

Multiplication de signaux / Modulation - Démodulation

Objectifs :

- Mettre en œuvre les principes de modulation d'amplitude ou de fréquence, puis démoduler les signaux par détection synchrone.
- Appliquer le principe de la détection synchrone pour la mesure d'une impédance.

Compétences expérimentales exigibles :

- Mettre en œuvre divers montages utilisant un ALI, les schémas des montages étant fournis.
- Élaborer un signal électrique analogique modulé en fréquence.
- Réaliser une détection « synchrone » à l'aide d'un multiplieur et d'un passe-bas simple adapté à la mesure.

I. Le multiplieur

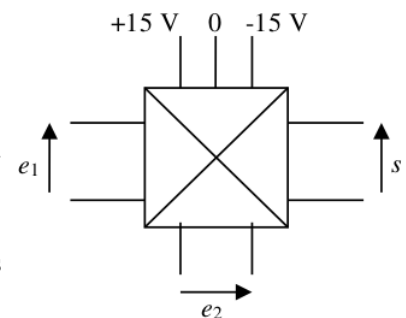
Le multiplieur est un circuit intégré schématisé ci-contre. La tension de sortie $s(t)$ s'exprime en fonction des deux tensions d'entrée $e_1(t)$ et $e_2(t)$:

$$s(t) = k.e_1(t).e_2(t)$$

Pour les multiplieurs utilisés, le facteur dimensionné k vaut aux alentours de $k = 0,1 \text{ V}^{-1}$.

Il existe en fait des défauts par rapport à ce schéma idéalisé, en particulier des tensions de décalage d_1 , d_2 et d_3 , de quelques millivolts, telles que :

$$s = k.(e_1 + d_1).(e_2 + d_2) + d_3$$



Attention : le multiplieur est un circuit coûteux ! Avant toute chose, comme pour les amplificateurs opérationnels, il faut brancher l'alimentation +15V, 0, -15V (le 0 V étant assuré par la connexion de la Terre sur l'alimentation à partir du GBF ou de l'oscilloscope).

REMARQUE : Si l'une des tensions d'entrée est continue, on obtient un amplificateur à gain variable.

• MANIP 1 : Multiplication d'un signal par lui-même

- Câbler le circuit de sorte à multiplier par lui-même un signal d'entrée sinusoïdal de fréquence 10 kHz.
- Mesurer la fréquence du signal de sortie, puis sa valeur moyenne et efficace (AC, après suppression de la composante continue) au multimètre^a. Commenter à l'aune des expressions théoriques attendues. En déduire la valeur de k .
- Vérifier si l'on obtient la même chose pour une fréquence de 1 kHz (ou plus faible), ou au contraire plus élevée (100 kHz ou plus).
Comment devrait-on faire la mesure à haute fréquence ?
- Répéter la manipulation avec un signal d'entrée triangulaire, puis rectangulaire. On ne s'intéressera pas ici à la valeur efficace de la sortie^b.

^a. Lorsque l'on souhaite mesurer une tension au multimètre plutôt qu'à l'oscilloscope pour des raisons de précision, il ne faut pas oublier de déconnecter l'oscilloscope pendant la mesure...

^b. L'expression théorique fait intervenir une infinité d'harmoniques, elle est trop complexe.

II. Modulation d'amplitude et démodulation synchrone

On rappelle les raisons qui incitent à transmettre un signal par l'intermédiaire d'une porteuse haute fréquence¹ :

1. Pour les propriétés générales des signaux en modulation d'amplitude, on se référera au cours du début d'année fait sur le sujet.

- La puissance émise par une antenne est proportionnelle à ω^4 et la taille des antennes émettrice et réceptrice est proportionnelle à la longueur d'onde. Cela rend indispensable l'utilisation d'un signal de fréquence élevée.
- On peut transmettre simultanément différents signaux en utilisant différentes porteuses (f_{01} , f_{02} , f_{03}) sur une même ligne : c'est le principe du *multiplexage*.
- Pour un signal transmis non monochromatique, on réduit la largeur relative de l'étalement en fréquence du signal et on limite ainsi sa distorsion lors de la propagation dans un milieu dispersif²

