

Cours de

Signaux et Systèmes

Prof. Freddy Mudry

heig-**vd**

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion
du Canton de Vaud

i nstitut d'
Automatisation
i ndustrielle





*"La science, son goût est amer au début
mais à la fin, plus doux que le miel"*

(Plat à décor épigraphique
XI-XIIème siècle, Iran ou Transoxiane
Le Louvre - Arts de l'Islam)

Informations concernant l'unité

SES 2006 - 2007

Signaux et Systèmes, Prof. F. Mudry

Objectifs À l'issue de ce cours, l'étudiant sera en mesure de :

1. Évaluer les caractéristiques et les réponses temporelles d'un système analogique linéaire ou non.
2. Décrire le comportement des systèmes contre-réactionnés.
3. Maîtriser les séries de Fourier : représentations spectrales et calcul de la puissance.
4. Analyser et mettre en pratique les relations temps-fréquence.
5. Évaluer les effets de l'échantillonnage et de la quantification.
6. Évaluer et calculer le comportement d'un système numérique linéaire.

À l'issue des travaux pratiques en laboratoire, l'étudiant sera en outre capable de :

1. Maîtriser un outil de programmation tel que Matlab.
2. Simuler des systèmes analogiques linéaires ou non et apprécier leurs effets.
3. Synthétiser et analyser des signaux.
4. Visualiser, décrire et analyser le spectre d'un signal quelconque.
5. Écrire "en ligne" un rapport succinct mais complet de son travail.

Remarques

1. Le temps accordé pour les exposés et exercices du cours SES est de 4 périodes hebdomadaires pendant un trimestre. Durant le trimestre suivant, le cours de 5 périodes hebdomadaires est complété par un laboratoire de 3 périodes hebdomadaires.
2. Dans la mesure du possible, les cours et exercices sont donnés en alternance durant deux périodes.
3. Les corrigés d'exercices sont donnés dans un fascicule à part. Afin d'apprendre à résoudre les exercices proposés de manière personnelle et indépendante, celui-ci ne devrait pas être consulté pendant les séances d'exercices.
4. Les tests écrits sont constitués de problèmes similaires à ceux proposés comme exercices. Le seul document autorisé pour les TE est un formulaire manuscrit personnel.
5. L'examen de fin d'unité SES se fera sous forme écrite et durera deux heures.
6. Des informations complémentaires sont données dans la fiche de cours SES.

Programme Un temps total de 96 périodes est accordé à cette unité d'enseignement. La répartition et la progression du cours sont données dans le tableau ci-après. Il est bien clair que ce programme constitue une ligne directrice et que le rythme du cours peut être légèrement modifié selon les circonstances.

Semestres	Signaux et Systèmes	Périodes	Total	Semaines
Cours H06-07	Trimestre 2 : 4 pér. hebdo. = 32 périodes			
I	Analyse des systèmes linéaires	6	6	1.5
	Analyse des systèmes analogiques	8	14	3.5
	Éléments de régulation automatique	10	24	6
II	Analyse des signaux périodiques	4	28	7
	1 TE + correction	4	32	8
Cours E07	Trimestre 3 : 5 pér. hebdo. = 40 périodes			
II	Analyse des signaux périodiques (fin)	8	8	1.6
	Analyse des signaux non périodiques	4	12	2.4
	Éléments d'analyse spectrale numérique	4	16	3.2
III	Échantillonnage et reconstruction des signaux	8	24	4.8
	Signaux et systèmes numériques	12	36	7.2
	1 TE + correction	4	40	8
Labo E07	Trimestre 3 : 3 pér. hebdo. = 24 périodes			
IV	Simulation d'un système analogique	6	6	2
	Synthèse et analyse de signaux périodiques	6	12	4
	Numérisation des signaux analogiques	6	18	6
	Synthèse et réalisation de filtres numériques	6	24	8

