

Comment ça marche ?

Les circuits réactifs (9)

Généralités sur le filtrage.

Par le radio-club F6KRRK

Après avoir vu la réactance et l'impédance, nous allons aborder maintenant le filtrage, principal domaine d'utilisation des circuits réactifs.

Filtrage fréquentiel

Le filtrage fréquentiel peut être défini comme la propriété d'un circuit (quadripôle) de limiter sa fonction de transfert (gain, atténuation) à une bande de fréquence limitée. Par exemple, on peut souhaiter qu'un amplificateur ait un gain dans une bande de fréquence restreinte et une atténuation pour tout le reste du spectre.

Le filtrage est obtenu par association de composants réactifs avec des résistances. Ces dernières comprennent en général la résistance interne de la source et la résistance de charge. La notion de filtrage est liée au transfert d'énergie dans la partie résistive de la charge ⁽¹⁾.

On distingue quatre types de filtrage :

- Filtre passe-bas idéal : aucune atténuation pour F comprise entre 0 et F_0 , et atténuation infinie pour F comprise entre F_0 et F_∞ .
- Filtre passe-haut idéal : aucune atténuation pour F comprise entre F_0 et F_∞ , et atténuation infinie pour F comprise entre 0 et F_0 .
- Filtre passe-bande idéal : aucune atténuation pour F comprise entre F_1 et F_2 , et atténuation infinie pour F comprise entre 0 et F_1 puis entre F_2 et F_∞ .
- Filtre coupe-bande idéal : atténuation infinie pour F comprise entre F_1 et F_2 , et aucune atténuation pour F comprise entre 0 et F_1 puis entre F_2 et F_∞ .

Ordre du filtrage

L'ordre du filtrage est égal au nombre de composants réactifs du filtre. Par exemple, un simple R-C est du 1^{er} ordre et un circuit oscillant du 2^{ème} ordre. L'ordre définit la pente du filtre lors de la transition de fréquence entre la (les) bande(s) transmise(s) et la (les) bande(s) atténuée(s). Cette pente exprimée en dB par octave ou dB par décade, est égale à l'ordre du filtre multiplié par 6 dB/octave ou 20 dB/décade. On voit que les filtres idéaux vus ci-dessus ne pourraient être obtenus qu'avec un ordre infini. Noter que ces valeurs correspondent à une architecture gaussienne du filtre. Il existe d'autres architectures (Bessel, Butterworth, Tchebychev, Causer, etc.) avec des valeurs d'atténuations différentes. Nous y reviendrons.

Filtre prototype

Il s'agit d'un filtre passe-bas. Le rapport des fréquences (octaves ou décades), se fait à partir de $F=0$. Mathématiquement un filtre passe-haut est un filtre passe-bas "miroir" obtenu en

inversant les signes de la fréquence et des réactances. Un filtre passe-bande symétrique est la composition d'un filtre passe-haut et d'un filtre passe-bas ayant F_0 pour fréquence zéro (transposition de la fréquence centrale du filtre). A partir du filtre prototype, on obtient le filtre définitif en appliquant aux valeurs du prototype des coefficients dépendants de F_0 .

Pôles et zéros

Ces notions correspondent aux propriétés mathématiques de la fonction de transfert du filtre. Un pôle est une fréquence pour laquelle le transfert passe par un maximum. Un zéro est une fréquence pour laquelle le transfert est nul (ou en pratique, passe par un minimum). Le nombre de pôle n'est pas forcément décelable dans la courbe de réponse du filtre, mais on l'obtient par l'analyse de son schéma. Il y a un pôle par circuit oscillant. Par exemple, un filtre à quartz à 8 pôles est composé de 8 quartz ⁽²⁾. Un circuit oscillant étant du 2^{ème} ordre, l'atténuation dans la bande de transition du filtre sera de 12 dB/octave par pôle, soit ici 96 dB/oct ⁽³⁾.

Fréquence de coupure

C'est la fréquence pour laquelle la réponse du filtre subit une atténuation de 3 dB, soit une puissance transmise réduite de moitié. C'est un paramètre important qui intervient souvent dans les calculs.

