Université du Maine
Licence SPI 2è année
POLYCOPIÉ de TRAVAUX PRATIQUES

TRAVAUX PRATIQUES de TRAITEMENT du SIGNAL

Frédéric ABLITZER, Bruno BROUARD, Bertrand LIHOREAU, Balbine MAILLOU, Laurent SIMON

Le Mans, année 2014-2015

Chapitre 1

TP2 : convolution, série de Fourier

1.1 Convolution de signaux de synthèse

Objectif : Convoluer des signaux temporels (d'entrée) avec des réponses impulsionnelles, écouter et interpréter les résultats. Plusieurs réponses impulsionnelles synthétiques sont proposées.

1.1.1 Réponse impulsionnelle de type exponentielle décroissante

Soit la réponse impulsionnelle causale

$$h_1(t) = \exp(-\alpha_1 t) \text{ pour } t \geq 0.$$

Utiliser le programme **exo9a.m** pour convoluer un signal par cette réponse impulsionnelle. Le signal d'entrée x(t) est un signal périodique comportant 8 harmoniques, de fréquence fondamentale $F_0 = 200$ Hz. Le programme génère un fichier son, extrait des signaux d'entrée et de sortie (xc_exo9a.wav et yc_exo9a.wav).

Comparer les formes temporelles des signaux d'entrée et de sortie pour différentes valeurs de α_1 (par exemple $\alpha_1 = 500\times 2\pi$, $\alpha_1 = 1000\times 2\pi$, $\alpha_1 = 100\times 2\pi$) et écouter les sons correspondants.

Q1. Le signal est-il toujours périodique après convolution par h_1(t) ?
   A. OUI
   B. NON

Q2. La fréquence fondamentale est-elle modifiée après convolution par h_1(t) ?
   A. OUI
   B. NON

Q3. Perceptivement, le signal après convolution semble contenir
   A. moins d'aigus
   B. moins de graves

Q4. La convolution par la réponse impulsionnelle $h_1(t)$ agit comme
   A. un filtre passe-bande
   B. un filtre passe-haut
   C. un filtre passe-bas

Q5. Que contrôle le paramètre α_1 ?

Q6. Quelle condition doivent vérifier les paramètres α_1 et T_{sup} (durée pour que l'amplitude décroisse d'un facteur 100) pour que la convolution de $x(t)$ par $h_1(t)$ apporte une modification négligeable à $x(t)$? Expliquer.
   A. $T_{\text{sup}} \to 0$
   B. $\alpha_1 \to 0$
   C. $T_{\text{sup}} \to \infty$
   D. $\alpha_1 \to \infty$

1.1.2 Réponse impulsionnelle de type cosinus fenêtré par une exponentielle décroissante

Soit la réponse impulsionnelle causale

$$h_2(t) = \exp(-\alpha_2 t) \cdot \cos(2\pi F_0 t) \text{ pour } t \geq 0.$$

Utiliser le programme **exo9b.m** pour convoluer un signal d'entrée par cette réponse impulsionnelle. Le signal d'entrée x(t) est sinus glissant dont la fréquence varie linéairement entre 100 Hz et 1 kHz. Le programme génère un fichier son pour les signaux d'entrée et de sortie (xc_exo9b.wav et yc_exo9b.wav).

Pour chacun des jeux de paramètres suivants, comparer les signaux d'entrée et de sortie et écouter les sons correspondants.

- $F_0 = 400$ Hz et $\alpha_2 = 100 \times 2\pi$ s^{-1}
- $F_0 = 400$ Hz et $\alpha_2 = 20 \times 2\pi$ s^{-1}
- $F_0 = 800$ Hz et $\alpha_2 = 20 \times 2\pi$ s^{-1}

Q7. La convolution par la réponse impulsionnelle $h_2(t)$ agit comme
   A. un filtre passe-bas
   B. un filtre passe-haut
   C. un filtre passe-bande

Q8. Que contrôle le paramètre α_2 ?

Q9. Que contrôle le paramètre F_0 ?