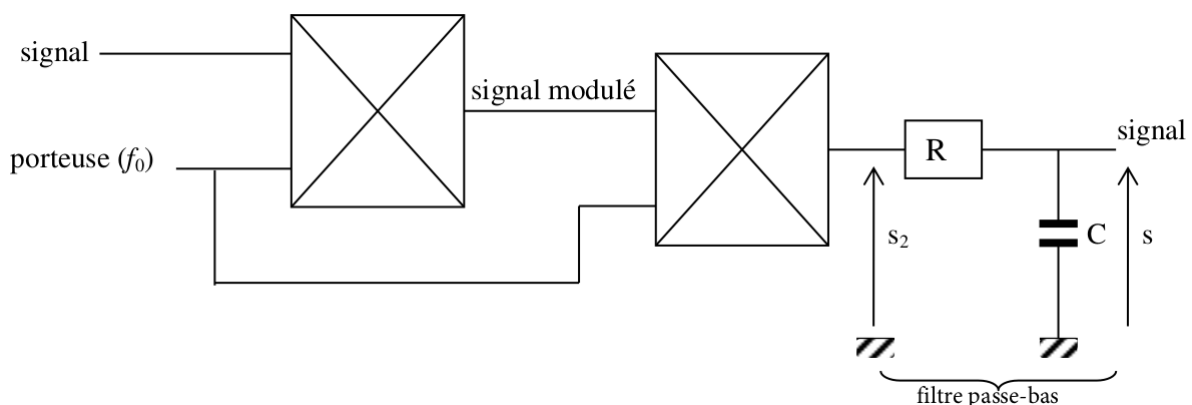
• **MANIP 2 : Modulation d'amplitude sinusoïdale avec porteuse sinusoïdale conservée**

- Rappeler la forme générale d'un tel signal.
- Réaliser, à l'aide de deux générateurs en entrée, un signal modulé en amplitude comportant : une porteuse sinusoïdale de fréquence $f_0 \approx 100$ kHz et d'amplitude 5 V, un signal modulant sinusoïdal de fréquence $f_1 \approx 1$ kHz et d'amplitude 3 V, et un taux de modulation^a $m = 0,5$. On ajustera m en ajoutant une composante constante (OFFSET) au signal modulant.
Que se passe-t-il si on n'ajoute pas de composante constante ?
- Synchroniser l'acquisition du signal à partir du signal modulant de préférence, ou mieux à partir du signal TTL de même fréquence^b qu'on enverra sur la borne EXT de l'oscilloscope.
Peut-on synchroniser parfaitement ce signal ? Pourquoi ?
- Vérifier avec une acquisition par « Foxy » et l'opération de transformée de Fourier que le signal de sortie possède les 3 fréquences $f_0 - f_1$, f_0 et $f_0 + f_1$.

a. On rappelle que le taux de modulation peut être défini à l'aide des valeurs extrêmes de l'enveloppe supérieure $u_{\max}$ et $u_{\min}$ via $m = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{u_{\max} + u_{\min}}$.

b. Sur les GBF Siglent à 2 sorties, il existe un signal de Synchronisation (qui remplace le traditionnel TTL), sous forme d'impulsions de même fréquence que la sortie 1 ou 2), accessible par la sortie arrière "AUX IN/OUT". Pour l'activer : Menu WAVEFORMS, appuyer sur UTILITY -> Page 2 SYNC -> Choisir la voie et State ON puis ACCEPT.

On rappelle le principe de la démodulation synchrone : on multiplie le signal modulé par la porteuse (à reconstituer normalement...) et on filtre le signal obtenu par un passe-bas de fréquence de coupure f_c telle que $f_1 \ll f_c \ll f_0$. On retrouve le signal original.



• **MANIP 3 : Démodulation par détection synchrone**

- Réaliser le montage, en prenant des boîtes à décades pour R et C , dont on ajustera les valeurs judicieusement. Ne pas oublier l'alimentation du second multiplieur.
Que choisir pour la fréquence de coupure f_c ? Le choix de R est-il totalement libre ?
- Visualiser $s_2(t)$, la tension avant filtrage, et déterminer son spectre. Le comparer à la théorie.
- Visualiser $s(t)$, la tension de sortie du filtre, et vérifier que l'on obtient bien le signal d'entrée, à un coefficient K près. Vérifier que K correspond à la valeur théorique attendue (ne pas oublier la validation).

2. cf futur cours sur les ondes.

