ELG4576 Systèmes de télécommunication
Semaine 7

7. Température de bruit équivalent et facteur de bruit

Quand on utilise des amplificateurs pour amplifier un signal reçu, on amplifie aussi le bruit. En plus, les résistances employées dans l'amplificateur rajoutent du bruit au signal traité. Donc le rapport signal à bruit à la sortie de l'amplificateur est réduit comparativement au rapport signal à bruit à l'entré. Le rapport signal-à-bruit quand on fait la détection du signal d'information est importante pour calculer l'erreur quadratique ou la probabilité d'erreur des systèmes de communication. Souvent c'est plus facile de trouver ce rapport signal à bruit en supposant que le bruit se rajoute au signal dans le canal. Donc il faut trouvez la puissance équivalente du bruit à l'entrée du récepteur qui inclut les effets de bruit des composantes du récepteur.

7.1. La densité spectrale du bruit blanc, N_o

La tension RMS du bruit dans une résistance est

$$V_{rms}^2 = 4kTRB \text{ V}^2 \tag{7.1}$$

Si un réseau avec une résistance équivalent R est connecté à une charge R_L, la puissance livrée à la charge est maximisée si $R_L = R$. Donc la puissance moyenne du bruit livrée à la charge est :

$$P_n = kTB \text{ W} \tag{7.2}$$

La puissance du bruit est $S_W(f)\times 2B$, donc

$$S_W(f) = \frac{kT}{2} = \frac{N_o}{2} \tag{7.3}$$

Alors $N_o = kT$ où T est la température donnée en kelvin et $k = 1.38\times 10^{-23}$ W/Hz-K est la constante de Boltzmann.

Exercice 7.1

Trouvez No si la température d'opération du circuit est
(a) 0^oC
(b) 25^oC
(c) 50^oC
Trouvez la puissance du bruit pour chaque cas si la largeur de bande d'intérêt est 10kHz.

7.2. Amplification du bruit

Considérons l'amplificateur idéal avec la réponse en fréquence de la Figure 4.1. On remarque que si un processus de bruit blanc est filtré par ce filtre, la puissance du bruit à la sortie sera

$$P_{no} = N_o GB = kTGB \tag{7.3}$$

où $G = |H(0)|^2$ est **le gain de puissance dans la bande passante du filtre** et B est la largeur de bande du filtre.

Gain de puissance est $G = P_o/P_i$, où P_o est la puissance de la sortie et P_i est la puissance de l'entrée. Typiquement, G est donné en dB.

$$G \text{ en dB} = 10\log_{10} G \tag{7.4}$$

Figure 7.1 : Réponse en fréquence de l'amplificateur idéal

Considérons un deuxième amplificateur idéal avec la réponse en fréquence de la Figure 7.2. La puissance à la sortie du bruit sera :

$$P_{no} = \frac{kT}{2}\int_{-\infty}^{\infty}|H(f)|^2\,df \tag{7.5}$$

Cependant, l'expression (7.3) est beaucoup plus facile d'employer, donc définissons la bande passante équivalent du bruit d'un filtre par B_{neq} qui est donnée par :

$$B_{neq} = \frac{1}{2G}\int_{-\infty}^{\infty}|H(f)|^2\,df \tag{7.6}$$

où $G = |H(0)|^2$. Donc on peut exprimer (7.5) par :

$$P_{no} = kTGB_{neq} \tag{7.7}$$

Figure 7.2 : Réponse en fréquence du deuxième amplificateur idéal.

Exercice 7.2

Trouvez B_{neq} pour les filtres suivants :

(a) $h(t) = 10^5 e^{-10t} u(t)$.

(b) Le filtre qui a la réponse en fréquence de la figure 7.2 où $H(0) = 25$, $f_1 =$ 500Hz et $f_2 = 1000$ Hz.