TAB. 0.1.: Programme d'enseignement de l'unité SES

Bibliographie générale

Traitement des signaux

1. B.P. Lathi : *Signal Processing and Linear Systems*, Berkeley-Cambridge Press, 1998
2. B.P. Lathi : *Linear Systems and Signals*, Berkeley-Cambridge Press, 1992
3. F. de Coulon : *Théorie et traitement des signaux*, PPR, 1984
4. A. Spataru : *Fondements de la théorie de la transmission de l'information*, PPR, 1987
5. A.V. Oppenheim, A.S. Willsky : *Signals and Systems*, Prentice-Hall, 1983

Traitement numérique des signaux

1. B. Porat : *A Course in Digital Signal Processing*, J. Wiley, 1997
2. J.H. McClellan, R.W. Schafer, M.A. Yoder : *DSP First*, Prentice Hall, 1999
3. J.G. Proakis, D.G. Manolakis : *Digital Signal Processing*, MacMillan, 2ème édition, 1992
4. C.S. Burrus et al. : *Computer-Based Exercises for Signal Processing*, Prentice-Hall, 1994
5. V.K. Ingle, J.G. Proakis : *Digital Signal Processing Using MatLab*, PWS, 1997
6. E.C. Ifeachor, B.W. Jervis : *Digital Signal Processing*, Addison-Wesley, 1993

Filtres analogiques et numériques

1. M. Labarrère et al. : *Le filtrage et ses applications*, Cepadues Editions, 1982
2. R. Boîte, H. Leich : *Les filtres numériques*, Masson, 1980
3. R. Miquel : *Le filtrage numérique par microprocesseurs*, Editests, 1985
4. H. Lam : *Analog and Digital Filters*, Prentice Hall, 1979
5. T.W. Parks, C.S. Burrus : *Digital Filter Design*, J. Wiley, 1987
6. Ch.S. Williams : *Designing Digital Filters*, Prentice-Hall, 1986

Analyse spectrale numérique

1. Hewlett-Packard : *The Fundamentals of Signal Analysis*, Application Note 243, 1981
2. R.B. Randall : *Frequency Analysis*, Brüel-Kjaer, 1987
3. C.S. Burrus, T.W. Parks : *DFT / FFT and convolution algorithms*, J. Wiley, 1985
4. R.W. Ramirez : *The FFT Fundamentals and Concepts*, Prentice-Hall, 1985

Traitement de la parole

1. R. Boite et all : *Traitement de la parole*, PPUR, 2000
2. Deller, Proakis, Hansen : *Discrete Time Processing of Speech Signals*, Macmillan, 1993
3. S. Saito, K. Nakata : *Fundamentals of Speech Signal Processing*, Academic Press, 1985
4. L.R. Rabiner, R.W. Schafer : *Digital Signal Processing of Speech*, Prentice-Hall, 1978

Pour le plaisir des yeux et de l'esprit

1. Warusfel André : *Les nombres et leurs mystères*, Seuil 1961
2. Stewart Ian : *Does God Play Dice ? the new mathematics of chaos*, Penguin, 1989
3. Stewart Ian : *Dieu joue-t-il aux dés ? les nouvelles mathématiques du chaos*, Flammarion, 1993
4. Dunham William : *Euler, the master of us all*, The Mathematical Association of America, 1999
5. Maor Eli : *To Infinity and Beyond : a cultural history of the infinity*, Birkhäuser, 1986
6. Klein Etienne : *Il était sept fois la révolution - Albert Einstein et les autres*, Flammarion, 2005
7. Klein Etienne : *La physique quantique*, Dominos Flammarion, 1996
8. Hawking Stephen : *Une brève histoire du temps*, Flammarion, 1988
9. Reeves Hubert : *Malicorne : réflexions d'un observateur de la nature*, Seuil, 1990
10. ThuanTrinh Xuan : *Le chaos et l'harmonie : la fabrication du réel*, folio essais, Gallimard, 1998
11. Davis Ph.J, Hersh R. : *L'univers mathématique*, Bordas 1985
12. Ekeland Ivan : *Le Calcul, l'Imprévu : les figures du temps de Kepler à Thom*, Seuil, 1984
13. Conway John : *The Book of Numbers*, Copernicus, 1996
14. Fivaz Roland : *L'ordre et la volupté*, PPR 1989
15. Lesieur Marcel : *La turbulence*, Grenoble PUG 1994