1.1.3 Réponse impulsionnelle de type fenêtre rectangulaire

Soit la réponse impulsionnelle causale

$$h_3(t) = \mathrm{Rect}_{T_W}(t - t_0).$$

Utiliser le programme **exo9c.m** pour convoluer un signal d'entrée par cette réponse impulsionnelle. Le signal d'entrée $x(t)$ est la somme d'un bruit large bande (bruit blanc) et d'une composante basse fréquence centrée sur 100 Hz. La convolution avec la réponse impulsionnelle $h_3(t)$ s'apparente à un filtrage dit "moyenneur". Le paramètre t_0 est fixé à $\mathrm{t}_0 = \frac{T_w}{2}$.

Q10. Quelle est l'influence du paramètre t_0 sur le produit de convolution ?

Q11. Dans le cas présent, l'impact du paramètre t_0 est perceptible par l'écoute
   A. VRAI
   B. FAUX

Q12. La convolution avec la fonction rectangle induit un filtrage
   A. passe-haut
   B. passe-bas

Q13. Un filtrage plus sélectif est permis par
   A. une augmentation de T_w
   B. une diminution de T_w

1.2 Convolution de signaux de synthèse approximant des systèmes réels

Objectif : Convoluer des signaux temporels (d'entrée) avec des réponses impulsionnelles, écouter et interpréter les résultats. Cette section traite de la propagation d'un signal dans un canal de transmission avec un seul écho dans un premier temps puis avec de multiples échos (hypothèse : pas de déformation de la forme du signal).

1.2.1 Son direct + 1 écho

Un signal $x(t)$ est émis et envoyé via un canal de transmission (système). Pour des raisons liées à la présence d'une réflexion, le signal de reception prend la forme :

$$y(t) = x(t - t_d) + \alpha x(t - (t_d + t_1)),$$

avec $\alpha \in]0,1[$, $t_d > 0$ et $t_1 > 0$. Le programme **exo10a.m** simule le fonctionnement de ce système. Les valeurs de t_1 et α sont à fixer.

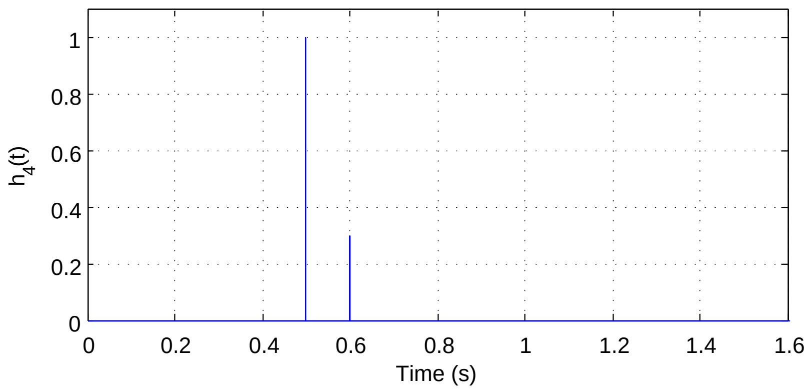
Q14. Quelle est la signification physique des paramètres t_1 et t_d ?

Q15. Une expression équivalente pour $y(t)$ est
- A. $y(t) = x(t) * \left[\delta(t - t_d) + \alpha\delta(t - (t_d + t_1))\right]$
- B. $y(t) = x(t) * \delta(t - t_d) * \alpha\delta(t - t_d - t_1)$
- C. $y(t) = x(t) * \left[\delta(t_d - t) + \alpha\delta((t_d + t_1) - t)\right]$
- D. $y(t) = x(t) * \alpha\delta(t - t_d - t_1) * \delta(t - t_d)$

Q16. Dans le signal reçu, l'écho arrive au temps $t = t_1$.
- A. VRAI
- B. FAUX

Q17. Pour qu'il n'y ait pas recouvrement entre le signal direct et le signal d'écho, la durée du signal $x(t)$ devrait être inférieure à
- A. t_d
- B. t_1
- C. $t_d - t_1$
- D. $t_1 - t_d$

Q18. Déterminer les valeurs des paramètres t_d, t_1 et α permettant d'obtenir la réponse impulsionnelle tracée ci-dessous.



