

# Comprendre le facteur de bruit dans les systèmes radiofréquences

L'une des meilleures façons de comprendre l'impact du bruit sur un récepteur de communication est de se concentrer sur une caractéristique appelée facteur de bruit. Celle-ci est utilisée pour mesurer le niveau de bruit que crée chaque composant du système (et le système lui-même dans sa globalité). Encore faut-il bien comprendre tout ce que recouvre ce terme pour effectuer les mesures les plus précises possible et améliorer ce facteur de bruit. Explications détaillées de Keysight Technologies.

Les systèmes de réception modernes, qu'ils s'agissent de décodeurs de télévision par satellite ou de téléphones mobiles utilisés dans des zones mal couvertes, ont de plus en plus besoin d'acquies et de traiter des signaux très faibles. Le défi pour ces systèmes est de le faire en dépit du bruit que les signaux captent dans l'atmosphère ou qui provient de l'électronique interne du récepteur. L'une des meilleures façons de comprendre l'impact du bruit sur un système est de se concentrer sur une caractéristique appelée facteur de bruit. Celle-ci est utilisée pour mesurer le niveau de bruit que crée chaque composant du système (et le système lui-même dans sa globalité). Le facteur de bruit est employé couramment pour comparer les caractéristiques de bruit de divers éléments d'un système, tels que les conceptions d'amplificateur ou les divers types de transistors.

Il est important d'améliorer le facteur de bruit d'un récepteur, car il est habituellement moins onéreux d'agir sur cette valeur que d'augmenter la puissance du signal diffusé ou la taille de l'antenne de réception pour atteindre le même rapport signal sur bruit (S/B). Par exemple, réduire de 1 dB le facteur de bruit dans un amplificateur à faible bruit (Low

## AUTEUR



**Giovanni D'Amore,**  
Marketing  
Brand Manager,  
Keysight  
Technology.

Noise Amplifier, LNA) utilisé dans un récepteur satellite a, à peu près, le même effet que d'augmenter le diamètre de son antenne de 40%, avec tous les coûts et les problèmes de montage associés.

Le rapport S/B de sortie d'un récepteur dépend du rapport S/B d'entrée et du facteur de bruit. Dans les systèmes terrestres, le rapport S/B d'entrée est fonction de la puissance transmise, du gain de l'antenne de l'émetteur, du coefficient de transmission atmosphérique, de la température atmosphérique, du gain de l'antenne du récepteur et du facteur

de bruit du récepteur. La réduction du facteur de bruit du récepteur a le même effet sur le rapport S/B de sortie que l'amélioration de l'une quelconque de ces entités.

Le contrôle du facteur de bruit est aussi une partie importante de la conception d'un émetteur, surtout si le design d'un émetteur d'une station de base bruyante dégrade le rapport S/B des canaux adjacents.

## Les sources de bruit

Le bruit d'un système a de multiples origines.

- Le bruit thermique provient de l'agi-



• Certains des analyseurs haut de gamme de facteur de bruit de la famille NFA de Keysight possèdent des bandes passantes variables pour faciliter la mesure des composants à bande étroite, à l'instar des systèmes de mesure basés sur des analyseurs de spectre.

tation thermique des électrons et des trous. La puissance délivrée par une source thermique à une charge adaptée en impédance est de  $k.T_0.B$  watts, où  $k$  est la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  joule/K),  $T$  la température en kelvins et  $B$  la bande passante du bruit du système. La puissance disponible dans une charge adaptée est directement proportionnelle à cette bande passante.

- Le bruit de grenaille (shot noise) provient de la nature quantique du flux de courant et de phénomènes tels que la génération et la recombinaison des paires trou/électron dans les semi-conducteurs, ou la division du courant d'émetteur entre la base et le collecteur dans les transistors. Ces mécanismes générateurs de bruit produisent une densité de puissance uniforme sur toute la gamme de fréquences RF et micro-ondes.

L'industrie se réfère souvent à la « température de bruit » d'un dispositif ( $T_0$ ) pour représenter la puissance de bruit combinée de tous ces mécanismes comme s'il s'agissait d'une source thermique pure de cette température.