Quelques adresses Internet

Démonstrations interactives

1. <http://www.jhu.edu/~signals/>
2. <http://image-1.rose-hulman.edu/~yoder/bookcd/visible/contents/cover.htm>
3. <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/home.text.htm>

Livre et divers

1. <http://www.dspguide.com/pdfbook.htm>
2. <http://www.redcedar.com/learndsp.htm>
3. <http://www.dspguru.com/info/tutor/other.htm>

Logiciels gratuits

1. <http://www.sysquake.com>
2. <http://www.dspguru.com/sw/opendsp/mathclo.htm>
3. <http://www-rocq.inria.fr/scilab/scilab.htm>

Table des matières

I. Étude des systèmes analogiques	1
1. Analyse des systèmes linéaires	3
1.1. La transformation de Laplace	3
1.1.1. Rappels mathématiques	3
1.1.2. Quelques exemples introductifs	5
1.1.3. Impédances et fonctions de transfert symboliques	10
1.2. Réponses temporelles vs pôles et zéros	11
1.2.1. Effets des pôles et zéros	11
1.2.2. Effet des conditions initiales	12
1.3. Analyse d'un système d'ordre 1	14
1.3.1. Fonction de transfert	14
1.3.2. Pôle et réponse transitoire	15
1.3.3. Réponse indicielle	15
1.4. Analyse d'un système d'ordre 2	17
1.4.1. Fonction de transfert	17
1.4.2. Pôles et réponse transitoire	18
1.4.3. Réponse indicielle d'un système d'ordre 2	20
1.5. Réponses temporelles des circuits linéaires	23
1.5.1. Représentation des quadripôles	23
1.5.2. Pôles d'un système et réponse temporelle	24
1.5.3. Évaluation du comportement temporel	25
1.5.4. Exemple	26
1.6. Réponse impulsionnelle d'un système	27
1.6.1. Remarques concernant l'impulsion de Dirac	28
1.6.2. Réponse impulsionnelle	29
1.7. Produit de convolution	31
1.7.1. Réponse temporelle des systèmes linéaires	32
1.7.2. Réponse d'un système causal	34
1.7.3. Convolution numérique	34
1.8. Exercices	37
2. Modélisation des systèmes analogiques	45
2.1. Système oscillant	45
2.1.1. Équations différentielles	45
2.1.2. Fonction de transfert	46
2.1.3. Conclusion	47

Table des matières

2.2.	Échangeur de chaleur	47
2.3.	Démarche associée à la modélisation	48
2.3.1.	Conclusion	52
2.4.	Un système non linéaire : le réservoir d'eau	54
2.4.1.	Équations	54
2.4.2.	Résolution numérique	56
2.4.3.	Linéarisation	57
2.4.4.	Fonction de transfert	59
2.4.5.	Conclusion	60
2.5.	Représentations des systèmes analogiques	60
2.6.	Un système électromécanique : le moteur DC	61
2.6.1.	Équations différentielles	62
2.6.2.	Fonction de transfert	65
2.6.3.	Temps caractéristiques	67
2.6.4.	Schéma fonctionnel	67
2.6.5.	Approximation d'ordre 1	68
2.6.6.	Effets d'un réducteur	69
2.7.	Comportement d'un moteur DC	71
2.7.1.	Paramètres d'un moteur	71
2.7.2.	Comportement statique	71
2.7.3.	Comportement dynamique	73
2.7.4.	Exemple	75
2.8.	Simulation d'un moteur DC	78
2.9.	Conclusion générale	83
2.10.	Exercices	84
3.	Éléments de régulation automatique	91
3.1.	Schémas fonctionnels	91
3.1.1.	Schéma à contre-réaction	91
3.1.2.	Schéma général d'un système asservi	92
3.1.3.	Fonctions de transfert d'un système asservi	94
3.2.	Analyse de systèmes simples	95
3.2.1.	Systèmes d'ordre 1	95
3.2.2.	Systèmes d'ordre 2	98
3.2.3.	Systèmes d'ordre supérieur à 2	101
3.2.4.	Conclusions	102
3.3.	Calcul d'un asservissement de position	104
3.4.	Étude d'un asservissement avec Matlab	108
3.5.	Une application : le circuit PLL	113
3.5.1.	Démodulation FM	114
3.5.2.	Description d'un circuit PLL	116
3.6.	Analyse du PLL en mode synchronisé	118
3.6.1.	Remarques importantes	119
3.6.2.	Choix du filtre	119
3.6.3.	Fonction de transfert en boucle ouverte	120
3.6.4.	Fonction de transfert en boucle fermée	120

