

TP 8

Détection synchrone

Ce TP présente une méthode de mesure de fréquence très répandue dans les laboratoires : la détection synchrone. Cette méthode est au programme en PC, elle est à savoir présenter et expliquer en autonomie. En pratique, c'est sans doute l'un des plus gros montages d'électronique que vous réaliserez cette année. Attachez-vous à segmenter (dans votre esprit, mais aussi sur la paillasse dans la mesure du possible) les différentes parties du montage pour ne pas vous perdre dans son câblage.

On se fixe comme objectif de mesurer dans ce TP le décalage Doppler d'une onde ultrasonore reçue par un détecteur lorsque l'émetteur est en mouvement.

Travail préliminaire.

Commencer par lire le TP entier en diagonal, puis répondre aux questions suivantes. Les lois élémentaires de l'ALI sont, en régime linéaire (ce qui est le cas dans le montage proposé) $V_+ = V_-$ et $i_+ = i_- = 0$.

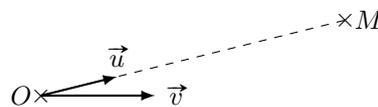
- 1) Le banc motorisé permet de déplacer l'émetteur (ou le détecteur) de quelques centimètres par seconde. L'onde ultrasonore a une fréquence $f = 40$ kHz. En déduire le décalage en fréquence par effet Doppler Δf . À l'aide de l'oscilloscope, peut-on déterminer f et f' suffisamment précisément pour avoir un Δf raisonnable?
- 2) Démontrer la fonction de transfert du montage amplificateur inverseur. En pratique, comment choisir les valeurs de R_1 et R_2 ?
- 3) Comment réaliser un filtre passe-bas avec une résistance et un condensateur? Dans la situation du TP, quelle doit-être la fréquence de coupure? Comment choisir alors les valeurs de R et C ?
- 4) Dans le contexte du TP, le signal en sortie du multiplieur est $w = k x(t) y(t)$ avec $k = 0,1 \text{ V}^{-1}$. Comprenez-vous l'intérêt pour le constructeur (et les utilisateurs) de choisir une constante $k = 0,1 \text{ V}^{-1}$?

1 Rappel sur l'effet Doppler

L'effet Doppler est un effet purement cinématique de décalage en fréquence d'une onde (de nature quelconque) reçue lorsque la source O et/ou le détecteur M sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. Pour rappel, la fréquence f' de l'onde reçue est

$$f' = \frac{f}{1 - \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{c}}$$

où f est la fréquence de l'onde émise, c la célérité des ondes dans le milieu, \vec{v} la vitesse de l'émetteur dans le référentiel du détecteur, et $\vec{u} = \frac{\vec{OM}}{\|\vec{OM}\|}$ le vecteur unitaire directeur entre O et M



Pour acquérir une compréhension graphique du phénomène, on pourra regarder les illustrations disponibles ici :

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/son/doppler_explication.php

Le décalage Doppler est par définition $\Delta f = f' - f$. Dans le cas (quasiment toujours vérifié) où la vitesse \vec{v} est faible devant la célérité des ondes $\|\vec{v}\| \ll c$, un développement limité conduit à l'expression

$$\Delta f \approx \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{c} f$$

qui se simplifie encore, dans le cas d'une géométrie où $\vec{v} = V \vec{u}$ (déplacement purement longitudinal, et vitesse de l'émetteur $V > 0$ dirigée vers la détecteur) en

$$\Delta f = \frac{V}{c} f$$

Contextualisation. On peut par exemple vouloir mesurer la vitesse d'une voiture sur l'autoroute grâce à un radar. Un radar fonctionne comme suit : il émet une onde radio (d'où le nom « rad » ar, on rencontre aussi les sonars qui émettent du son et les lidars qui émettent de la lumière, de l'anglais *light*). Cette onde radio est réfléchiée par la voiture qui sert alors d'émetteur secondaire. Le radar reçoit ensuite l'onde réfléchiée. La voiture se déplaçant à une vitesse V par rapport au radar, l'onde reçue a été décalée en fréquence (en réalité deux fois puisque l'onde fait un aller-retour depuis le radar) par effet Doppler. Le décalage Doppler de l'onde reçue par le radar est alors

