

TP n°9 – Radar à effet Doppler (2h)

Effet Doppler longitudinal

Décrire et mettre en œuvre un protocole de détection « synchrone » pour mesurer une vitesse par décalage Doppler

Objectifs :

- Exploiter la détection synchrone pour mettre en évidence l'effet Doppler dans le domaine ultrason
- Mesurer la vitesse d'un mobile en exploitant l'effet Doppler

1. Principe du radar à effet Doppler

1.1. Rapide mise en évidence expérimentale de l'effet Doppler à l'aide d'un smartphone

Il est possible de télécharger des applications smartphone gratuites générant des sons sinusoïdaux de fréquence et d'intensité réglables :

- « Signal Gen » sur iPhone
 - « Signal Generator » Sur Android
- ❖ Générer un signal de fréquence de l'ordre du kilohertz et d'intensité maximale (sans casser les oreilles de vos camarades). En tenant le smartphone dans la main, effectuer rapidement de grands cercles avec le bras tendu (sans vous claquer l'épaule)
 - ❖ Vérifier que lorsque le récepteur (l'oreille de votre binôme) est dans le plan du mouvement, il perçoit une variation périodique de la fréquence : élévation de fréquence quand le téléphone s'approche, diminution lorsqu'il s'éloigne. L'idéal est de réaliser l'expérience en aveugle : votre binôme doit fermer les yeux. Il faut aussi se placer assez loin l'un de l'autre pour éviter de confondre la variation périodique de fréquence avec la variation périodique du volume sonore (quand le téléphone est plus proche, le son entendu est plus intense).
 - ❖ Vérifier que lorsque le récepteur est dans une direction orthogonale au plan du mouvement, il ne perçoit aucune modification
 - ❖ On peut aussi télécharger une application enregistrant les sons et traçant leur spectre de Fourier. Remplacer alors l'oreille par un second téléphone enregistreur, et vérifier l'existence d'un décalage en fréquence. Quel est l'ordre de grandeur de ce décalage ?

1.2. Expression mathématique du décalage en fréquence



On considère un émetteur E se déplaçant à la vitesse $\vec{v}_e = v_e \vec{u}_x$, et un récepteur R se déplaçant sur l'axe Ox à la vitesse $\vec{v}_r = v_r \vec{u}_x$ (v_e et v_r sont algébriques). Les ondes sonores se déplacent à une vitesse égale à la célérité c .

L'émetteur émet un signal de fréquence f_e et le récepteur reçoit un signal de fréquence $f_r \neq f_e$:

$$f_r = f_e \frac{c - v_r}{c - v_e}$$

On considère à présent un émetteur fixe. Le mobile R n'est plus un récepteur, mais un objet réfléchissant l'onde émise par E. Conformément à la formule ci-dessus, cet objet réfléchit vers l'émetteur E une onde de fréquence f_r . Un récepteur R', placé au même niveau que l'émetteur E, perçoit alors une fréquence f_r' . On peut montrer que si $v_r \ll c$, la fréquence perçue par R' est une fonction affine de la vitesse de l'objet.

Soit un émetteur fixe émettant une onde de fréquence f_e . Un objet en mouvement s'éloignant à la vitesse v réfléchit l'onde qui retourne vers l'émetteur. La fréquence f_r' de l'onde reçue par l'émetteur vérifie :

$$f_r' = f_e \left(1 - \frac{2v}{c} \right) = f_e - f_{\text{Doppler}}$$

*v est algébrique : positif si le véhicule s'éloigne, négatif s'il se rapproche.
Cette formule n'est valide que si les trois objets E, R et R' sont placés sur une même ligne.*

Dans le cas général, c'est la projection du vecteur vitesse selon la trajectoire de l'onde qui doit être considérée

1.3. Démonstration mathématique de l'effet Doppler

Pour simplifier, on considère un signal émis constitué d'impulsions séparées d'une durée $T_e = 1/f_e$. En remplaçant ensuite ces impulsions par les maxima d'un signal sinusoïdal, il est facile de transposer le résultat au cas d'une onde harmonique. Le récepteur R mesure la fréquence f_r du signal reçu.

On reprend la situation générale décrite dans la partie précédente : un émetteur et un récepteur en mouvement.

A $t = 0$, l'émetteur se trouve en A_0 et le récepteur R en B_0 distant de L de A_0 : $A_0B_0 = L$.

A $t = 0$, l'impulsion $n = 0$ est émise.

A $t_n = nT_e$, l'impulsion n est émise.

- ❖ Déterminer les équations horaires des mouvements :
 - de l'émetteur E
 - du récepteur R
 - de la n^e impulsion, seulement à partir de l'instant $t_n = nT_e$ où celle-ci est émise
- ❖ Déterminer la durée entre la réception par R de l'impulsion n et l'impulsion $n + 1$
- ❖ En déduire la relation entre f_r et f_e . Interpréter physiquement le résultat (discussion en fonction des signes)
- ❖ Que devient la relation entre fréquences émise et reçue si l'émetteur est fixe ?

On considère à présent un radar, constitué d'un émetteur fixe servant aussi de récepteur final. Le récepteur R des calculs précédents est un véhicule, qui réfléchit le signal de fréquence f_r vers le radar.