3.6.5.	Calcul de ω_3 et ω_4	121
3.7.	Calcul d'un circuit PLL	123
3.7.1.	Schémas fonctionnel et de réalisation	123
3.7.2.	Détecteur de phase (XOR)	124
3.7.3.	Filtre à retard de phase	124
3.7.4.	Oscillateur	125
3.7.5.	PLL en boucle ouverte	125
3.7.6.	PLL en boucle fermée	126
3.7.7.	Calcul du filtre	127
3.8.	Simulation d'un circuit PLL	129
3.9.	Circuit PLL en mode non - synchronisé	129
3.10.	Exercices	131

II. Analyse des signaux analogiques 139

4.	Analyse des signaux périodiques	141
4.1.	Introduction	141
4.2.	Deux représentations pour un seul signal	141
4.3.	Séries de Fourier	142
4.3.1.	Définition de la série de Fourier	142
4.3.2.	Série de Fourier en cosinus	145
4.3.3.	Série de Fourier complexe	146
4.3.4.	Relations entre les trois représentations de Fourier	147
4.4.	Théorème de la puissance ou de Parseval	147
4.5.	Spectres d'amplitudes et de phases	149
4.5.1.	Spectres unilatéraux et bilatéraux	149
4.5.2.	Coefficients spectraux et symétries des signaux	151
4.5.3.	Exemple de représentations spectrales d'un signal	151
4.6.	Suite d'impulsions	152
4.6.1.	Suite d'impulsions rectangulaires	152
4.6.2.	Suite d'impulsions triangulaires	156
4.6.3.	Suite d'exponentielles décroissantes	156
4.7.	Reconstruction des signaux	158
4.7.1.	Synthèse d'un signal	158
4.7.2.	Phénomène de Gibbs	159
4.7.3.	Importance de la phase	161
4.8.	Quelques théorèmes utiles	161
4.8.1.	Décalage temporel	161
4.8.2.	Modulation d'amplitude	163
4.8.3.	Rotation autour de l'ordonnée	164
4.9.	Calcul de quelques spectres	164
4.9.1.	Suite d'impulsions composites	165
4.9.2.	SIR décalée	165
4.10.	Réponse d'un système linéaire	168
4.10.1.	Analyse de la réponse d'un filtre passe-bas	168

