

Chapitre 4 : L'amplificateur à faible bruit

1. Introduction

L'amplificateur configuré pour un maximum de gain sert à amplifier la puissance d'un signal de niveau moyen, mais il ne peut pas détecter les petits signaux issus d'une antenne de réception par exemple. L'amplificateur à faible bruit est conçu pour être assez sensible à ce type de signaux.

2. Le bruit thermique

Le bruit thermique est une quantité aléatoire (courant/tension) due à l'agitation des électrons dans les parties résistives d'un circuit sous l'action de la température. Dans les circuits électriques, c'est le plus dominant parmi les autres types de bruit.

La puissance de bruit thermique fournit par une résistance R_N à la température T est :

$$N = kTB$$

Avec : $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ c'est la constante de Boltzmann, T c'est température du conducteur en degrés Kelvin, et B c'est la bande passante de bruit en Hertz.

3. Le bruit dans les quadripôles

3.1. Modélisation du bruit dans un quadripôle

Un quadripôle bruyant peut être modélisé par un quadripôle non bruyant qui conserve les mêmes paramètres S , avec une source de bruit placée à l'entrée. La source de bruit est la résistance équivalente de bruit du quadripôle, on la note R_N .

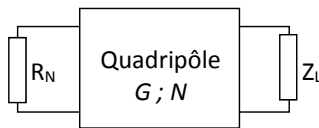


Figure 1 : Modélisation de bruit thermique d'un quadripôle.

3.2. Le facteur de bruit

Le facteur de bruit F d'un quadripôle ayant un gain G , est défini par le rapport du signal/bruit entre l'entrée et la sortie de ce quadripôle à la température normalisée $T_0=290\text{K}$ ($16,85^\circ$).

$$F = \frac{S_e/N_e}{S_s/N_s}$$

Un quadripôle non bruyant associe le même gain G au bruit et au signal, donc le rapport signal/bruit reste le même entre la sortie et l'entrée d'où $F=1$. Cela est possible si le quadripôle est réactif donc composé qu'avec des éléments réactifs (L , C , ligne sans pertes).

Un quadripôle bruyant ajoute son propre bruit noté N_p , ce qui réduit le rapport S/N à sa sortie et augmente la valeur du facteur de bruit, donc: $F \geq 1$.

Le facteur de bruit peut être mis sous la forme suivante :

$$F = \frac{N_s}{G \cdot N_e} = \frac{G \cdot N_e + N_p}{G \cdot N_e} = 1 + \frac{N_p}{G \cdot N_e} \quad \text{Avec : } N_e = kTB$$

La puissance de bruit propre du quadripôle est donc :

$$N_p = G(F - 1)kTB$$

Quand le facteur de bruit est exprimé en décibels, on l'appelle figure de bruit « Noise Figure » : $(F)_{dB} = NF = 10 \log(F)$

3.3. Le facteur de bruit d'un quadripôle dans un circuit

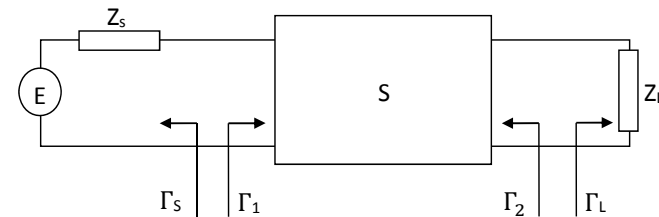


Figure 2 : Un quadripôle dans un circuit.

Le facteur de bruit d'un quadripôle alimenté par une source d'impédance interne Z_s (Figure 2), est donné par l'expression :

$$F = F_{min} + 4r_n \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{opt}|^2}{(1 - |\Gamma_s|^2)|1 + \Gamma_{opt}|^2} \dots (1)$$

Avec :

- F_{min} : C'est le facteur de bruit minimum du quadripôle.
- $r_n = \frac{R_n}{Z_0}$: C'est la résistance équivalente de bruit (réduite).
- Γ_{opt} : Le coefficient de réflexion optimal de la source (l'entrée) qui permet d'obtenir le facteur de bruit minimum.
- Γ_s : Le coefficient de réflexion de la source.

Le facteur de bruit dépend de deux paramètres qui sont propres au quadripôle (F_{min} et r_n) et de l'impédance présente à l'entrée.

3.4. Le facteur de bruit d'un système de quadripôles en cascade

Soit n quadripôles Q_i en cascade. Pour le quadripôle Q_i , le facteur de bruit est F_i et le gain par G_i . Alors le facteur de bruit de système s'écrit :

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}} \dots (2)$$

Le facteur de bruit du système tend vers le facteur de bruit du premier quadripôle.

Donc logiquement on a intérêt à placer un quadripôle à faible bruit et à gain élevé comme premier étage d'une chaîne en cascade, ainsi son gain masque le bruit apporté par les étages suivants.

4. L'amplificateur à faible bruit

4.1. Définition

Nous avons déjà vu que pour optimiser le bruit dans une chaîne en cascade, il faut placer un quadripôle avec le facteur de bruit le plus petit et avec un gain $G > 1$ à l'entrée de cette chaîne. Ce quadripôle est un amplificateur à faible bruit (LNA = Low Noise Amplifier) on l'appelle aussi, un préamplificateur.

Les amplificateurs à faible bruit sont utilisés dans des systèmes de réception pour amplifier des signaux très faibles dont le niveau est proche du niveau de bruit généré par les circuits de réception. Ainsi un amplificateur à faible bruit amplifie le rapport signal sur bruit.

4.2. Cercles à facteur de bruit constant

Le facteur de bruit ne dépend que du transistor et de la source. Cherchons donc le lieu des Γ_s à facteur de bruit F constant sur l'abaque de Smith.

