

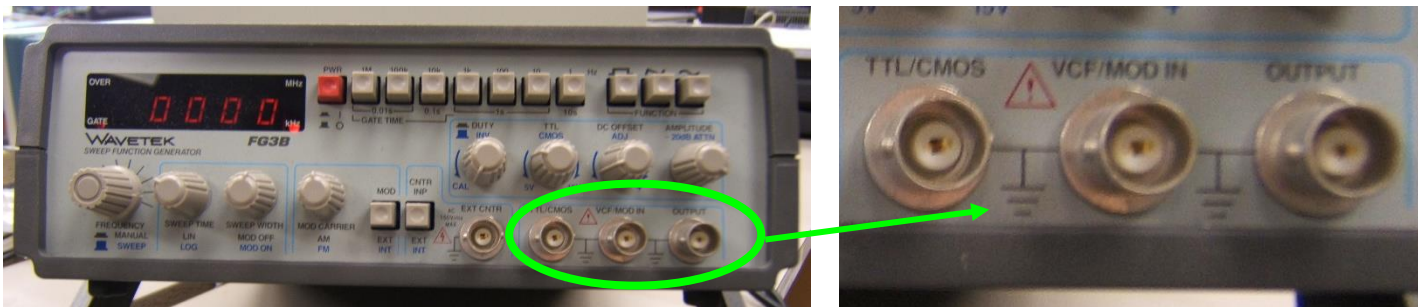
TP n°12 – Modulation-démodulation de fréquence

Objectifs :

- Elaborer un signal électrique modulé en fréquence, en utilisant la commande externe en fréquence d'un GBF
- Appliquer cette fonction à la transmission d'info FM
- Observer le spectre du signal modulé, et caractériser sa dépendance avec l'amplitude du signal modulant
- Réaliser un circuit démodulateur « en quadrature » : circuit déphaseur et multiplieur
- Le multiplexage comme intérêt de la modulation

1. Obtention d'un signal modulé en fréquence par wobblation (1h)

1.1. Moduler un GBF en fréquence via un signal de commande externe



Chaque GBF possède une **entrée VCF/MOD IN** (cf. figures ci-dessus) :

- le sigle VCF signifie Voltage Controlled Frequency : « tension commandée en fréquence »
- le sigle MOD signifie Modulation
- IN signifie Input (entrée)

Il suffit d'injecter un signal modulant $s_{info}(t)$, créé par un dispositif extérieur, pour obtenir une sortie $s_{mod}(t)$ du GBF modulée en fréquence. A priori, la tension à injecter doit rester dans l'intervalle $[-10 V; 10 V]$.

On injecte le signal modulant (créé par un GBF extérieur) dans la borne **VCF/MOD IN**.
Le signal modulé peut alors être récupéré sur la borne **OUTPUT**.

Le GBF est initialement réglé de manière à délivrer (via OUTPUT) un signal sinusoïdal, nommé « porteuse » :

$$s_{port}(t) = A \cos(\omega_p t)$$

Une fois l'entrée VCF/MOD IN alimentée par $s_{info}(t)$, le GBF délivre alors (via OUTPUT) le signal modulé :

$$s_{mod}(t) = A \cos\left(\int \omega(t) dt\right)$$

où $\omega(t)$ est la pulsation instantanée, et vaut :

$$\omega(t) = \omega_p + \omega_\Delta s_{info}(t)$$

la valeur du paramètre ω_Δ étant fixée par le constructeur du GBF.

Pour le GBF utilisé : $f_\Delta = -0,2 \times \text{calibre}$. Ainsi, si le GBF est réglé sur le calibre 10 kHz , $f_\Delta = -2 \text{ kHz} \cdot V^{-1}$.

1.2. Signal modulant sinusoïdal – Encombrement spectral du signal modulé

On travaille ici avec un signal modulant sinusoïdal $s_{info} = S_0 \cos(\omega_m t + \varphi')$, de fréquence $f_m = 1 \text{ kHz}$.

La porteuse est fixée à 20 kHz .

Dans un premier temps, sur environ deux périodes du signal modulant, on cherche à visualiser dans le domaine temporel l'effet de la modulation de fréquence.

- ❖ Visualiser à l'oscilloscope, et imprimer via LatisPro, la superposition de $s_{info}(t)$ et $s_{mod}(t)$ pour $S_0 = 3 V$

Dans un second temps, on cherche à observer les conséquences spectrales de la modulation, notamment la dépendance de la *largeur du spectre modulé* avec l'*amplitude du signal modulant*.