Table des matières

4.11. Réponse d'un système non-linéaire	171
4.11.1. Distorsion due à une diode	171
4.12. Exercices	174
5. Analyse des signaux non périodiques	187
5.1. Transformation de Fourier	187
5.1.1. Passage de la série à la transformation de Fourier	187
5.1.2. TF directe et inverse	189
5.1.3. Énergie d'un signal non permanent	190
5.1.4. Propriétés de la transformation de Fourier	190
5.2. Exemples de spectres continus	190
5.2.1. Spectre d'une impulsion rectangulaire	190
5.2.2. Spectres d'un sinus amorti	192
5.2.3. Spectres de 2 impulsions	195
5.3. Calcul de quelques transformées	196
5.3.1. Exponentielle décroissante	196
5.3.2. Exponentielle décroissante symétrique	197
5.3.3. Signal constant unité	197
5.3.4. Saut unité	198
5.3.5. Phaseur	198
5.3.6. Signal sinusoïdal	199
5.3.7. Impulsion sinusoïdale	199
5.4. Quelques conclusions	201
5.4.1. TF des signaux périodiques	201
5.4.2. Relations avec la transformation de Laplace	201
5.5. Extension de la transformation de Fourier	202
5.6. Table illustrée de quelques transformées de Fourier [2]	207
5.7. Exercices	210
6. Éléments d'analyse spectrale numérique	221
6.1. Passage de la TF à la TFD	221
6.1.1. Signaux continus non-périodiques	222
6.1.2. Signaux discrets de durée infinie	222
6.1.3. Signaux discrets de durée finie	224
6.1.4. Discrétisation de la fréquence	225
6.2. Relations temps-fréquence	225
6.2.1. Analyse spectrale avec Matlab	226
6.2.2. Pulsation normalisée	228
6.3. Transformation de Fourier discrète	229
6.3.1. Définition de la TFD	229
6.3.2. TFD d'un signal périodique	230
6.3.3. TFD et FFT	230
6.4. Relations entre les domaines analogique et numérique	231
6.4.1. Calcul et analyse d'une TFD	231
6.5. Spectre d'une sinusoïde	235
6.5.1. Le nombre de périodes enregistrées est un entier	235
6.5.2. Le nombre de périodes enregistrées n'est pas un entier	236

6.6.	Fenêtres d'observation	237
6.6.1.	Quatre fenêtres usuelles	237
6.6.2.	Effet d'une fenêtre	237
6.6.3.	Choix d'une fenêtre	238
6.7.	Exemple 1 : analyse spectrale élémentaire	240
6.8.	Exemple 2 : reconstruction d'un signal	242
6.9.	Exemple 3 : analyse spectrale détaillée	245
6.9.1.	Données	245
6.9.2.	Signal temporel	245
6.9.3.	Paramètres d'acquisition	246
6.9.4.	Analyse spectrale	247
6.9.5.	Estimation des amplitudes	249
6.9.6.	Détail du calcul des signaux et des spectres	250
6.10.	Exercices	254
7.	Comparaison et description des signaux	261
7.1.	Classification des signaux	261
7.1.1.	Classification phénoménologique	261
7.1.2.	Énergie et puissance des signaux	262
7.2.	Quatre signaux types	264
7.2.1.	Signaux déterministes temporaires	265
7.2.2.	Signaux permanents périodiques	266
7.2.3.	Signaux permanents aléatoires	267
7.3.	Comparaison des signaux	268
7.3.1.	Corrélation de signaux à énergie finie	268
7.3.2.	Corrélation de signaux à puissance finie	270
7.3.3.	Propriétés de l'autocorrélation	271
7.3.4.	Propriétés de l'intercorrélation	273
7.3.5.	Calcul numérique de la corrélation	274
7.4.	Exemples de corrélation	274
7.4.1.	Autocorrélation d'un signal chirp	276
7.4.2.	Autocorrélation d'une SBPA	276
7.5.	Trois applications de la corrélation	276
7.5.1.	Le radar	276
7.5.2.	La mesure d'un débit	279
7.5.3.	La mesure du rythme cardiaque	281
7.6.	Description des signaux aléatoires	282
7.6.1.	Tension équivalente de bruit	285
7.7.	Systèmes linéaires et densités spectrales	286
7.7.1.	Signaux à énergie finie	287
7.7.2.	Signaux à puissance finie	287
7.8.	Signaux, spectres et statistique	288
7.9.	Quelques exemples	290
7.10.	Exercices	294