L'équation (1) peut être mise sous la forme :

$$\frac{F - F_{min}}{4r_n} |1 + \Gamma_{opt}|^2 = \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{opt}|^2}{1 - |\Gamma_s|^2}$$

On définit N tel que :

$$N = \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{opt}|^2}{1 - |\Gamma_s|^2} \quad \text{ou} \quad N = \frac{F - F_{min}}{4r_n} |1 + \Gamma_{opt}|^2$$

Si le facteur de bruit F est pris comme constant, N devient constant et en utilisant la première expression de N , on détermine l'expression :

$$\left| \Gamma_s - \frac{\Gamma_{opt}}{N+1} \right| = \frac{\sqrt{N(N+1 - |\Gamma_{opt}|^2)}}{N+1}$$

C'est l'équation d'un cercle. Donc pour un facteur de bruit F constant, Γ_s décrit un cercle sur l'abaque de Smith dont le rayon C_F et le rayon R_F .

$$C_F = \frac{\Gamma_{opt}}{N+1} \quad R_F = \frac{1}{N+1} \sqrt{N(N+1 - |\Gamma_{opt}|^2)} \dots (3)$$

Pour $N=0$, le centre du cercle est le point $C_F = \Gamma_{opt}$, et le rayon est nul, ce premier cercle se réduit en un point qui correspond au facteur de bruit minimum $F = F_{min}$.

Prenons la figure 3 comme exemple de tracé des cercles de bruit constant :

- On commence par le calcul de $F_{min} = 3\text{dB}$, on rapporte ce point sur l'abaque.
- Dans cet exemple, on a choisi de tracer le cercle suivant pour $F=3.5\text{dB}$. Pour cela, on calcule N qui correspond à cette valeur de F , et on détermine le centre et le rayon du cercle 3.5 dB.
- On refait la même chose pour les cercles suivants.

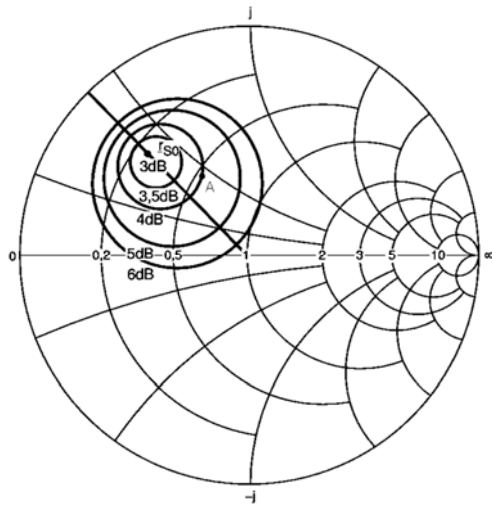


Figure 3 : Cercles à facteur de bruit constant où le minimum de bruit est le point 3 dB qui correspond à un certain Γ_S .

4.3. Conception d'un amplificateur à faible bruit

Pour réduire le facteur de bruit d'un transistor au minimum ($F = F_{min}$) dans l'expression (1), il faut prendre $\Gamma_S = \Gamma_{opt}$. Il suffit de calculer Γ_2 qui correspond à ce Γ_S et adapter la sortie.

Cependant si F_{min} ou bien Γ_2 est dans la région instable, il est impossible d'obtenir le minimum de facteur de bruit. Dans ce cas il faut utiliser les cercles à facteur de bruit constant en suivant les étapes :

- On trace les cercles à facteur de bruit constant.
- On choisit Γ_S pour une certaine valeur de F dans la région stable pour l'entrée.
- À partir de Γ_S il est possible de calculer le coefficient de réflexion Γ_2 correspondant.
- Cependant, il faut que Γ_L soit situé dans la région stable pour la sortie, sinon il faut changer la valeur de Γ_S et refaire les étapes.
- Il ne reste que de calculer les deux circuits d'adaptation.

5. Annexe : La tête universelle (LNB)

La tête universelle (LNB) pour « Low Noise Block-converter » c'est la tête de réception par satellite. Elle contient deux chaînes en parallèle (pour les polarisations H et V) composées chacune d'une antenne et d'un amplificateur. Le circuit de conversion de fréquence permet de passer de la bande Ku (10,7 à 12,75 GHz) vers la bande de fonctionnement de récepteur satellite (950 à 2150 MHz).

Dans l'exemple ci-dessous il est possible de voir les amplificateurs à transistor à deux étages (LNA1+GA1, LNA2+GA2) avec une adaptation par des stubs.

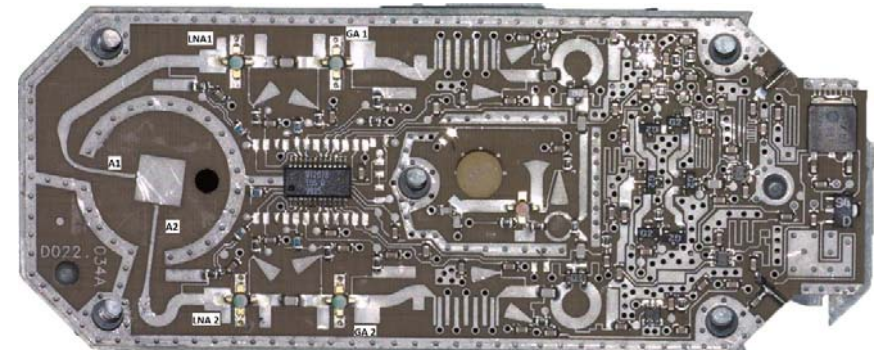


Figure 4 : Une face du circuit de la tête de réception par satellite.