$$\Delta f = 2 \frac{V}{c} f$$

Les ondes radio se propagent dans l'air quasiment à la vitesse de la lumière dans le vide $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pour une fréquence radio typique $f \approx 10^{10} \text{ Hz}$ et pour une vitesse $V \approx 100 \text{ km/h}$, on trouve un décalage

$$\Delta f = 12 \text{ kHz}$$

Pour relever ce décalage, le détecteur doit être capable de mesurer une fréquence voisine de 10^{10} Hz à 10^4 Hz près, soit une précision relative de 10^{-6} ! Si cela est faisable directement avec des appareils sophistiqués, il est peut-être plus pertinent dans ce contexte de trouver un moyen détourné nécessitant moins de précision pour mesurer un si petit décalage en fréquence. C'est le principe de la détection synchrone!

2 Théorie : la détection synchrone du point de vue temporel

La détection synchrone est une méthode qui permet, à partir d'un signal de fréquence $f' = f + \Delta f$, de se ramener à un signal de fréquence Δf , et de mesurer ainsi directement Δf plutôt que f' . Elle repose sur l'utilisation d'un **multiplicateur de signaux**, dont le rôle est... de multiplier deux signaux. On donnera plus de détail sur ce composant dans la partie expérimentale. On se contente dans cette partie de comprendre le principe de la détection synchrone en adoptant un point de vue temporel.

Pour l'exemple, on reçoit une onde sonore p_r de fréquence f' , décalée par effet Doppler par rapport à l'onde émise p_e de fréquence f . On écrit

$$p_r(t) = P_r \cos(2\pi f' t + \varphi) \quad \text{au niveau du récepteur, et} \quad p_e(t) = P_e \cos(2\pi f t) \quad \text{au niveau de l'émetteur.}$$

Le deux signaux sont a priori déphasés, ce qui est représenté par la phase à l'origine φ dans p_r . On suppose pouvoir récupérer les deux signaux (en pratique, on a pas toujours accès à p_e , et la méthode se veut alors un peu plus compliquée...). En utilisant un multiplieur pour multiplier ces deux signaux, on obtient à la sortie de ce composant le signal $m(t)$

$$m(t) = p_r(t) p_e(t) = P_r P_e \cos(2\pi f' t + \varphi) \cos(2\pi f t)$$

Et, sachant que $\cos a \cos b = \frac{1}{2} (\cos(a+b) + \cos(a-b))$, on peut réécrire

$$\begin{aligned} m(t) &= \frac{P_r P_e}{2} \left(\cos(2\pi(f' + f)t + \varphi) + \cos(2\pi(f' - f)t + \varphi) \right) \\ &= \frac{P_r P_e}{2} \left(\cos(2\pi(2f + \Delta f)t + \varphi) + \cos(2\pi(\Delta f)t + \varphi) \right) \end{aligned}$$

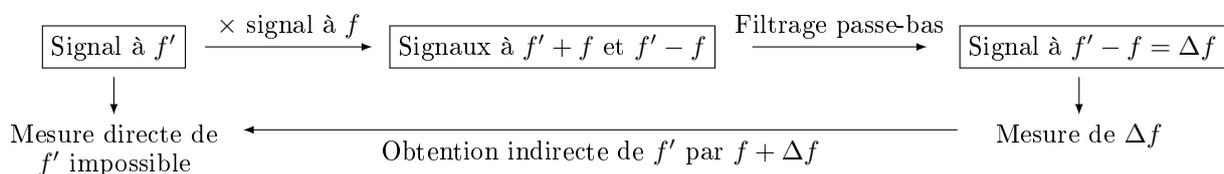
On obtient ainsi un signal composé d'une haute fréquence $2f + \Delta f$ et d'une basse fréquence Δf . Un simple filtrage passe-bas permet ensuite de ne garder que la composante basse fréquence. Le signal filtré $\mathcal{F}(t)$ ressemble alors à

$$\mathcal{F}(t) = \mathcal{F}_0 \cos(2\pi \Delta f t + \phi)$$

Il suffit de mesurer directement sa fréquence Δf , par exemple en réalisant une transformée de Fourier du signal expérimental.