III. Étude des signaux et systèmes numériques	301
8. Échantillonnage et reconstruction des signaux analogiques	303
8.1. Introduction	303
8.2. Analyse temporelle	305
8.2.1. Types de signaux	305
8.2.2. Quantification d'un signal : exemple	305
8.2.3. Échantillonnage des signaux analogiques	306
8.3. Analyse fréquentielle	308
8.3.1. Spectre d'un peigne de Dirac	308
8.3.2. Spectre d'un signal échantillonné	309
8.4. Recouvrement spectral	310
8.4.1. Quelques exemples	312
8.5. Théorème de l'échantillonnage	319
8.5.1. Filtre antirecouvrement	320
8.5.2. Exemple	320
8.6. Quantification d'un signal échantillonné	322
8.6.1. Quantification uniforme	322
8.6.2. Bruit de quantification	323
8.6.3. Rapport signal sur bruit	325
8.6.4. SNR de quelques signaux	325
8.6.5. Non linéarité du convertisseur	327
8.6.6. Conclusion	329
8.7. Choix d'un filtre et de la fréquence d'échantillonnage	329
8.8. Reconstruction du signal	331
8.8.1. Convertisseur N-A	331
8.8.2. Interpolateur idéal	331
8.8.3. Réponses impulsionnelle et fréquentielle d'un CNA	332
8.8.4. Filtre de reconstruction ou de lissage	334
8.9. Analyse qualitative d'une chaîne A-N – N-A	335
8.9.1. Échantillonnage sans filtre antirecouvrement	335
8.9.2. Échantillonnage avec filtre antirecouvrement	335
8.9.3. Effet du convertisseur N-A	337
8.9.4. Reconstruction du signal analogique	337
8.9.5. Correcteur d'amplitude	337
8.10. Exercices	338
9. Description des signaux et systèmes numériques	343
9.1. Signaux numériques	343
9.1.1. Quelques signaux fondamentaux	343
9.1.2. Périodicité des signaux numériques	345
9.2. Systèmes numériques	347
9.2.1. Exemples de système numériques	347
9.2.2. Schéma fonctionnel d'un système numérique	349
9.2.3. Propriétés des systèmes	350
9.2.4. Interconnexions des systèmes	353
9.2.5. Conclusions	354

9.3. Réponse impulsionnelle et produit de convolution	354
9.3.1. Systèmes causaux	355
9.3.2. Réalisation d'un produit convolution	358
9.3.3. Une application : l'interpolation numérique	361
9.4. Systèmes décrits par des équations récursives	362
9.4.1. Quelques exemples	365
9.5. Exercices	367
10. Réponses des systèmes numériques	371
10.1. Réponse temporelle des systèmes linéaires	371
10.1.1. Résolution d'une équation récursive	371
10.1.2. Solution de l'équation homogène	372
10.1.3. Solution particulière	372
10.1.4. Solution générale	373
10.1.5. Généralisation	373
10.2. Stabilité des systèmes numériques	375
10.3. Instants caractéristiques	375
10.4. Transformation en z	377
10.4.1. Définition	377
10.4.2. Calcul de quelques transformées	378
10.4.3. Quelques propriétés de la transformation en z	379
10.4.4. Équation aux différences et fonction de transfert	380
10.5. Réponse fréquentielle des systèmes LTI	381
10.5.1. Fonction de transfert et réponse fréquentielle	381
10.5.2. Pôles, zéros et réponse fréquentielle	382
10.5.3. TFD et réponse fréquentielle	384
10.6. Calcul et traçage de quelques réponses fréquentielles	386
10.6.1. Moyenneur non causal	386
10.6.2. Moyenneur causal	386
10.6.3. Filtre passe-bas d'ordre 1	388
10.6.4. Filtre passe-bas d'ordre 2	391
10.7. Analyse et réalisation d'un filtre	393
10.7.1. Calcul de la réponse temporelle du filtre	393
10.7.2. Calcul de la réponse fréquentielle	395
10.7.3. Comment réaliser ce filtre ?	396
10.8. Classification des systèmes numériques	398
10.8.1. Systèmes non récursifs (dits RIF, FIR ou MA)	398
10.8.2. Systèmes récursifs (dits RII, IIR ou ARMA)	399
10.8.3. Caractéristiques des filtres FIR et IIR	399
10.9. Exercices	401
IV. Analyse et Synthèse des Filtres Numériques	407

