

Étude des signaux émis par une chauve-souris

MARIA BARBI, ÉRIC CHASSANDE-MOTTIN (29 NOVEMBRE 2004)

1 Introduction

La chasse d'une chauve-souris peut être schématisée comme composée de deux phases : une phase de *veille*, dans laquelle l'animal examine ses environs à la recherche des cibles possibles, et une phase de *poursuite* de la proie ainsi identifiée.

Dans la première phase, il est donc utile pour la chauve-souris, de pouvoir identifier une proie en mouvement (insecte) des autres objets qui l'entourent : une sensibilité à la vitesse, combinée évidemment à une détermination de la position, est donc requise. Pour la poursuite et la capture de la proie, la localisation précise de la position de la proie dans l'espace devient essentielle.

Il est connu par ailleurs que les chauve-souris, aveugles, utilisent leur ouïe pour s'orienter et pour identifier leurs proies. Plus précisément, elles émettent une onde sonore, et reçoivent les échos réfléchis par les objets environnants. C'est donc à travers une analyse du signal reçu que la détermination de la position et de la vitesse de ces objets doit être faite.

La réflexion d'une onde sonore par un objet en mouvement entraîne une modification des caractéristiques de l'onde sonore connue comme *effet Doppler*. Si on appelle $u(\omega, t)$ le signal harmonique émis (éventuellement modulé en fréquence : $\omega = \omega(t)$) et $e(\omega, t)$ l'écho reçu, r_0 la distance de la source du son à l'objet, c la vitesse du son, v la vitesse de l'objet, alors on a

$$e(\omega, t) = \sqrt{s_0} u(s_0\omega, t - \tau_0) \quad (1)$$

où

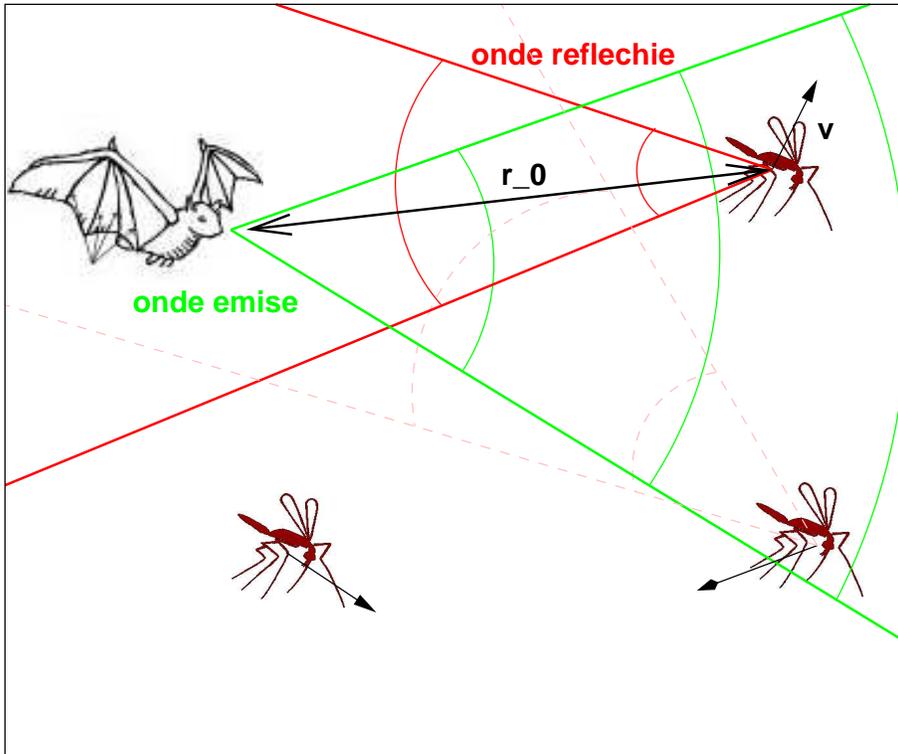
$$s_0 = \frac{c - v}{c + v} \quad \text{et} \quad \tau_0 = \frac{2r_0}{c}. \quad (2)$$

L'écho est donc un signal retardé du temps τ_0 nécessaire à faire l'aller-retour jusqu'à l'objet. De plus, pour chaque composante harmonique du signal émis, l'écho contient une composante harmonique de fréquence réduite (ou augmentée, selon le signe de v) d'un facteur s_0 .

La question générale que l'on peut se poser alors est s'il est possible d'identifier une forme de signal "optimal" pour la détermination des quantités intéressantes dans les deux phases de chasse. On peut remarquer, en considérant les deux dernières relations écrites, que la connaissance des paramètres s_0 et τ_0 permet de déterminer, respectivement, la vitesse v et la distance r_0 de l'obstacle. Une mesure précise de s_0 sera donc utile pendant la veille pour identifier la vitesse v des objets en mouvement ; une mesure précise du retard τ_0 sera ensuite nécessaire pour une bonne localisation de la proie.