1.2.2 Annulation d'écho (domaine temporel)

Pour supprimer de manière automatique la déformation introduite par l'écho dans le signal $y(t)$ de l'exercice précédent, on met en place une ligne à retard (problème inverse). Les paramètres t_1 et α sont supposés connus. À partir de $y(t)$ (donné dans l'exercice précédent), le programme **exo10a.m** génère le signal

$$z(t) = y(t) - \alpha y(t - t_1) + \alpha^2 y(t - 2t_1) - \alpha^3 y(t - 3t_1).$$

Utiliser le programme dans la configuration suivante : $t_1 = 0.25$ s, $\alpha = 0.4$.

Q19. Montrer que $z(t) = x(t - t_d) - \alpha^4 x(t - t_d - 4t_1)$.
Indication : commencer par écrire les expressions de $y(t)$, $y(t-t_1)$, $y(t-2t_1)$ et $y(t - 3t_1)$.

Q20. Par rapport au signal $y(t)$, l'écho est décalé de
- A. 0.25 s
- B. 0.4 s
- C. 0.75 s
- D. 0.95 s

Q21. Par rapport au signal $y(t)$, l'écho est atténué de
- A. 4 dB
- B. 10 dB
- C. 24 dB
- D. 40 dB

Q22. Exprimer la réponse impulsionnelle $h_5(t)$ telle que $z(t) = y(t) * h_5(t)$.

Q23. Exprimer la réponse impulsionnelle $h(t)$ telle que $z(t) = x(t) * h(t)$, en fonction de $h_5(t)$ et $h_4(t)$ telle que $y(t) = x(t) * h_4(t)$. (Une approche graphique complémentaire sera appréciée)

Le programme **exo10a__bis.m** réalise les mêmes opérations dans le cas d'un fichier son quelconque. Le programme génère deux fichiers, l'un correspondant au signal reçu $y(t)$, l'autre au signal avec annulation d'écho $z(t)$. Tester le programme avec les sons *singing.wav* ou *drums.wav*, pour différentes valeurs des paramètres t_1 et α.

1.2.3 Son direct + échos multiples

On simule le comportement d'une salle parallélépipédique dans laquelle sont placés une source et un microphone. Le programme **exo10b.m** calcule la réponse impulsionnelle d'une salle à partir de ses dimensions, de la position du microphone et de la source, du coefficient de reflexion des parois et de la vitesse du son (ici 343 m.s^{-1}). Le programme calcule également le signal mesuré par le microphone. L'utilisateur peut faire varier les dimensions de la salle à travers le paramètre L et le coefficient de reflexion R des parois. Les dimensions de la salle sont :
- largeur : L m (L à renseigner par l'utilisateur),
- longueur : $1.3L$ m,
- hauteur : 3 m.

La position de la source est fixée en [1m, 1m, 1m]. Le microphone est positionné en [$\frac{L}{2}$ m, $1.3L - 1$, 1.5 m].

Q24. Estimer la distance source-récepteur à l'aide de la réponse impulsionnelle.

Q25. La réponse impulsionnelle calculée par le programme dépend

A. uniquement de la position du microphone

B. uniquement de la position de la source

C. de la position du microphone et de la source

Q26. Donner une expression mathématique pour $h(t)$.

Q27. Que signifie $R = 0$ et $R = 1$?

Q28. Quelle est l'influence du coefficient de réflexion des parois sur la réponse impulsionnelle ? D'un point de vue perceptif ?

Q29. Quelle est l'influence du volume de la salle sur la réponse impulsionnelle ? D'un point de vue perceptif ?