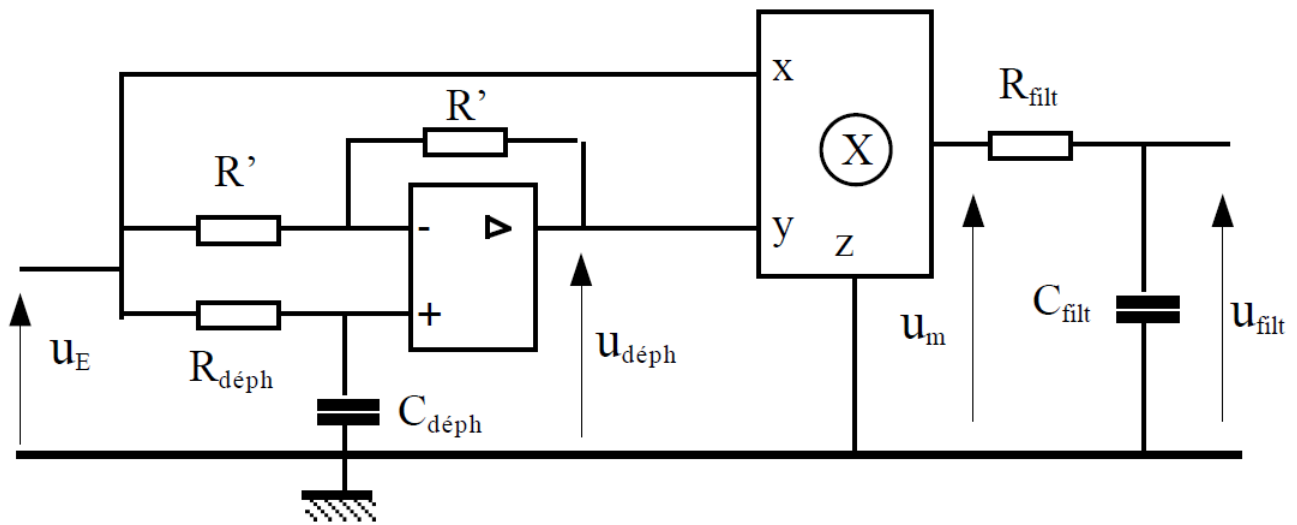
Avant les mesures, appeler le professeur pour réfléchir à comment définir « la largeur du spectre ».

- ❖ Reprendre le signal ci-dessus, mais régler LatisPro de manière à visualiser le signal sur une durée cent fois plus grande (meilleure résolution spectrale), et visualiser le spectre de $s_{mod}(t)$, et mesurer sa demi-largeur δf . On vérifiera que le **critère de Shannon** est bien vérifié.
- ❖ Tracer l'indice de modulation $M \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\delta f}{f_p}$ en fonction de l'amplitude S_0 : 1 V ; 3 V ; 5 V ; 8 V ; 10 V

NB : l'allure du spectre est assez complexe, et l'amplitude des pics s'exprime avec les fonctions de Bessel.

2. Démodulation par déphaseur et multiplieur (1h)

2.1. Montage démodulateur à quadrature



Objectif : En entrée du montage, on envoie le signal $u_E(t) = s_{mod}(t)$ que l'on cherche à démoduler. Cela signifie que l'on souhaite retrouver $u_{filt}(t) \propto s_{info}(t)$ à la sortie du montage.

Le montage fonctionne d'autant mieux que l'indice de modulation est faible. Idéalement, il faut $M \ll 1$.

Le montage ci-dessus est déjà prêt à fonctionner, il a été préparé par Jocelyne.

Le premier bloc est un circuit utilisant un Amplificateur Opérationnel, hors programme de PC. C'est un montage déphaseur de fonction de transfert :

$$\frac{U_{deph}}{U_E} = \frac{1 - j \frac{\omega}{\omega_c}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

avec $\omega_c = \frac{1}{R_{deph} C_{deph}}$.

Le deuxième bloc est un multiplieur. Le dernier bloc est un filtre passe-bas RC. La valeur de R_{deph} est réglable, les autres valeurs sont fixées : $C_{deph} = 10 \text{ nF}$; $R' = 10 \text{ k}\Omega$; $R_{filt} = 1 \text{ k}\Omega$; $C_{filt} = 100 \text{ nF}$

2.2. Rôle du déphaseur – Choix de R_{deph}

Le rôle du montage déphaseur est de déphaser le signal d'entrée d'une valeur qui dépend de manière affine du signal $s_{info}(t)$ que l'on souhaite récupérer au bout du montage démodulateur complet.

- ❖ Montrer que le déphaseur n'a aucune influence sur l'amplitude du signal
- ❖ Etablir l'expression ci-dessous du déphasage entrée-sortie $\Delta\varphi(\omega)$ et tracer son allure :

$$\Delta\varphi(\omega) = -2 \arctan\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$$

Le déphasage est compris entre $[0, -\pi]$, et le milieu de cet intervalle est atteint pour $f = f_c$.

La fréquence du signal modulé oscillant autour de celle de la porteuse f_p , il vaut mieux fixer $f_c = f_p$, ainsi les valeurs du déphasage oscilleront autour du milieu de l'intervalle.

