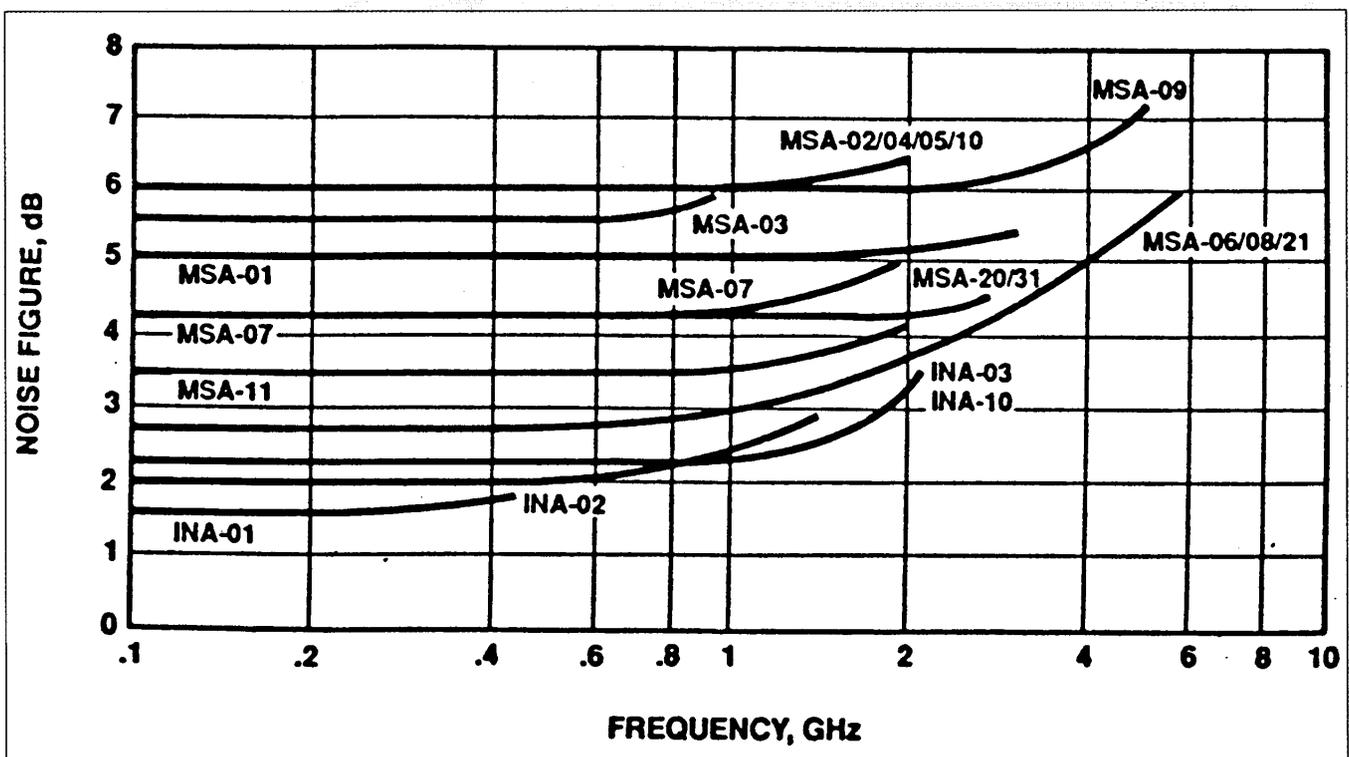
Par exemple le MAR 2 présente un ROS de 1,3 à l'entrée et de 1,6 à la sortie. On notera que le MAR 8 n'est pas adapté à 50Ω .

Équivalence

Il existe de nombreux constructeurs de circuits intégrés hyperfréquence, mais en ce qui concerne les amplificateurs, Hewlett Packard et Mini-circuits sont les plus connus.

Ces deux constructeurs proposent des familles de circuits équivalentes. Chez un constructeur donné, et dans chaque famille on trouve souvent le même produit encapsulé dans des boîtiers différents. Pour des raisons évidentes d'économie nous ne nous intéressons qu'aux boîtiers plastique. Le **tableau** page 30 donne l'équivalence des principaux circuits utilisés par les amateurs.

Figure 6
Évolution du facteur de bruit en fonction de la fréquence.



On notera que le nombre de modèles disponibles est beaucoup plus important chez Hewlett Packard.

Brochage et marquages des boîtiers

(Voir figure 3).