Réponse en phase

Nous avons vu que l'association de résistances et de réactances déterminait une impédance complexe que l'on peut caractériser avec une magnitude et un déphasage ($Z = M, \varphi$). Dans la plupart des cas, seule la magnitude nous intéresse (réponse en amplitude), mais nous avons des cas où le déphasage a une importance et peut même être le seul critère recherché (filtres déphaseurs).

Temps de propagation de groupe

C'est le retard τ_{gr} apporté par le filtre pour la fréquence F . Ce retard est lié à la variation de phase $\Delta\varphi$ pour une variation ΔF de la fréquence F .

Soit $\omega = 2\pi F$ = vitesse angulaire des vecteurs tournants pour U et I sinusoïdaux (radians par seconde). Sur t secondes, on obtient : $\varphi = 2\pi F \times t$. Si $t = T = 1/F$, alors $\varphi = 2\pi$ radians ou 360° .
Considérons une variation $\Delta\varphi$, nous obtenons :

$$\Delta\varphi = 2\pi \times \Delta F \times \Delta t$$

$$\text{alors } \Delta F = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

$$\text{et } \Delta t = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta\varphi}{\Delta F} \quad (\varphi \text{ en radians})$$

$$\text{ou } \Delta t = \frac{1}{360} \times \frac{\Delta\varphi}{\Delta F} \quad (\varphi \text{ en degrés})$$

$$\text{or } \tau_{gr} = -\Delta t \quad (\text{retard})$$

$$\text{alors } \tau_{gr} = -\frac{1}{360} \times \frac{\Delta\varphi}{\Delta F} \quad (\varphi \text{ en } ^\circ)$$

Nous verrons qu'avec certaines structures de filtres, le temps de groupe varie dans de grandes proportions, surtout aux alentours de la fréquence de coupure. Pour la plupart des utilisations la variation du temps de groupe n'a pas d'importance, mais pour certaines d'entre elles, c'est une caractéristique majeure ⁽⁴⁾.

Cas des lignes à retard : Ce sont des filtres dits "passe-tout", donc qui en théorie ne filtrent pas, mais dont le temps de propagation de groupe est constant dans une large bande de fréquence.

Limites de l'étude

Nous n'aborderons que le filtrage obtenu avec des circuits "fermés" ou à "constantes localisées". C'est-à-dire que la dimension des circuits est très faible devant la longueur d'onde. Alors on considère que :

- le courant est constant à l'intérieur d'une bobine
- la tension entre les armatures est constante pour toute la surface d'un condensateur
- il n'y a pas de couplage électrostatique en dehors des condensateurs
- il n'y a pas de pertes par rayonnement.

En pratique, la fréquence limite pour laquelle ces conditions sont remplies se situe dans la bande UHF.

Après avoir défini les principaux paramètres concernant les filtres, nous aborderons les différentes structures dans les prochains "Comment ça marche" où nous aurons l'occasion de retrouver ces paramètres "concrètement" sur les diagrammes.

La Rubrique "Comment ça marche ?" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@ref-union.org".

Notes.

- 1) *Puisque la partie réactive ne dissipe aucune énergie.*
- 2) *Les circuits L-C éventuellement associés n'ont pas d'effet en bande de fréquence restreinte car leur Q est très inférieur à celui des quartz.*
- 3) *Pour le rapport des fréquences on prend comme référence la fréquence milieu de la bande passante. Ainsi pour un filtre BLU sup à 8 pôles de 2,4 kHz de bande, soit +300 à +2700 Hz avec une référence F_0 , nous avons : $F(\text{milieu}) = F_0 + 1,5\text{kHz}$ et entre $F_0 + 2,8\text{kHz}$ ($1,5 + 1,3$) et $F_0 + 4,1\text{kHz}$ ($1,5 + (2 \times 1,3)$), nous avons une atténuation de 96 dB si le filtre est gaussien (nous en reparlerons).*
- 4) *Si l'on filtre un signal modulé avec de la phonie, cela n'a pas d'importance, car les relations de phase entre les harmoniques de la parole n'influent pas sur sa compréhension. Mais si nous avons une modulation numérique qui occupe tout la bande du filtre, la variation du temps de groupe peut provoquer des chevauchements de symboles, donc des erreurs. Le problème se pose concrètement quand nous voulons transmettre du numérique à haut débit (relatif) dans un canal BLU avec un filtre comme celui décrit en (3).*