Contextualisation. Qu'a-t-on gagné à faire toutes ces manipulations? Revenons sur l'illustration du radar d'autoroute pour le comprendre. À la fin de la détection synchrone, on obtient un signal de fréquence $\Delta f \approx 10 \text{ kHz}$ dont on peut mesurer la fréquence facilement et précisément à l'oscilloscope par exemple.

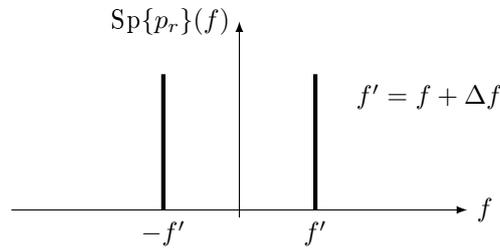
Et il faut réaliser que la « vraie » fréquence de l'onde reçue est $f' \approx 10^{10} \text{ Hz}$, hors du domaine de mesure d'un simple oscilloscope. Ce qu'on gagne en faisant de la détection synchrone, c'est avant tout de réussir à mesurer $f' = f + \Delta f$ avec du matériel de lycée! Schématiquement



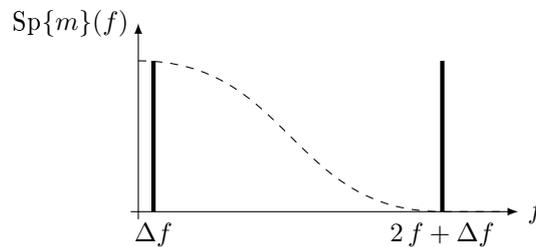
3 Théorie : la détection synchrone du point de vue fréquentiel

On souhaite dans cette partie illustrer de nouveau les manipulations successives du signal cette fois-ci dans le domaine spectral (ou fréquentiel).

On reprend le signal reçu $p_r(t) = P_r \cos(2\pi f' t + \varphi)$. Puisque $\cos(2\pi f' t) = \frac{1}{2}(e^{2i\pi f' t} + e^{-2i\pi f' t})$, le tracé du spectre du signal $\text{Sp}\{p_r\}$ (c'est-à-dire le tracé du module carré de l'amplitude de sa décomposition spectrale) est



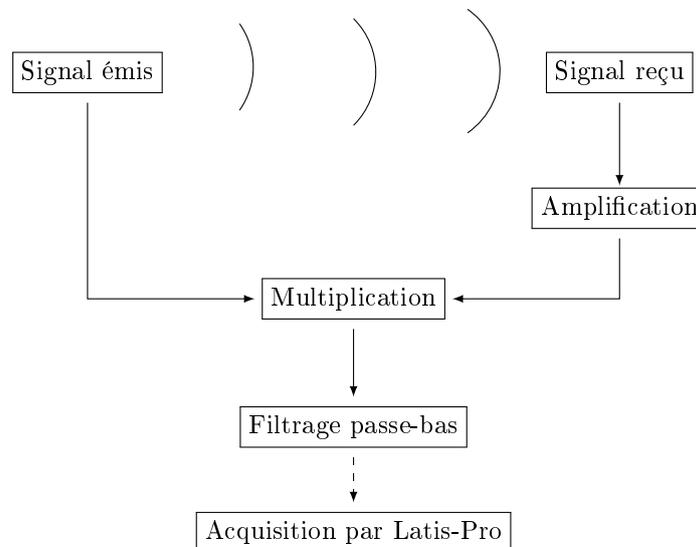
On ne s'intéresse en pratique qu'aux composantes positives $f > 0$, c'est pourquoi on fait disparaître dans la suite la partie gauche du spectre. La multiplication par le signal émis p_e à la fréquence f conduit, d'après les calculs de la partie précédente, à un signal dont le spectre est



L'utilisation d'un filtre passe-bas (dont la fonction de transfert est représentée schématiquement en pointillé sur le même graphique) permet de ne garder que la composante à la fréquence Δf .