Mini-circuits

Chez Mini-circuits, les circuits de la famille MAR (MAR 1 à MAR 8) sont présentés en boîtier plastique à quatre broches dont le corps mesure 2,16 mm de diamètre (85 mils). La broche d'entrée est repérée par un point de peinture dont la couleur indique le type, et par une broche dont l'extrémité est coupée en biseau.

Le repérage suit le code des couleurs (MAR 1 : marron, MAR 2 : rouge, etc.) à l'exception des MAR 6 (blanc) et MAR 8 (bleu)...

Les circuits de la famille MAR peuvent aussi être obtenus en boîtier pour montage en surface (ajouter le suffixe SM). Les circuits de la famille MAV ont un corps plus gros (3,7 mm de diamètre). La broche de sortie est repérée par un index sur le plastique.

Hewlett Packard (ex-Avantek)

Chez Hewlett Packard, le choix de boîtier est très vaste. Les deux derniers chiffres de la référence précisent le type de boîtier avec la correspondance suivante : 04 : boîtier plastique 145 mils (3,7 mm, identique à la série MAV).

85 : boîtier plastique 85 mils (2,16 mm, identique à la série MAR).

86 : boîtier plastique 85 mils (2,16 mm) pour montage en surface (identique à la série MAR/SM).

On choisira de préférence le composant dans le boîtier le plus petit, car, les inductances des connexions internes étant plus faibles, les performances sont légèrement meilleures.

Guide de choix

Selon l'utilisation envisagée, le choix se portera sur tel modèle plutôt que sur tel autre. Le tableau en bas de page présente les circuits classés par critères de choix.

Pour affiner le choix, on se reportera aux courbes des figures 4 à 6 extraites du catalogue Hewlett-Packard.

La courbe de la figure 4 présente l'évolution du gain en fonction de la fréquence pour tous les circuits des familles MSA et INA, celle de la figure 5 montre la puissance de sortie à 1 dB de compression et celle de la figure 6 le facteur de bruit.

Recommandations pour la mise en œuvre

La mise en œuvre de ces composants est très simple comme nous avons pu le constater. Cependant, il faut impérativement respecter quelques règles élémentaires si l'on veut tirer le maximum de performances :

- Minimiser les longueurs de connexion. Ne pas conserver plus de 2 à 3 mm de longueur de pattes.

- En cas de réalisation sur circuit imprimé, utiliser toujours des lignes microstrip adaptées à 50 Ω (sur verre époxy G10 ou FR4 de 1,6 mm d'épaisseur avec 35 microns de cuivre, la largeur de la piste est de 2,8 mm)

- Aux fréquences élevées, un circuit en l'air très court est préférable à un mauvais circuit imprimé !

- Si l'on utilise plusieurs étages en cascade, vérifier qu'aucun des circuits ne travaille près de la saturation ; si besoin est, intercaler un atténuateur

- Ne pas choisir de circuit conditionnellement stable si vous n'avez pas une bonne expérience des circuits RF et un minimum d'appareillage de mesure.

Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons présenté les principales caractéristiques nécessaires à une bonne utilisation des amplificateurs à large bande intégrés qui représentent un pas décisif dans la simplification des circuits.

Les progrès des circuits intégrés, notamment sur Arséniure de gallium (AsGa), et la demande très forte de l'industrie liée au développement des nouvelles technologies de communication, comme la radiotéléphonie cellulaire ou la transmission de données par voie hertzienne en hyperfréquences, vont permettre la mise sur le marché de circuits très performants à faible coût (comme cela s'est produit pour les GaAs FET grâce à la démocratisation des systèmes de réception TV par satellite). Ceci devrait avoir des retombées très intéressantes dans notre domaine, notamment en ce qui concerne les bandes supérieures (2,3 GHz et au-delà).

Références

- Hewlett Packard : Communications components designer's catalog, GaAs and Silicon products, 1993.

- Mini-Circuits : RF/Microwave amplifier handbook.

Critère	Grand gain	Faible bruit	Puissance de sortie	Bande passante > 2 GHz	Gain plat
Mini-Circuits	MAR6	MAR6	MAV11	MAR2	MAR4
	MAR1	MAR8	MAR4	MAR3	MAR2
	MAR8		MAR3	MAR6	MAR3
			MAR8	MAR7	
Hewlett Packard	MSA06	MSA06	MSA1104	MSA02	MSA04
	MSA01	MSA08	MSA05	MSA03	MSA02
	MSA08	INA01	MSA04	MSA06	MSA03
	INA01	INA02	MSA03	MSA07	MSA09
	INA02		MSA08	MSA09	INA03
	INA03		INA10	INA03	INA10
	INA10			INA10	

VOTRE ASSOCIATION
SUR MINITEL