11.Éléments de filtrage analogique	409
11.1. Introduction	409
11.1.1. Filtre idéal	409
11.1.2. Formes canoniques	409
11.1.3. Formes normalisées	410
11.1.4. Filtres d'ordre 2	411
11.2. Filtres optimums	412
11.2.1. Gabarit	412
11.2.2. Approximations	412
11.2.3. Temps de propagation	414
11.2.4. Illustration des réponses fréquentielles et temporelles	415
11.3. Filtres de Butterworth	419
11.3.1. Tableau des polynômes de Butterworth	420
11.3.2. Ordre et pulsation caractéristique d'un filtre	420
11.3.3. Synthèse d'un filtre de Butterworth	423
11.4. Filtres de Tchebycheff	426
11.4.1. Caractéristique des filtres de Tchebycheff	426
11.4.2. Calcul de l'ordre d'un filtre de Tchebycheff	426
11.4.3. Tableau des polynômes de Tchebycheff	427
11.4.4. Synthèse d'un filtre de Tchebycheff	427
11.5. Filtres de Bessel	432
11.5.1. Phase linéaire et temps de propagation	432
11.5.2. Temps de propagation des filtres passe-bas	432
11.5.3. Fonctions de transfert	433
11.5.4. Synthèse d'un filtre de Bessel	434
11.6. Largeur de bande et durée de la réponse temporelle	435
11.7. Réalisations des filtres analogiques	438
11.7.1. Filtres normalisés	438
11.7.2. Transformations d'un filtre normalisé	438
11.7.3. Circuits de Sallen et Key à gain fixe	438
11.7.4. Circuits de Sallen et Key à gain variable	443
11.7.5. Réalisation d'un filtre passe-bande	444
11.8. Exercices	448
12.Synthèse des filtres récurifs	453
12.1. Classification des systèmes numériques	453
12.1.1. Systèmes non récurifs (dits RIF, FIR ou MA)	453
12.1.2. Systèmes récurifs (dits RII, IIR ou ARMA)	453
12.1.3. Caractéristiques des filtres FIR et IIR	454
12.2. Réponse fréquentielle d'un filtre numérique	454
12.3. Le problème de l'approximation	457
12.4. La transformation associée	458
12.4.1. Exemple de transformation associée	459
12.4.2. Modification de la transformation associée	461
12.5. La transformation bilinéaire	462
12.5.1. Introduction	462

12.5.2. Transformation bilinéaire d'une fonction de transfert	463
12.5.3. Exemple de transformation bilinéaire	464
12.6. Compensation de la distorsion des fréquences	465
12.7. Synthèse d'un filtre numérique récursif	468
12.8. Exercices	470
13. Synthèse des filtres non récursifs	473
13.1. Introduction	473
13.2. Spécifications	473
13.3. Propriétés des filtres RIF à phase linéaire	474
13.3.1. Réponses impulsionnelle et fréquentielle	474
13.4. Synthèse par fenêtrage	478
13.4.1. Principe du fenêtrage	478
13.4.2. Effet de la troncation	479
13.5. Réponses fréquentielles et impulsionnelles idéales	481
13.5.1. Filtre passe-bas	481
13.5.2. Filtre passe-haut	484
13.5.3. Filtre passe-bande et réjecteur de bande	484
13.6. Caractéristiques de quelques fenêtres	486
13.6.1. Fenêtres analytiques	486
13.6.2. Fenêtre de Kaiser-Bessel	489
13.7. Conclusions sur l'usage des fenêtres	492
13.7.1. Propriétés et utilisation des fenêtres	492
13.7.2. Démarche pour calculer un filtre	494
13.8. Réalisation d'un filtre passe-bas	494
13.8.1. Préliminaires	494
13.8.2. Fenêtrage de Hamming	495
13.8.3. Fenêtrage de Kaiser	497
13.9. Réalisation d'un filtre passe-bande	498
13.10 Exercices	500
V. Applications du TdS	507
14. Analyse de la parole	509
14.1. Introduction	509
14.2. Analyse de la parole	509
14.2.1. Classification des phonèmes	509
14.2.2. Période des sons voisés	510
14.3. Acquisition et analyse avec CoolEdit	510
14.3.1. Paramètres pour l'enregistrement	510
14.3.2. Visualisation des signaux et de leur spectre	511
14.4. Analyse du signal acoustique avec Matlab	511
14.4.1. Lecture du fichier de données	511
14.4.2. Initialisation	511
14.4.3. Valeur efficace	513

