

References

- [1] Duffait. *Expériences d'électronique*.
- [2] Doninni and Quaranta. *Dictionnaire de physique expérimentale tome IV*.
- [3] LE GOFF. *Modulation d'amplitude, détection synchrone*. BUP 771, 1995.
- [4] Fruchart, Lidon, Thibierge, Champion, and Le Diffon. *Physique expérimentale: Optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique*.

Contents

1	Détection synchrone (Lock-in amplification)	1
1.1	Principe de la détection synchrone	1
1.2	Mesure d'impédance par détection synchrone	2
1.3	Détection d'un signal noyé dans le bruit	2
1.4	Démodulation d'amplitude	3
1.5	Analyseur de spectre	4
1.6	Mesure de l'effet Doppler/vitesse d'un mobile par détection synchrone	4
1.7	Principe d'un théremine	4

1 Détection synchrone (Lock-in amplification)

1.1 Principe de la détection synchrone

Lire par exemple [1, 2] pour des détails sur la détection synchrone. La détection synchrone est une technique de traitement du signal utilisée pour extraire un signal de faible amplitude noyé dans un bruit important. Elle repose sur la multiplication du signal reçu par un signal de référence synchrone avec la porteuse du signal utile. Considérons un signal reçu $s(t) = m(t) \cos(\omega_p t + \phi(t)) + b(t)$, où:

- $m(t)$ est l'amplitude et $\phi(t)$ la phase du signal. L'information utile est contenue dans $m(t)$ et/ou $\phi(t)$.
- ω_p est la pulsation de la porteuse
- $b(t)$ représente le bruit.

Le principe de la détection synchrone consiste à multiplier ce signal par un signal de référence $r(t) = \cos(\omega_r t)$ synchrone avec la porteuse, i.e. la plupart du temps $\omega_r = \omega_p$. On obtient alors le signal suivant:

$$\begin{aligned} s_d(t) &= s(t)r(t) \\ &= [m(t) \cos(\omega_p t + \phi(t)) + b(t)] \cos(\omega_r t) \\ &= \frac{1}{2}m(t)[\cos((\omega_p - \omega_r)t + \phi(t)) + \cos((\omega_p + \omega_r)t)] + b(t) \cos(\omega_r t) \end{aligned}$$

Avec $\omega_r = \omega_p$, on obtient finalement:

$$s_d(t) = \frac{1}{2}m(t) \cos(\phi(t)) + \frac{1}{2}m(t) \cos(2\omega_p t + \phi(t)) + b(t) \cos(\omega_p t)$$

En filtrant ce signal avec un filtre passe-bas, on peut éliminer les termes en haute fréquence ($2\omega_p$ et ω_p) et ainsi récupérer la modulation $m(t)$ ou $\phi(t)$.

1.2 Mesure d'impédance par détection synchrone

Cette technique permet de déterminer la partie réelle et imaginaire d'une impédance inconnue. Un courant de la forme $I_0 \cos(\omega t)$ est appliqué à l'impédance $Z = Z_{re} + iZ_{im}$. La tension aux bornes de l'impédance est alors $U_Z = Z_{re}I_0 \cos(\omega t) + Z_{im}I_0 \sin(\omega t)$.

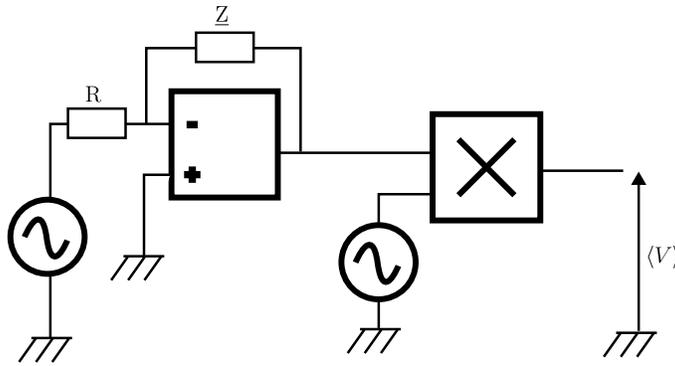


Figure 1: Mesure d'une impédance complexe à ω par détection synchrone.