### Qu'est-ce qu'un facteur de bruit ?

La définition de base du facteur de bruit est le rapport  $F$  du rapport  $S/B$  d'entrée sur le rapport  $S/B$  de sortie. Il représente donc la dégradation du rapport  $S/B$  provoquée par le système au travers duquel passe le signal.

Le facteur de bruit est indépendant du gain, car un amplificateur parfait qui ne générerait aucun bruit amplifierait de la même manière le bruit et le signal. En réalité, presque tous les amplificateurs ajoutent du bruit et leur influence à ce niveau est caractérisée par le facteur de bruit de l'amplificateur. Le facteur de bruit est également indépendant du niveau du signal d'entrée, du moins tant que l'amplificateur fonctionne linéairement.

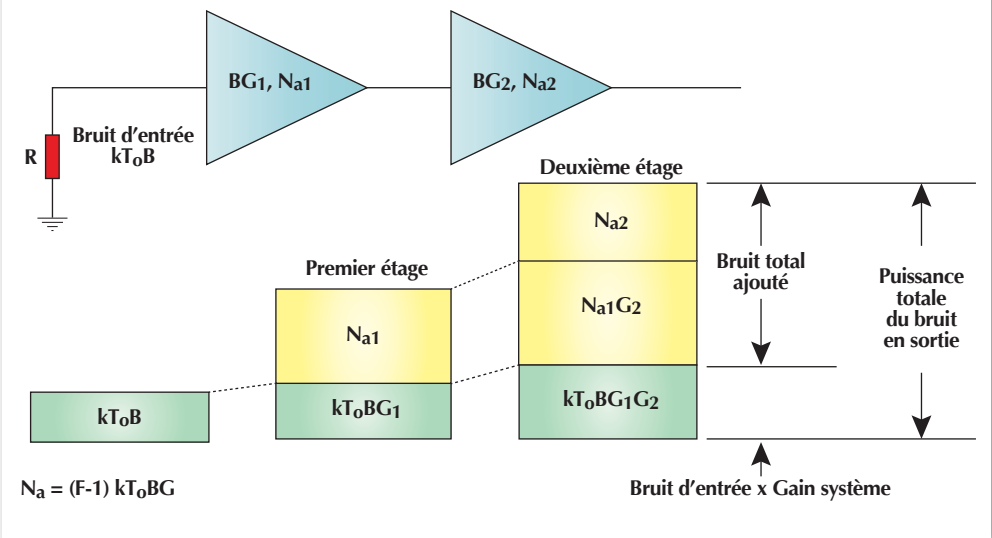
Cependant, le facteur de bruit d'un système dépend de la température de la source qui excite le réseau, parce que le bruit généré par cette source est habituellement lié à sa température. L'IEEE a adopté 290 K comme la température standard à laquelle le facteur de bruit doit être déterminé.

Le facteur de bruit est aussi généralement une fonction de la fréquence, mais est indépendant de la bande

## 1 CALCUL DES FACTEURS DE BRUIT DANS LES SYSTÈMES À PLUSIEURS ÉTAGES

Le bruit de sortie du système est ici la somme du bruit de source  $k.T_0.B$  amplifié par les deux gains  $G_1$  et  $G_2$  (où  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T_0$  est la température en kelvins et  $B$  la largeur de bande passante du bruit du système), du bruit de sortie du premier amplificateur,  $N_{a1}$ , amplifié par le second gain  $G_2$ , et du bruit de sortie du deuxième amplificateur,  $N_{a2}$ .

(Source : Keysight)



passante. Il est couramment exprimé comme NF (Noise Figure) =  $10 \log F$ , où, comme précisé plus haut,  $F$  est le rapport entre le  $S/B$  d'entrée et le  $S/B$  de sortie.

### Caractéristiques de bruit des réseaux à deux ports

Une des raisons pour laquelle le facteur de bruit est une mesure aussi utile pour la conception vient du fait que cette mesure peut être effectuée sur des composants individuels, tels qu'un amplificateur à transistor, et sur des systèmes complets tels qu'un récepteur.

Le facteur global du bruit du système peut être calculé si les facteurs de bruit et les gains de chaque composant du système sont connus. Dans la figure 1, le bruit de sortie est ainsi la somme:

- du bruit de source  $k.T_0.B$  (où  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T_0$  est la température en kelvins et  $B$  la largeur de bande passante du bruit du système) amplifié par les deux gains,  $G_1$  et  $G_2$ ;
- du bruit de sortie du premier amplificateur,  $N_{a1}$ , amplifié par le second gain  $G_2$ ;
- et du bruit de sortie du deuxième amplificateur,  $N_{a2}$ .

