Travaux Pratiques Traitement du Signal Audionumérique

Bertrand David et Roland Badeau

Octobre 2012

Les fichiers utiles au TP peuvent être récupérés à l'adresse suivante :
`http://perso.telecom-paristech.fr/rbadeau/atiam.html`

1 Echantillonnage et repliement (ambigu.m, repli1.m, repli2.m)

1.1 Echantillonnage d'un sinus.

`ambigu.m` produit deux signaux s_1 et s_2 qui sont respectivement l'échantillonnage à 8000 Hz de $\cos(2\pi 500t)$ et $\cos(2\pi 7500t)$. Ecoutez et visualisez le résultat avec les fonctions `soundsc` et `plot` de Matlab. Interpréter. Pour quels autres choix de fréquence aurait-on le phénomène ? Quel serait le résultat en changeant le cosinus en sinus ?

1.2 Repliement

`repli1.m` montre l'effet du repliement dans une synthèse à table d'onde, où le signal est composé de deux sinusoïdes telles que la table contienne un nombre entier de périodes pour chacune des deux. Lorsqu'on change la note jouée, le signal est rééchantillonné par interpolation linéaire des échantillons de la table, lue en boucle. Ecouter le résultat et identifier le phénomène. Montrer qu'on peut modéliser celui-ci à l'aide d'un bloqueur d'ordre 1 (fonction h d'interpolation triangle : $x_a(t) = \sum_{n\in\mathbb{Z}} x(n)h(t - nT_e)$) suivi d'un rééchantillonnage. Conclure.

1.3 Carré

`repli2.m` s'intéresse au même effet sur une forme d'onde carrée. Ecouter et visualiser le signal `wt`. Interprétez et expliquer pourquoi il faut limiter le nombre d'harmoniques du carré pour construire la table d'onde. Quel phénomène typique apparaît sur la forme d'onde `wt1`. Incorporer la partie rééchantillonnage de `repli1.m` pour écouter le résultat lors de la transposition. Conclure.

2 Filtrage et TZ

2.1 Filtres stables ou instables ?

On réalise des filtres au hasard en tirant un numérateur et un dénominateur de la fonction de transfert d'ordre 3, à l'aide de la commande (pour le numérateur) `num = 2*rand(1,3);`. Visualiser les pôles et les zéros à l'aide de la fonction `zplane`. A quelle condition, si on considère les filtres causaux, ces filtres sont-ils stables ? A l'aide de la fonction `roots`, élaborer un script renvoyant la mention "stable" ou "instable" selon le filtre considéré.

Dans le cas d'un filtre instable, utiliser `freqz` pour visualiser la réponse en fréquence. Interpréter.

2.2 Filtrage récursif, détection d'enveloppe et compression

Une manière de détecter l'enveloppe énergétique d'un signal audio-fréquences $x(t), t \in \mathbb{Z}$ est d'effectuer les traitements suivants :

1. calcul de l'énergie instantanée $e(t) = x(t)^2$,
2. filtrage passe-bas $y(t) = h(t) \star e(t)$.

On peut alors réaliser un compresseur simple en appliquant un gain d'autant plus fort que y est faible, par exemple, en supposant $|y| < 1$ (sinon on le normalise) : $g(t) = y(t)^{\alpha-1}$ avec $\alpha \in [0\,1]$. En fait pour traiter les cas où y est faible on pourra utiliser plutôt $g(t) = (y(t) + \epsilon)^{\alpha-1}$.

Pour des raisons de complexité, on cherche à réaliser le filtre sous forme récursive suivant l'équation $y(t) = ay(t-1) + e(t)$. Quelle est la fonction de transfert en Z associée $H(z)$ (transformée en z de $h(t)$) ? Quelle est la réponse impulsionnelle du filtre associée pour $a = 0.9$? Quelle serait-elle pour $a = 1.1$? Dans le cas $a = 0.9$, dessiner l'allure de la réponse en fréquence $H(e^{j2\pi\nu})$, $\nu \in [-0.5\;0.5]$. Vérifier à l'aide la fonction `freqz` de matlab. Que se passe t-il lorsque a se rapproche de la valeur 1 ? s'éloigne de la valeur 1 ? devient complexe ($a = e^{j2\pi\nu_0}$) ?

Calculer la réponse à l'échelon unité du filtre avec $a \in [0\,1[$? Montrer qu'elle de la forme $1 - e^{-t/\tau}$ où on précisera τ. Conclure sur l'influence de a sur τ et donc sur le comportement global du système.

En déduire une valeur de a tel que τ (en échantillons) correspondent à une durée de l'ordre de 20ms.

Réaliser la chaîne de traitement complète.