Table des matières

14.4.4. Taux de passages par zéro	513
14.4.5. Spectre	513
14.5. Recherche du pitch	514
14.5.1. Filtrage du signal	514
14.5.2. Autocorrélation	515
14.6. Travail pratique	516
14.6.1. Avec CoolEdit :	516
14.6.2. Avec Matlab	517
15. Codage et décodage LPC de la parole	521
15.1. Introduction	521
15.2. Prédiction linéaire	521
15.2.1. Mesure de l'erreur de prédiction	521
15.2.2. Calcul des coefficients de prédiction linéaire	522
15.2.3. Interprétation de la prédiction linéaire	524
15.3. Modèle du conduit vocal	524
15.4. Analyse du signal	526
15.4.1. Initialisation	526
15.4.2. Spectre	526
15.5. Analyse LPC	527
15.5.1. Valeur efficace et gain	527
15.5.2. Fonction de transfert $H(z)$ du conduit vocal	528
15.5.3. Réponse fréquentielle du conduit vocal	529
15.6. Recherche du pitch	529
15.6.1. Filtrage du signal	529
15.6.2. Recherche du signal d'excitation $e[n]$	530
15.6.3. Autocorrélation de $e[n]$	530
15.6.4. Critères de décision	532
15.7. Synthèse d'un son	533
15.7.1. Signaux réel et synthétique	533
15.7.2. Mise en valeur des résultats	534
15.8. Travail pratique	536
15.8.1. Codage et décodage d'une phrase	536
15.8.2. Analyse des résultats	537
15.8.3. Analyse et amélioration de la synthèse	537
15.9. Minimisation de l'écart quadratique	538
16. Introduction au filtrage adaptatif	543
16.1. Notions de probabilités	543
16.1.1. Définitions de quelques estimateurs statistiques	543
16.1.2. Remarques	544
16.1.3. Fonction de répartition et densité de probabilités	544
16.1.4. Modèles statistiques	545
16.2. Régression linéaire	546
16.2.1. Mesure, modèle et écart	547
16.2.2. Minimisation de l'écart quadratique	547
16.2.3. Équations de la régression linéaire	548

16.3. Filtrage de Wiener	549
16.3.1. Définition du problème	549
16.3.2. Résolution au sens des moindres carrés	551
16.3.3. Description matricielle	552
16.3.4. Applications du filtrage de Wiener	553
16.4. Suppression d'une perturbation	554
16.4.1. Filtrage de Wiener classique	555
16.4.2. Remarque	555
16.5. Filtrage adaptatif	555
16.5.1. Algorithme récursif des moindres carrés (RLMS)	556
16.5.2. Algorithme récursif normalisé (NLMS)	559
16.6. Exercices	564

VI. Annexes 573

17. Formulaire Signaux et systèmes	575
17.1. Systèmes analogiques	575
17.2. Signaux analogiques	576
17.3. Échantillonnage des signaux	578
17.4. Signaux et systèmes numériques	578
17.5. Analyse spectrale numérique	581

Table des matières