1.3 Convolution de signaux du monde réel

1.3.1 Acoustique des salles

Le programme **convolution.m** réalise la convolution entre un signal d'entrée $x(t)$ et une réponse impulsionnelle $h(t)$. Ces signaux sont choisis par l'utilisateur sous forme de fichiers `.wav`. Différents signaux sont mis à disposition :

– les fichiers `singing.wav`, `tedeum.wav` contiennent des enregistrements en conditions anéchoïques, le fichier `drums.wav` est un son de synthèse

– les fichiers `ri_`$\cdots$`.wav` sont des réponses impulsionnelles mesurées en différents lieux (pièce de vie, salle de concert, cathédrale...)

Utiliser le programme pour convoluer un signal audio et la réponse impulsionnelle d'une salle. Écouter l'effet des différentes salles sur les différents signaux.

1.4 Série de Fourier : signaux de synthèse

Dans cet exercice, il s'agit d'utiliser l'applet JAVA Fourier disponible sur le site : `http://www.falstad.com/fourier/`. Cette applet permet de reconstruire un signal de référence (en blanc) à partir de sa série de Fourier. Chaque composante de la série possède une amplitude complexe (module et phase). Dans un premier temps, cocher la case Mag/Phase view.

Q30. Cliquer sur Sine puis Cosine. Combien de composantes ont ces signaux ?

Q31. Quelle est la différence entre les composantes de ces deux signaux ?

Q32. On s'intéresse maintenant au signal carré (Square). Décrire les composantes de ce signal.

Q33. Cliquer sur le bouton "Phase shift". Observer les modifications du signal temporel et de ses composantes.

Q34. Ecouter le signal en cochant la case "Sound". Quelles sont les différences perceptives lorsque vous appuyez sur le bouton "Phase shift" ?

Q35. Pour finir, modifier la phase d'une des composantes d'amplitude non nul avec la souris. Quel est l'impact de cette modification sur le signal temporel et sur la perception ?

1.5 Série de Fourier : synthèse de signaux musicaux

Objectif : synthétiser le son de différents instruments à partir de séries de Fourier.

Le programme **synthese_fourier.m** permet de générer un extrait de signal périodique à partir des composantes de la série Fourier (les 12 premières composante). Les données d'entrée du programme sont les modules des amplitudes $|c_n|$ (unité arbitraire) et les phases ϕ_n (en radians) des composantes de rang.

Les sons de différents instruments jouant un La4 ($f_0 = 440$ Hz) ont été décomposés en série de Fourier en analysant une portion de signal. Les coefficients obtenus sont rassemblés dans les tableaux ci-dessous.

Utiliser le programme **synthese_fourier.m** pour reconstruire progressivement les signaux et écouter les sons obtenus.

instrument 1		
n	$\|c_n\|$	ϕ_n
0	1	2.05
1	173	2.87
2	87	-0.14
3	137	2.75
4	17	-0.42
5	48	-1.95
6	4	1.82
7	3	1.15
8	4	0.58
9	2	2.52
10	1	1.12
11	3	0.13
12	1	-0.81

instrument 2		
n	$\|c_n\|$	ϕ_n
0	0	3.14
1	227	2.66
2	491	-2.49
3	684	-1.57
4	452	-0.65
5	300	0.40
6	181	1.65
7	99	2.77
8	60	-2.39
9	26	-0.81
10	20	-2.75
11	16	-1.12
12	14	0.28

instrument 3		
n	$\|c_n\|$	ϕ_n
0	2	3.13
1	420	-1.85
2	191	1.24
3	107	2.19
4	126	2.40
5	233	-2.24
6	141	0.21
7	193	-1.65
8	35	-2.02
9	11	-2.40
10	46	1.80
11	29	2.33
12	8	-0.37

Q36. La phase des coefficients de Fourier a une influence sur la forme du signal

A. VRAI

B. FAUX

Q37. La phase des coefficients de Fourier a une influence sur le son perçu

A. VRAI

B. FAUX

Q38. La décomposition en série de Fourier est pertinente pour des sons de

A. trompette

B. guitare

C. piano

D. flute

E. percussions

F. violon