En multipliant cette tension par un signal synchrone en phase ou déphasé de 90° , on isole respectivement Z_{re} et Z_{im} . Un voltmètre continu permet de mesurer la valeur moyenne des signaux résultants, proportionnelle à la partie réelle ou imaginaire de l'impédance.

Pour que cette mesure reste pratique, il faut un GBF¹ dont les deux voies synchronisées peuvent être pilotées en phase (l'une par rapport à l'autre). Alternativement, ou en l'absence de ce type de GBF, il est possible d'utiliser un montage déphaseur à une fréquence donnée avec un A.O.. Cependant, c'est plus fastidieux, et je ne le recommande pas pour un montage sur la détection synchrone le jour J.

On réalise un montage amplificateur inverseur avec en première impédance une résistance permettant de convertir la tension imposée par le GBF en courant traversant la deuxième impédance qu'on souhaite caractériser. La tension de sortie de l'AO est ensuite multipliée au signal de référence et on mesure avec un voltmètre la tension continue (cela évite de devoir ajouter un filtre passe-bas après le multiplieur).

1.3 Détection d'un signal noyé dans le bruit

Lorsque un signal de faible amplitude est noyé dans un bruit important, la détection synchrone permet de l'extraire en exploitant sa synchronisation avec un signal de référence. On

¹par exemple le GBF 33500B

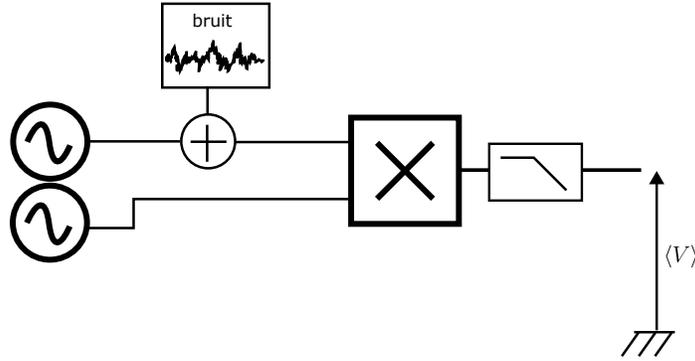


Figure 2: Mesure d'un signal dans du bruit par détection synchrone

améliore ainsi le rapport signal sur bruit (SNR). La multiplication par ce signal de référence décale le spectre du signal utile autour de la fréquence nulle, tandis que le bruit reste réparti sur une large bande de fréquences. Un filtre passe-bas permet alors d'éliminer la majeure partie du bruit et de récupérer le signal utile.

Mesurer le SNR avec et sans détection synchrone. Mesurer le SNR en fonction de la bande passante du filtre passe-bas. Pour cela, on additionne au signal utile d'un GBF du bruit venant d'un générateur de bruit (dont on contrôle l'amplitude). On peut alors faire une mesure de l'amplitude du signal seul (en mettant le bruit à 0), de l'amplitude du bruit (en mettant le signal à 0) et calculer un rapport signal sur bruit.

1.4 Démodulation d'amplitude

Lire [3] pour plus d'info.

La démodulation d'amplitude par détection synchrone est une technique plus robuste que la détection d'enveloppe, surtout en présence de bruit. La détection synchrone permet de démoduler le signal AM $m(t)$ en le multipliant par un signal de référence synchrone avec la porteuse, puis en filtrant le résultat avec un filtre passe-bas bien choisi.

Une problématique rencontrée en démodulation est que la démodulation synchrone ne fonctionne correctement que si la porteuse et le signal utilisé pour la démodulation maintiennent un déphasage constant au cours du temps. Pour s'affranchir de ce problème de "fading" (perte de synchronisation), une boucle à verrouillage de phase (PLL) est utilisée pour reconstruire la porteuse à partir du signal reçu. Une PLL est un système asservi qui permet de créer un oscillateur commandé en tension (OCT) oscillant à la même fréquence que le signal à démoduler. Le signal de référence peut ainsi évoluer au cours du temps pour maintenir la synchronisation.