2.3 Filtrage téléphonique d'une voix chantée (filtfen.m).

Pour obtenir un effet "à la Portishead" on veut synthétiser un filtre passe-bande 300-3500 Hz à appliquer à une voix chantée. Le programme `filtfen.m` réalise la synthèse à fenêtre d'un filtre RIF passe-bas paramétrable en largeur de bande, nombre de points et type de fenêtre. Observer les résultats et conclure sur le rôle respectif de `Nh` et du type de fenêtre. Vous pourrez utiliser la démo `gibbs.m` en complément.

Comment passer de la réponse impulsionnelle h du passe-bas à celle h_b du passe-bande ? Réaliser le passe-bande recherché en modifiant le programme. Ecouter le résultat (fonctions `filter` et `soundsc` de matlab).

3 TFD et son inverse

3.1 Analyse spectrale

`obspec.m` réalise la synthèse de deux sinusoïdes d'amplitude et fréquence paramétrables, et l'observation de ces sinusoïdes à l'aide de la TFD (`fft` de matlab), paramétrable en terme de nombre de points (`nfft`) donc en taille du *zero-padding* et de type de fenêtre. Dans un premier temps fixer $A_1 = A_2 = 1$ et l'espacement fréquentiel $\nu_2 - \nu_1 = 0.01$ observer le rôle des autres paramètres et interpréter. Comment "résoudre" les deux composantes ? Quel paramètre est déterminant lorsqu'on cherche à estimer les deux fréquences en observant le spectre ?

Dans un deuxième temps, faire le même exercice avec par exemple $A_2 = A_1/20$.

3.2 Estimation

En adaptant le programme précédent et en utilisant la fonction `wavread` de matlab, observer le spectre de la voyelle "a" (signal `aa.wav`). Montrer en calculant la TFtd d'un sinus fenêtré qu'on peut estimer l'amplitude, la fréquence et la phase des sinusoïdes sur le spectre observé. Construire alors un signal de synthèse composé des composantes sinusoïdales estimées. Comment réaliser un vibrato de cette même voix ?

3.3 Décalage circulaire

Soit $x(n)$ une séquence de longueur N. Soit $X(e^{j2\pi\nu})$ sa TFtd. Calculer la séquence

$$\tilde{x}(p) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(e^{j2\pi \frac{k}{N}}) e^{j2\pi \frac{kp}{N}}$$

et montrer qu'elle s'exprime comme une convolution $[x * p_N](n)$. Que représente dès lors $\tilde{x}$ en fonction de x ?

Executer le programme `decalcirc.m` et interpréter.

3.4 Repliement temporel

Soit $x(n)$ le triangle de hauteur 1, centré en temps et de support $[-(N-1)\ (N-1)]$ (*i.e.* $x(n) = |n|/N$ pour $n \in [-(N-1)\ (N-1)]$ et $x(n) = 0$ ailleurs). Que vaut sa TFtd $X(e^{j2\pi\nu})$? Poser $N = 150$ par exemple et réaliser l'opération `y = ifft(`$X(e^{j2\pi k/N})$`,256)` où $k = [0, \ldots, N-1]$. Conclure.

3.5 Convolution par la FFT

Soit $x(n)$ un signal de longueur finie N et $y(n)$ un signal de longueur finie M. Quelle est la longueur du signal $z(n) = x(n) \star y(n)$? En déduire une méthode pour trouver z utilisant les TFD d'ordre P (à préciser) de x et y. Expérimenter sous matlab.

4 Filtrages non invariants

4.1 Décimation

On désire effectuer une décimation par un facteur 4 d'un signal échantillonné originellement à 44100 Hz. Décrire la chaîne de traitement et l'implémenter en adaptant le programme de synthèse à fenêtre `filtfen.m`. Ecouter le résultat. Comparer avec la simple commande `xs = x(1:4:end)`.

4.2 Suréchantillonnage

C'est un traitement utilisé en sortie de CD pour reconstruire avec moins de distortions le signal. Soit $x(n) = x_a(nT_e)$ la séquence à traiter, x_a désignant le signal analogique dont x est l'échantillonnage à la période T_e. On cherche à obtenir le signal $y(n)$ tel que y soit l'échantillonnage de x_a à la période $M * T_e$. Soit $x_i(n)$ la séquence obtenue à partir de $x(n)$ en insérant $M-1$ zéros entre chaque échantillon. Quelle est la relation entre $X_i(z)$ et $X(z)$? En déduire la chaîne de traitement à mettre en oeuvre et la réaliser. Voyez vous l'intérêt de reconstruire le signal à $4F_e$ par exemple, plutôt qu'à F_e ?