- ❖ Dans le cas classique où $|v_r| \ll c$, montrer que la fréquence f_r' détectée par le radar s'écrit :

$$f_r' = f_e \left(1 - \frac{2v_r}{c} \right)$$

- ❖ La gendarmerie utilise un radar à effet Doppler pour contrôler la vitesse des véhicules. Un tel radar fonctionne sur le principe précédent. Le signal est une onde électromagnétique hertzienne sinusoïdale de fréquence $f = 5$ GHz. On supposera que la célérité des ondes électromagnétiques dans l'air est celle des ondes électromagnétiques sinusoïdales planes dans le vide, soit $c = 3.10^8$ m.s⁻¹. Donner la vitesse (en km/h) d'un véhicule si une mesure donne $|\Delta f| = 972$ Hz

Animation : http://anisciences.free.fr/demos/ani_1/ondbi/19dop.swf

2. Mesure de la vitesse d'un mobile par radar Doppler

2.1. Prise en main du matériel



On dispose d'un émetteur d'ultrasons (gauche photo), et de plusieurs récepteurs (un à droite photo). L'émetteur doit être alimenté par une tension continue de 15V pour fonctionner. On génère alors un signal sinusoïdal de fréquence voisine de 40 kHz, et d'amplitude égale à qq volts. Le gros bouton noir permet de régler l'amplitude de l'onde émise.

Précaution expérimentale

L'alimentation de l'émetteur ne doit pas être utilisée simultanément pour le montage électronique décrit ci-après. En effet, cela aurait pour effet de relier les parties commande et puissance de l'émetteur, et cet effet de masse commune n'est pas prévue par le constructeur, donc non souhaitable à son bon fonctionnement.

Il est possible de visualiser ce signal interne à l'oscilloscope via la borne BNC de l'émetteur. On notera que ce signal est créneau, contrairement à l'onde émise, qui est sinusoïdale. C'est l'élément piézoélectrique qui joue le rôle de filtre passe-bande très sélectif, qui ne retient que le fondamental du créneau excitateur pour émettre l'onde sinusoïdale.

Les deux boutons du bas permettent de régler le type d'émission d'onde :

- émission continue d'onde sinusoïdale (bouton vers le bas)
 - émission par salve d'onde sinusoïdale (bouton vers le haut). Le 2^e bouton règle alors la durée de la salve
- ❖ Disposer un récepteur en face de l'émetteur. Observer à l'oscilloscope le signal interne de l'émetteur et le signal reçu par le récepteur
- ❖ Tourner le bouton noir jusqu'à obtenir une amplitude maximale de l'onde détectée par le récepteur

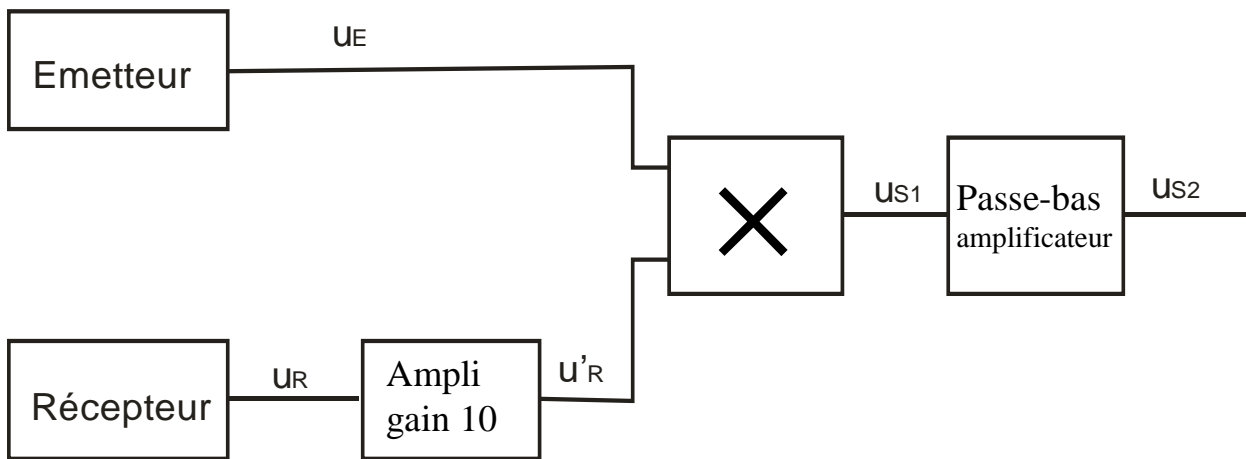
2.2. Montage électronique pour extraire la fréquence doppler

On dispose d'une table traçante dont le bras se déplace à vitesse constante, réglable. Comme le montre la photo, une plaque métallique peut être montée sur le bras, et ainsi jouer le rôle du mobile réflecteur de l'onde ultrasonore.

Il s'agit à présent de réaliser un montage électronique permettant d'extraire la valeur de la fréquence Doppler $f_{doppler} = f_e \frac{2v}{c}$. La fréquence de l'émetteur et la célérité des ondes étant connues, cela donne alors accès à la vitesse du mobile.

Voici le schéma fonctionnel du montage :





- ❖ Expliquer en quoi la détection synchrone (multiplieur associé au passe-bas) permet de récupérer un signal de fréquence égale à $f_{doppler}$
- ❖ Le passe-bas est équivalent à un RC , avec $R = 1,5 \text{ k}\Omega$ et $C = 10 \text{ nF}$. Est-il bien dimensionné compte-tenu des ordres de grandeur impliqués dans l'expérience ?
- ❖ Pourquoi est-il nécessaire d'amplifier le signal du récepteur ? Que se passerait-il si on ne l'amplifiait pas ?

NB : on notera que le passe-bas possède un gain statique égal à 10, i.e. il amplifie les signaux dont les fréquences se situent dans sa bande passante.

2.3. Mesure de la vitesse du mobile

- ❖ Mesurer la vitesse du mobile entraîné par la table traçante avec le radar Doppler
- ❖ La vitesse de la table traçante est-elle effectivement stable au cours du temps ?
- ❖ Comparer votre mesure avec une estimation de la vitesse réalisée par un autre moyen. On s'attachera à évaluer les incertitudes de mesures des deux méthodes pour comparer les deux valeurs obtenues