Une PLL est composée de

- Comparateur de phase : compare les phases des signaux d'entrée (v_e) et de sortie (v_s) et génère une tension (v_ϕ) en fonction de la différence de phase
- Filtre passe-bas : élimine les composantes haute fréquence du signal de sortie du comparateur de phase

- OCT : génère un signal dont la fréquence est contrôlée par la tension de sortie du filtre passe-bas

1.5 Analyseur de spectre

La détection synchrone peut également être utilisée pour réaliser un analyseur de spectre (c'est alors un analyseur de spectre par mesure heterodyne plutôt que filtre-passe bande glissant). Pour cela, à la place d'un signal de référence à fréquence fixée, on utilise un oscillateur à fréquence variable, i.e. un GBF wobulé au cours du temps entre une fréquence f_{start} et une fréquence f_{stop} . De plus, après le filtre passe-bas, on ajoute un détecteur de crête.

Mesurer ainsi le spectre de plusieurs types de signaux, sinusoïdal, créneaux, triangles etc... Jouer avec le filtre passe-bas et le détecteur de crête et leur liens avec les performances de l'analyseur comme la bande passante de résolution.

1.6 Mesure de l'effet Doppler/vitesse d'un mobile par détection synchrone

Voir par exemple [4].

Une source à ultra-son est mis en mouvement relatif à vitesse v constante par rapport à un récepteur. Par effet Doppler, la fréquence mesurée va différer de la fréquence émise. Utiliser la détection synchrone pour mesurer Δf . En déduire v .

1.7 Principe d'un thérémine

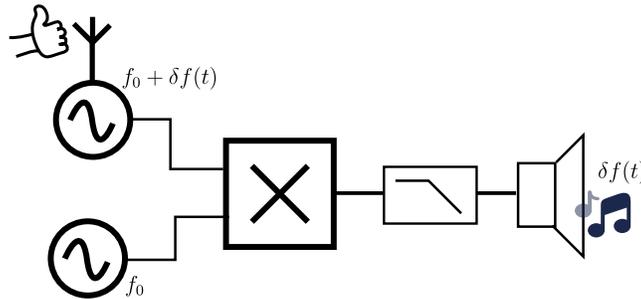


Figure 3: Principe d'un thérémine

Le thérémine est un des plus anciens instruments de musique électronique, inventé en 1920 par le physicien Russe Léon Theremin. Par l'usage d'effet capacitif du musicien sur des antennes, l'instrument a la particularité de produire de la musique sans être touché par le musicien. L'ODG de changement capacitif par déplacement de la main du musicien est de l'ordre de 1 pF, ce qui donne une variation relative de 1/1000 pour une capacité en parallèle de 1 nF. En incluant cette antenne dans un oscillateur, on obtient alors un oscillateur à fréquence variable $f(C)$ suivant la position de la main. La variation relative de

capacité va donc induire une variation de fréquence $\Delta f/f_0 \simeq \alpha \Delta C/C$ avec α un préfacteur numérique de l'ordre de 1 dépendant du type d'oscillateur choisi. La gamme de l'audible est [400, 20000] Hz, on souhaite alors avoir idéalement f_0 au milieu ou en bordure et $\Delta f \sim 10$ à 20 kHz. Cependant, même pour $f_0 = 20$ kHz, on a au mieux, $\Delta f \simeq 20$ Hz avec notre ODG d'effet capacitif. L'idée est donc de s'inspirer de la (dé)modulation radio/détection synchrone en choisissant un grand f_0 (idéalement 20 MHz ou plus, mais c'est au-delà de la bande passante du matériel usuel de TP élec...) pour avoir un grand Δf et ensuite de le "démoduler" ou décaler en fréquence, en le multipliant par une porteuse à (ou proche de) f_0 pour n'avoir que le signal à Δf après passage dans un filtre passe-bas bien choisi.