4 Réalisation expérimentale de la détection synchrone

Si le principe de la détection synchrone est compris, vous pouvez passer à sa réalisation expérimentale. En pratique, le signal reçu est assez faible, et il est d'usage de chercher à l'amplifier avant de le multiplier au signal émis. On utilise pour cela un amplificateur linéaire intégré. Le « schéma-bloc » du montage à câbler est représenté ci-dessous :

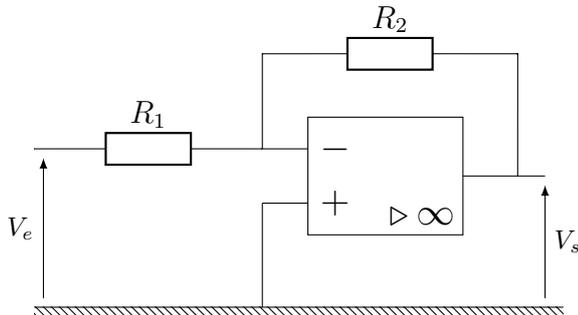


La mesure de la fréquence Δf se fait ensuite sur Latis Pro.

Signaux émis et reçus. On utilise des émetteurs/récepteurs piézo-électriques ultrasonores. Ils sont conçus pour fonctionner au mieux autour de 40 kHz. C'est cette fréquence que l'on utilisera. On alimente l'émetteur avec un GBF, avec un signal sinusoïdal d'amplitude 3 V (soit $V_{pp} = 6$ V). Le but du TP sera de mettre en mouvement l'émetteur (ou

le récepteur). Cela sera fait seulement à la toute fin du TP, à l'aide d'un banc motorisé. En conséquence, le montage se fait initialement avec un émetteur et un récepteur fixes, donc on a $\Delta f = 0$, et donc le signal multiplié puis filtré sera constant dans le temps (fréquence nulle).

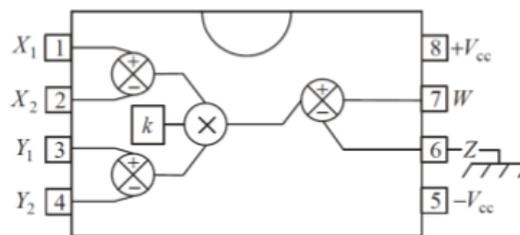
Amplification. On amplifie le signal reçu avec le montage suivant, appelé montage amplificateur inverseur. Référez-vous au TP 7 pour le câblage de l'ALI. Proposez des valeurs pour R_1 et R_2 .



Sa fonction de transfert est

$$\underline{H} = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Multiplication. Pour multiplier les deux signaux, on utilise le composant AD 633, dont le schéma est représenté ci-dessous.



brochage du multiplieur AD633JN

L'AD 633 est doit être alimenté par ses broches $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$, avec $\pm V_{cc} = \pm 15$ V. Les deux signaux d'entrées x (tension entre les broches X_1 et X_2) et y (tension entre les broches Y_1 et Y_2) provoquent en sortie un potentiel sur la broche W

$$w = k x(t) y(t) - z \quad \text{avec} \quad k = 0,1 \text{ V}^{-1} \quad (\text{donnée constructeur})$$

Dans notre cas, on l'utilise en mettant les broches X_2 , Y_2 et Z à la masse (alors $z = 0$). Le signal émis est connecté en Y_1 et le signal reçu amplifié sur X_1 . Le multiplieur est en partie précâblé pour vous faciliter la tâche, mais n'hésitez pas à vérifier rapidement que les branchements sont corrects.

Filtrage. (Non guidé) Réalisez un filtre passe-bas à l'aide d'un condensateur et d'une résistance. Choisissez convenablement les valeurs de R et C .

Montage. Câbler progressivement tout le montage. Il est conseillé de réaliser chacune des étapes indépendamment pour contrôler individuellement leur fonctionnement, puis de tout rassembler seulement à la fin.

Test du montage. Une fois le montage réalisé, vous pouvez le tester en envoyant sur le multiplieur un signal du GBF à 40 000 Hz et un autre à 40 010 Hz par exemple (amplitude 3 V), à la place du signal émis et du signal reçu amplifié. Vous devriez obtenir en fin de montage un signal à 10 Hz.

Détection synchrone. Une fois votre montage prêt, demandez le banc motorisé et mesurer la vitesse du récepteur (ou de l'émetteur) sur le banc, à partir de la formule de l'effet Doppler

$$V = \frac{\Delta f}{f} c$$

avec c la célérité du son $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.