III. Modulation de fréquence et démodulation synchrone

III.1. Modulation de fréquence

La modulation en fréquence d'un signal $e_0(t) = E_0 \cos(2\pi f_0 t)$ (porteuse), par un signal $e_1(t)$ (signal modulant à transmettre) consiste à produire un signal du type

$$s_{\text{FM}}(t) = E_0 \cos(\phi(t))$$

dans lequel la fréquence instantanée, définie par $f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$, varie autour de f_0 de la façon suivante :

$$f = f_0 + a e_1(t)$$

Si les fréquences du signal modulant sont très petites devant celle de la porteuse (f_0), alors le signal modulé vaut approximativement :

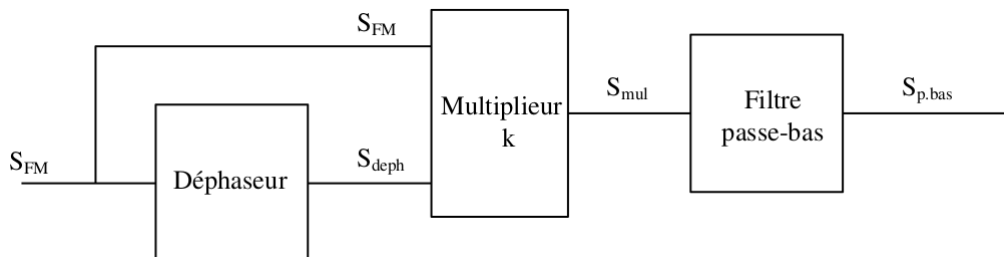
$$s_{\text{FM}}(t) = E_0 \cos(2\pi(f_0 + a e_1(t))t)$$

• MANIP 4 : Modulation de fréquence sinusoïdale d'une porteuse sinusoïdale

- Réaliser le signal modulé ^a à l'aide du GBF SIGLENT avec une porteuse (sortie 1) de fréquence $f_0 = 1,6 \text{ kHz}$, d'amplitude $\sim 5 \text{ V}$, et un signal modulant (sortie 2) de fréquence $f_1 \approx 20 \text{ Hz}$, d'amplitude nettement inférieure (ex : 1 V).
- Visualiser le signal modulant et le signal modulé.

^a. Il suffit de relier avec un câble BNC-BNC la voie 2 (signal modulant) au connecteur Aux In/Out à l'arrière du générateur. Appuyer sur la touche Mod en étant sur la voie 1 et choisir FM. Ensuite : menu en bas d'écran, choisir source external.

III.2. Démodulation de fréquence par quadrature



Le déphaseur, de gain 1, sera réglé pour déphaser de $-\frac{\pi}{2}$ à la fréquence f_0 . Soit $\Phi(f)$ le déphasage du déphaseur en fonction de la fréquence. Pour f voisin de f_0 on peut écrire :

$$\Phi(f) \approx \Phi(f_0) + \frac{d\Phi}{df}(f_0)(f - f_0) = -\frac{\pi}{2} + \Delta\varphi \quad \text{avec} \quad \Delta\varphi = \frac{d\Phi}{df}(f_0)(f - f_0) = \frac{d\Phi}{df}(f_0) a e_1(t)$$

Les deux premiers étages agissent de la façon suivante :

$$\begin{cases} s_{\text{FM}}(t) = E_0 \cos(\phi(t)) \\ s_{\text{deph}}(t) = E_0 \cos(\phi(t) - \frac{\pi}{2} + \Delta\varphi) \end{cases} \Rightarrow s_{\text{mul}}(t) = \frac{1}{2} k E_0^2 (\sin \Delta\varphi + \sin(2\phi(t) + \Delta\varphi))$$

À la sortie du filtre passe-bas de gain statique $G_{\text{max}} = 1$, on a

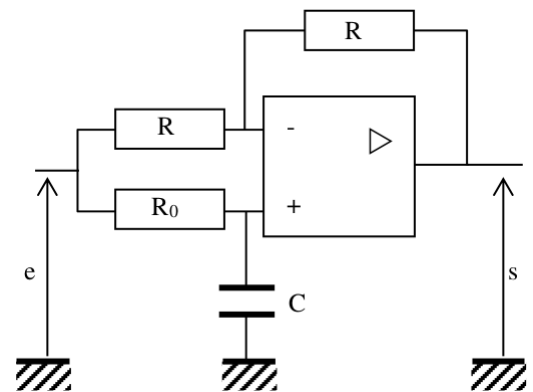
$$s_{\text{p.bas}}(t) = \frac{1}{2} k E_0^2 \sin \Delta\varphi \approx \frac{1}{2} k E_0^2 \Delta\varphi = \lambda e_1(t) \quad \text{avec} \quad \lambda = \text{constante}$$

On obtient donc en sortie un signal proportionnel au signal modulant.