Notons qu'en l'absence de modulation, la fréquence de $s_{mod}(t)$ est celui de la porteuse, et le déphasage vaut $-\pi/2$, d'où le nom de démodulateur à quadrature.

❖ Déterminer la valeur de R_{deph} telle que $f_c = f_p = 20 \text{ kHz}$

On suppose le signal modulant sinusoïdal $s_{info} = S_0 \cos(\omega_m t + \varphi')$. On a alors le signal modulé :

$$s_{mod}(t) = A \cos\left(\int \omega(t) dt\right)$$

$$\omega(t) = \omega_p + \omega_\Delta S_0 \cos(\omega_m t + \varphi')$$

En traitant $\omega(t)$ de la même façon qu'une pulsation indépendante du temps (cf. NB plus bas), on peut écrire :

$$u_{deph}(t) = A \cos\left(\int \omega(t) dt + \Delta\varphi(\omega(t))\right)$$

On a imposé un indice de modulation faible, ainsi $\omega_\Delta S_0 \ll \omega_p$, et on rappelle que $\omega_c = \omega_p$.

⊛ En utilisant le DL au 1^{er} ordre de la fonction $\arctan(x) = \frac{\pi}{4} + \frac{x}{2}$ pour x voisin de 1, montrer qu'on obtient :

$$\Delta\varphi(\omega(t)) = -\frac{\pi}{2} - \frac{\omega_\Delta}{\omega_p} S_0 \cos(\omega_m t + \varphi')$$

Le déphasage obtenu est donc une fonction affine du signal modulant que l'on souhaite récupérer à la fin du montage démodulateur. C'était l'objectif recherché.

NB : Ci-dessus, traiter la pulsation instantanée comme si elle était constante n'est valide qu'en supposant le régime sinusoïdal forcé atteint à chaque instant. Or $\omega(t)$ varie dans le temps avec une fréquence égale à celle du signal modulant f_m ... Pour pouvoir légitimement négliger le régime transitoire, il faut donc que f_m soit assez petite devant $1/\tau$, τ étant le temps caractéristique du régime transitoire du montage déphaseur.

Or on peut montrer que $\tau = R_{deph} C_{deph}$. Cette contrainte impose donc que $f_m \ll f_p$, contrainte facile à remplir puisque l'objectif d'une modulation est de former un signal « haute fréquence » autour de f_p . On choisit donc naturellement $f_p \gg f_m$!

2.3. Rôle du multiplieur et du passe-bas : détection synchrone de fréquence

En sortie du multiplieur ($k \sim 0,1$) : $u_m(t) = k u_E(t) u_{deph}(t) = k s_{mod}(t) u_{deph}(t)$

❖ Montrer que l'on peut écrire : $u_m(t) = \frac{kA^2}{2} \left(\cos\left(2 \int \omega(t) dt + \Delta\varphi(\omega(t))\right) + \cos\left(\Delta\varphi(\omega(t))\right) \right)$

Avec $\omega_\Delta S_0 \ll \omega_p$, le deuxième terme devient : $-\frac{kA^2}{2} \frac{\omega_\Delta}{\omega_p} S_0 \cos(\omega_m t + \varphi')$

❖ Montrer que le passe-bas a été dimensionné pour ne laisser passer que la composante proportionnelle au signal modulant que l'on cherche à récupérer (rappel $f_m = 1 \text{ kHz}$ et $f_p = 20 \text{ kHz}$).

2.4. Vérification expérimentale

❖ Avec la porteuse utilisée depuis le début (qq volts et 20 kHz), et un signal modulant à 1 kHz et d'amplitude assurant un indice de modulation faible, vérifier que le signal à la sortie correspond bien au signal modulant. Imprimer la superposition des deux signaux sur un même schéma

❖ L'amplitude du signal de sortie prédite dans l'étude théorique est-elle conforme à l'expérience ?

3. (si temps) Application au multiplexage

Il s'agit ici d'appliquer la modulation de fréquence pour illustrer le multiplexage, i.e. la possibilité de transporter deux signaux par le même canal tout en étant capable de récupérer l'un ou l'autre distinctement à la sortie du démodulateur. Les signaux sont mélangés en temps, et l'idée est de les garder séparés en fréquence.

On utilise deux signaux s_{info1} et s_{info2} chacun étant issu d'un téléphone portable émettant de la musique.

Deux montages amplificateurs permettent d'amplifier les faibles tensions émises par la prise jack des téléphones.

On dispose par ailleurs de deux GBF modulables en fréquence.

On dispose aussi d'un montage soustracteur, disposant de deux entrées et d'une sortie, cette dernière étant égale à la soustraction entre les deux tensions d'entrée. Ce dispositif peut être utilisé pour « mélanger » les signaux en temps.

- Présenter au professeur un montage permettant d'injecter les deux signaux émis par les téléphones, et de récupérer l'un ou l'autre en sortie du montage démodulateur.
- Une fois validé, le réaliser.