Les contributions de puissance de bruit peuvent être ajoutées car elles ne sont pas corrélées.

Il est alors possible de calculer les contributions de bruit de chaque

amplificateur et d'exprimer le bruit de sortie en fonction de leurs facteurs de bruit,  $F$ . Une fois que le bruit de sortie est connu, le facteur de bruit global  $F_{SYS}$  du système peut être calculé selon la formule  $F_1 + (F_2 - 1)/G_1$ . La partie  $(F_2 - 1)/G_1$  de cette équation est souvent connue sous le nom de contribution du deuxième étage au facteur de bruit global du système. L'équation définissant  $F_{SYS}$  montre aussi que, tant que le gain du premier étage est élevé, la contribution du deuxième étage est faible; c'est pourquoi le gain des préamplificateurs est si important dans la conception d'un récepteur.

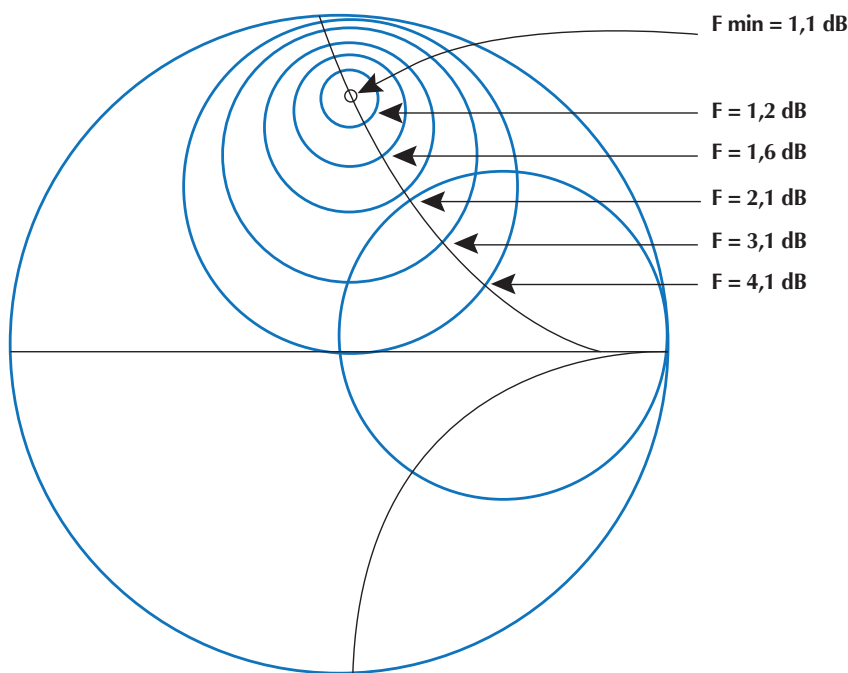
### Gain et désadaptation

Le gain d'un composant est évidemment une partie importante des calculs de bruit, mais il y a une différence entre une puissance de bruit d'entrée de  $k.T_0.B$ , qui est la puissance disponible, et ce qui est réellement couplé dans le système, qui dépend de comment son impédance est adaptée à la charge. De grandes désadaptations d'entrée réduisent en effet la puissance délivrée au composant et cet effet peut être caractérisé par le rapport de la puissance délivrée à la charge sur la puissance disponible à la source, ce qui définit le gain de transducteur (ou gain composite),  $G_T$ .

Le gain de puissance disponible ( $G_a$ ) est souvent donné en tant que para-

**2 LES CERCLES DE BRUIT RELIENT LES IMPÉDANCES DE SOURCE ET LES FACTEURS DE BRUIT**

Lorsque  $\Gamma$ , le coefficient de réflexion de la source, est représenté sur un diagramme de Smith pour un ensemble de facteurs de bruit constants,  $F$ , le résultat est un ensemble de « cercles de bruit », un moyen pratique d'afficher la relation complexe entre l'impédance de la source et les facteurs de bruit.



mètre d'un transistor, et représente le gain qui résultera lorsqu'une admittance de source donnée,  $Y_s$ , active le composant et que la sortie est adaptée à la charge.