Quelles doivent être les caractéristiques du signal modulé et du filtre passe-bas pour obtenir une démodulation correcte ?

• MANIP 5 : Démodulation de fréquence par quadrature

- Réaliser le filtre déphaseur ci-contre **sur une plaquette à micro-fils**, avec $R = 10\text{ k}\Omega$ et $C = 10\text{ nF}$. Attention à bien alimenter l'A.O. Déterminer la valeur de R_0 pour que le déphasage soit $-\frac{\pi}{2}$ à $f = f_0$.
- Réaliser le filtre passe-bas adapté, sous la forme d'un simple passe-bas passif du premier ordre. Vérifier expérimentalement que sa fréquence de coupure est celle souhaitée.
- Réaliser le montage complet. Attention à bien alimenter l'A.O. et le multiplieur.
- Visualiser le signal modulant, le signal modulé et le signal démodulé, le tout à l'aide de la carte d'acquisition « Foxy ». La forme du signal modulant $e_1(t)$ sera choisie successivement sinusoïdale, triangulaire puis créneau. Analyser le spectre de ses signaux et commenter.



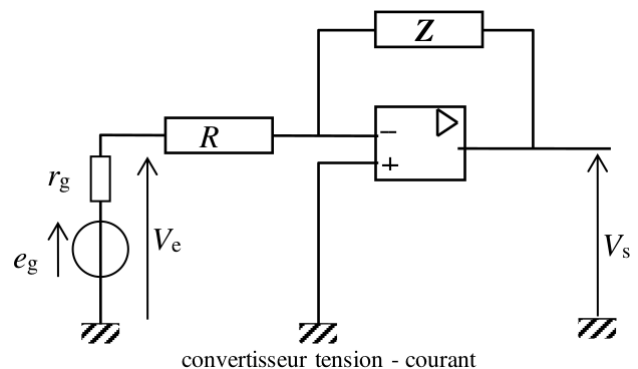
IV. Mesure d'impédance par détection synchrone

IV.1. Principe

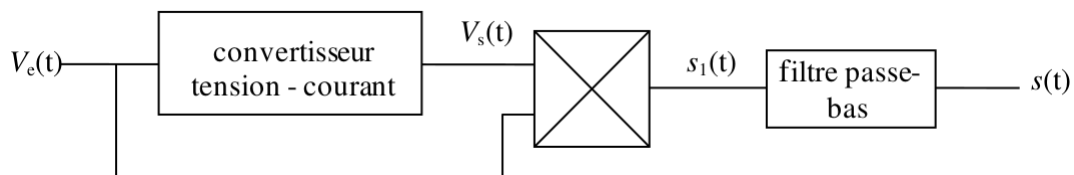
La méthode consistant à mesurer la composante en phase ou en quadrature d'un signal par rapport à une porteuse permet de mesurer la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance $\underline{Z}$ d'un composant linéaire.

Il est tout d'abord nécessaire de disposer de deux signaux proportionnels à la tension aux bornes du composant d'une part et à l'intensité du courant le traversant d'autre part. Le dispositif ci-contre le permet.

En effet, V_s est la différence de potentiel aux bornes du composant alors que V_e est proportionnelle au courant le traversant.



IV.2. Détection de la partie réelle (mesure de résistance)



Si on choisit $V_e(t) = E \cos(\omega t)$, montrer qu'alors, avec un filtre passe-bas de gain statique $G_{\max} = 1$, on obtient en sortie :

$$s(t) = -\frac{1}{2}kE^2 \frac{\text{Re}(\underline{Z})}{R}$$

• MANIP 6 : Mesure de la résistance

- Réaliser le montage avec : $R = 10\text{ k}\Omega$, $\underline{Z}$ une association en parallèle d'une résistance de $4,7\text{ k}\Omega$ et d'un condensateur de capacité $3,3\text{ nF}$, un signal d'entrée sinusoïdal d'amplitude 5 V et de fréquence 10 kHz , un filtre passe-bas R-C dont on précisera la fréquence de coupure f_c .
- Mesurer s et comparer avec la valeur attendue.

Que faudrait-il modifier dans le montage pour mesurer cette fois la partie imaginaire de $\underline{Z}$ (admittance) ?