2 Localisation

On peut commencer donc pour s'interroger sur la méthode pratique utilisée par la chauve-souris pour la détermination de la distance d'un objet. Il a été déterminé



que la chauve-souris est capable d'une résolution en distance de l'ordre du millimètre - ce qui correspond à une indétermination sur τ_0 de l'ordre d'une dizaine de microsecondes. La durée du cri émis par la chauve-souris est de l'ordre de la milli-seconde. Il faut donc un système de mesure du retard précis et très rapide. Le modèle proposé pour cette mesure est l'utilisation d'un mécanisme analogue à celui utilisé par les radars et qui est appelé, dans le cas des ondes sonores, *sonar*.

Le système de détection serait basé sur une mesure de *corrélation* du signal reçu avec un signal de référence. Il s'agit d'une méthode dite de "*filtre adapté*" : dans le cas général, elle permet de comparer un signal bruité, issu d'une mesure, avec le signal "attendu", caractéristique par exemple d'un événement physique donné, et d'estimer avec quel degré de confiance on peut affirmer que l'événement en question a été observé au cours de la mesure effectuée.

2.1 Doppler-invariance

La présence d'effet Doppler, c'est-à-dire de déformation du signal reçu par rapport au signal émis, représente évidemment une complication pour la mise au point d'un système de détection qui doit être capable, entre autre, de connaître le signal "attendu" à comparer au signal reçu. On a pu mettre en évidence que la chauve-souris est capable de simplifier ce problème. Le cri qu'elle émet est - très souvent - un signal dit *Doppler-invariant* : la forme du signal (les fréquences émises, qui changent dans le temps du cri) est choisie de telle façon que l'écho sur n'importe quel objet est toujours proportionnel au signal émis.

Pour ce type de signaux Doppler-invariants, la méthode du filtre adapté revient à faire une corrélation entre le signal émis et le signal reçu (écho+bruit éventuel).

Quelle doit être la forme d'un signal Doppler-invariant ? On vérifie que cette propriété est caractéristique des signaux qui possèdent à chaque instant une seule

fréquence $\omega(t)$, avec une dépendance du temps du type

$$\omega(t) = \frac{\alpha}{t}. \quad (3)$$

Ces signaux sont appelés "chirps hyperboliques" ou *modulés à période linéaire*, à cause de la dépendance linéaire dans le temps de la période.

De manière explicite, un tel signal s'écrit comme la partie réelle du signal complexe suivant :

$$u(t) = a(t) \exp(j(\alpha \ln t + \beta)), \quad (4)$$

où l'enveloppe $a(t)$ est une fonction log-normale. Pour comprendre l'origine de l'expression précédente on remarque que, si le signal possède une seule fréquence caractéristique à chaque instant, indiquée par $\omega(t)$, on peut écrire

$$u(t) = a(t) \exp(j\phi(t)) \quad (5)$$

et on vérifie facilement que, si $\phi(t) = \alpha \ln t + \beta$, alors $\omega(t) = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha}{t}$. Alternative-ment, on peut écrire $\phi(t) = \int \omega(t) dt = \int \frac{\alpha}{t} dt = \alpha \ln t + \beta$.

On peut donner facilement une démonstration de la Doppler-invariance en ne considérant que la partie oscillante du signal $\exp(j(\alpha \ln t + \beta))$. Dans le PROJET 1 on propose l'étude de deux signaux au but de déterminer si quel(s) de deux sont du type *chirp* hyperbolique, et de retrouver la dépendance eq. (3).

2.2 Corrélation

On est donc ramené au calcul de la corrélation entre un signal émis, $u(t)$, et son écho, $e(t)$, à laquelle s'ajoute éventuellement un bruit $b(t)$:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} [e(t') + b(t')] u^*(t' - t) dt' \quad (6)$$

où $u^*(t)$ est le complexe conjugué de $u(t)$. Pour simplifier notre description nous allons faire l'hypothèse (très irréaliste!) de bruit négligeable. Si le signal est Doppler-invariant, alors $e(t) \propto u(t - \tau_0)$ et la quantité à calculer n'est finalement que :

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t' - \tau_0) u^*(t' - t) dt'. \quad (7)$$

On peut vérifier que pour $u(t) = a(t) \exp(j(\alpha \ln t + \beta))$, on obtient une auto-corrélation $g(t)$ dont l'enveloppe a son maximum pour $t = \tau_0$. On a donc un système pour la détermination de τ_0 , et par conséquent de la distance r_0 cherchée.

Dans le PROJET 2 on étudiera les propriétés de Doppler invariance d'un signal réel par une approche alternative et on discutera les conséquences de cette propriété sur la détermination de la distance d'un objet grâce à une mesure de corrélation.

3 Mouvement

Une fois trouvé le mécanisme capable de déterminer la position d'un objet et le type de signal émis dans ce but, on peut revenir sur le problème de déterminer si un tel objet est en mouvement ou immobile. L'émission d'un *chirp* hyperbolique s'avère optimale pour une détermination précise de la position. La situation est différente pour l'estimation de la vitesse de l'objet. Il faut remarquer que l'écho du signal considéré en Sect. 2.1, en raison de sa Doppler-invariance, ne dépend pas du paramètre s_0 . Il ne contient donc pas d'information sur la vitesse v .