Cependant, dans la discussion précédant, nous avons supposé que les amplificateurs ne rajoutaient pas du bruit. En pratique, la puissance du bruit à la sortie est une somme de la contribution au bruit du bruit à l'entrée de l'amplificateur plus le bruit rajouté par l'amplificateur. Donc (7.7) devient

$$P_{no} = kTGB_{neq} + P_{\text{int}} \tag{7.8}$$

où P_{int} est la puissance du bruit généré à l'interne de l'amplificateur. On peut réécrire (7.8) comme

$$P_o = kGB_{neq}\left(T + \frac{P_{\text{int}}}{kGB_{neq}}\right) = kGB_{neq}(T + T_e) \tag{7.9}$$

où T_e est la température de bruit équivalente de l'amplificateur.

$$T_e = \frac{P_{\text{int}}}{kGB_{neq}} \tag{7.10}$$

Le rapport signal à bruit sur la bande B_{neq} à l'entrée de l'amplificateur est $(S/N)_i$. Le rapport signal-à-bruit à la sortie est $(S/N)_o$. Si le signal désiré à une puissance à l'entrée de Psi, le rapport signal-à-bruit à la sortie de l'amplificateur est

$$\left(\frac{S}{N}\right)_o = \frac{GP_{si}}{kGB_{neq}(T + T_e)} = \frac{P_{si}}{kB_{neq}(T + T_e)} = \left(\frac{S}{N}\right)_i \frac{1}{\left(1 + \frac{T_e}{T}\right)} \tag{7.11}$$

On remarque que le rapport signal-à-bruit est réduit par le facteur $F = (1+T_e/T)$. F est nommé le facteur de bruit de l'amplificateur. Aussi on peut constater que

$$T_e = T(F - 1) \tag{7.12}$$

Exercice 7.3

Un amplificateur opère dans un environnement où T = 20°C. Le rapport signal-à-bruit à l'entrée de l'amplificateur et 20 dB mais le rapport signal-à-bruit à la sortie de l'amplificateur est 18.5dB. Trouvez le facteur de bruit et la température de bruit équivalente de l'amplificateur.

7.3. Facteur de bruit effectif et température effective pour une cascade d'amplificateurs

Pour le système de la Figure 7.3, on voit que la puissance du bruit à la sortie est

Figure 7.3 : Cascade d'amplificateurs

$$P_n = kB_{neq}(G_1G_2T + G_1G_2T_{e1} + G_2T_{e2}) = kB_{neq}G_1G_2T\left(1 + T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1}\right) \tag{7.13}$$

La température effective de la cascade est

$$T_{eff} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} \tag{7.14}$$

Le facteur de bruit effectif de la cascade est

$$F_{eff} = \left(1 + T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1}\right) = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} \tag{7.15}$$

Pour une cascade de n amplificateurs, la température effective est :

$$Teff = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \ldots + \frac{T_{en}}{G_1 G_2 .. G_{n-1}} \tag{7.16}$$

Et le facteur de bruit effectif est :

$$F_{eff} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \ldots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 .. G_{n-1}} \tag{7.17}$$

Exercice 7.4

Trouvez le facteur de bruit effectif et la température effective du réseau d'amplificateurs de la figure 7.4 ci-dessous. Exprimez le facteur de bruit effectif en dB.

Figure 7.4 : Réseau d'amplificateurs de l'exercice 7.4

7.4. Facteur de bruit effectif et température effective pour un réseau avec pertes

Un réseau avec pertes comme un guide d'ondes a un gain de puissance $1/L$, où $L > 1$. On dit que L est la perte en puissance du réseau. Si la température ambiante est T et la puissance du bruit à l'entrée kTB_{neq}, la puissance du bruit à la sortie est

$$P_{no} = \frac{1}{L} kB_{neq}(T + T_e) \tag{7.18}$$

Mais en sachant que la température du réseau est aussi T, la puissance du bruit à la sortie est aussi donné par :

$$P_{no} = kTB_{neq} \tag{7.19}$$

Donc

$$T_e = (L-1)T \tag{7.20}$$

Le facteur de bruit effectif est donc

$$F = L \tag{7.21}$$

7.5. Température d'une antenne

Une antenne reçoit du bruit provenant de plusieurs sources. Sa température de bruit est une mesure de la puissance du bruit provenant de ces sources qui passe de l'antenne au récepteur. On obtient cette température en considérant le faisceau de rayonnement de l'antenne et la position des sources de bruit et leurs températures effectives. Les sources de bruit peuvent être naturelles (soleil, lune, terre, pluie – bruit du ciel) ou anthropique (interférence). La temperature de l'antenne est T_A.