Le gain d'insertion,  $G_v$ , ou coefficient de transmission vers l'avant (forward transmission coefficient), est la quantité spécifiée ou mesurée pour le gain dans un système de  $50\Omega$ . Cette mesure repose sur l'utilisation d'un système de mesure avec de faibles coefficients de réflexion et une bonne adaptation de sortie avec le composant testé.

Ce qu'il est important de bien comprendre ici, c'est que l'adaptation entre les étages d'un système affecte la façon dont la puissance est couplée d'un étage à l'autre et, partant, la performance globale du bruit du système. C'est seulement lorsqu'il y a une parfaite adaptation d'impédance entre la sortie d'un étage et l'entrée suivante telle qu'elle a été caractérisée, que l'on peut se fier aux facteurs de bruit spécifiés pour chaque étage.

**Paramètres de bruit**

Un facteur de bruit est censé être un modèle simplifié du bruit réel dans un système, sur la base d'un généra-

teur unique de bruit théorique à chaque étage. Les amplificateurs réels se caractérisent généralement par de multiples sources de bruit, créées par les processus thermiques et le bruit de grenaille, et l'impact de l'impédance de la source sur ces derniers peut être complexe.

Le facteur de bruit résultant d'une mesure de bruit est dès lors influencé par la qualité d'adaptation entre la source de bruit et le composant testé ainsi que par l'adaptation d'impédance entre le composant testé et l'instrument de mesure.

Concevoir des LNA signifie donc comprendre comment le gain et le facteur de bruit du composant actif changent en fonction de l'impédance ou de l'admittance de la source. Dès lors, pour bien comprendre l'effet de la désadaptation dans un système, son facteur de bruit et son gain doivent tous deux être caractérisés.

Une caractérisation des paramètres de bruit nécessite un tuner spécifique capable de présenter différentes impédances complexes au composant à tester, afin d'en déduire des facteurs de bruit liés au coefficient de réflexion de la source. Il est alors possible de déterminer le facteur de

bruit minimal ( $F_{min}$ ), le coefficient de réflexion de source optimal ( $\Gamma_{opt}$ ) qui permet ce minimum et la résistance au bruit associée ( $R_n$ ), qui représente la sensibilité du facteur de bruit aux variations de l'admittance de la source. Ces quantités, qui sont scalaires,  $F_{min}$  et  $R_n$ , et vectorielle,  $\Gamma_{opt}$  en grandeur et en phase, sont fréquemment appelées les « paramètres de bruit » et c'est leur détermination qui est connue sous le nom de « caractérisation du bruit ».

Lorsque  $\Gamma$ , le coefficient de réflexion de la source, est représenté sur un diagramme de Smith pour un ensemble de facteurs de bruit constants,  $F$ , le résultat est un ensemble de « cercles de bruit », un moyen pratique d'afficher la relation complexe entre l'impédance de la source et les facteurs de bruit (figure 2).

Il est également possible de représenter le coefficient de réflexion de source  $\Gamma$  sur un diagramme de Smith pour un ensemble de gains fixes, ce qui donne des « cercles de gain » qui montrent la relation entre l'impédance de source et le gain.

**L'effet de la bande passante**

Le bruit, comme dit plus haut, est indépendant de la bande passante du composant. Lors des mesures de bruit, on suppose généralement que la relation entre la fréquence et l'amplitude du signal dans le composant testé reste constante sur la largeur de bande de mesure. Cela signifie que la bande passante de mesure du bruit doit être inférieure à la bande passante du composant. Dans le cas contraire, une erreur sera introduite.

Certains des analyseurs haut de gamme de facteur de bruit de la famille NFA de Keysight possèdent des bandes passantes variables pour faciliter la mesure des composants à bande étroite, à l'instar des systèmes de mesure basés sur des analyseurs de spectre. Keysight offre également une variété d'autres outils pour réaliser le type de mesures de facteur de bruit exactes et répétables, qui sont essentielles à la conception, la fabrication et la réparation des systèmes de réception avancés. ■

**RÉFÉRENCE**

[www.keysight.com/find/noisefigure](http://www.keysight.com/find/noisefigure)