La chauve-souris sera donc amenée à utiliser un signal de type différent pour la mesure de v - ou bien à modifier en partie ce signal de façon à avoir les deux informations en même temps. C'est le but du PROJET 3 de déterminer le mécanisme permettant une mesure de la vitesse et de le justifier par un calcul mathématique.

PROJET 1

On dispose de deux enregistrements numériques en milieu naturel de cris émis par une chauve-souris pendant la phase de veille et de poursuite (`veille1.dat`, `poursuite1.dat`). Étudier ces signaux et leurs spectres. Utiliser une analyse temps-fréquence pour déterminer si et quel(s) de deux signaux sont du type *chirp* hyperbolique, en déterminant la relation qui relie la fréquence instantanée au temps par la méthode que l'on considérera la plus appropriée (Cfr. NOTE).

On pourra aussi prouver la Doppler-invariance de la fonction eq. (4) et centrer son exposé sur cette propriété et ses avantages.

PROJET 2

On dispose d'un enregistrement numérique en milieu naturel du cri émis par une chauve-souris pendant la phase de poursuite et enregistré (`poursuite2.dat`). Ce signal est approximativement du type *chirp* hyperbolique, et l'on s'attend donc à qu'il soit Doppler-invariant. Si cette hypothèse est vraie, alors la dilatation que l'effet Doppler induit pour $v > 0$ (par exemple) ne devrait pas changer les caractéristiques de ce signal. Par une manipulation des données, construire à partir du signal réel un signal fictif dilaté ou comprimé simulant l'écho de ce signal. On conseille un facteur de dilatation/compression $s_0 = 1.5$ ou 0.7 . Étudier les transformées temps-fréquence des deux signaux (original vs. dilaté ou comprimé) afin de vérifier si on peut effectivement dire que le signal donné est insensible à l'effet Doppler, et dans quel sens ceci est vrai.

On pourra aussi montrer que le maximum de la fonction de corrélation eq. (7) permet de déterminer la position d'une cible, et centrer son exposé sur la description de la méthode utilisée par la chauve souris pendant la phase de poursuite.

PROJET 3

On dispose de deux enregistrements numériques en milieu naturel de cris émis par une chauve-souris pendant la phase de veille et de poursuite (`veille3.dat`, `poursuite3.dat`). Étudier ces signaux et leurs spectres, en faire une analyse temps-fréquence. En sachant que la chauve-souris est sensible à la fréquence $\omega(t)$ d'un son mais n'est pas capable d'en déterminer la phase $\phi(t)$, et en comparant la forme des deux signaux, essayer de comprendre quel type de signal elle utilise pour déterminer la vitesse d'une proie.

On pourra aussi essayer de justifier par un calcul le résultat obtenu et centrer son exposé sur la phase de veille et la détermination de la vitesse.

NOTE. La possibilité de visualiser et déterminer la dépendance en fonction du temps de la fréquence du signal, $\omega(t)$, peut être utile pour les trois projets. En particulier, elle est nécessaire pour le premier projet, afin de vérifier la dépendance de la fréquence en $1/t$. Il faudra donc essayer d'exploiter le résultat de l'analyse temps-fréquence pour tracer une courbe simple $\omega(t)$. Ce même procédé peut être utilisé dans les projets 2 et 3 pour vérifier l'allure de la fréquence et comparer différents signaux.

Pour des résultats plus quantitatifs, il existe de plus la possibilité de faire un fit de la fonction $\omega(t)$ tracée pour déterminer numériquement les valeurs des paramètres qu'elle contient. Pour cela, on pourra aussi considérer une fonction équivalente mais plus simple, dont le fit serait plus facile à faire.

Note technique

Le fichier `seq_complete.dat` contient la séquence originale du signal enregistré en milieu naturel (Villars-les-Dombes, France, 06/05/82) pendant la chasse de la chauve-souris *Myotis mystacinus*. L'enregistrement a été fait avec une fréquence d'échantillonnage de 230.4 kHz et un filtre passe-bande [8 kHz 80 kHz]. Le nombre total de point est de 216 000.

Les fichiers `veilleX.dat` et `poursuiteX.dat` sont des extraits de cette séquence de longueurs différentes, auxquels on a soustrait leur valeur moyenne.

L'analyse temps fréquence peut se faire sous SCILAB en utilisant la fonction `tfrsp.sci`. Pour un faire un plot qui contient à la fois le signal, sa transformée de Fourier et le spectre temps-fréquence en échelle de couleurs on a préparé une fonction nommée `plot_tf.sci`. Les deux fonctions doivent être d'abord exécutées dans l'environnement SCILAB (avec la commande `exec('tfrsp.sci')` par exemple) pour pouvoir être en suite utilisées. La fonction `disprog.sci` doit aussi être disponible dans le même répertoire. Le mode d'emploi de ces fonctions est reporté en commentaire au début des fichiers correspondants.

Autres fonctions SCILAB qui peuvent être utiles pour les différents projets :

```
tfrsp
fft
max
find
datafit
sound
```