

heig-vd

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

Département TIN
Techniques Industrielles

Unité TSA

Traitement des Signaux

Quelques applications

i nstitut d'
A utomatisation
i ndustrielle



Prof. Freddy Mudry



*"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)

Table des matières

I. Synthèse des filtres	1
1. Éléments de filtrage analogique	3
1.1. Introduction	3
1.1.1. Filtre idéal	3
1.1.2. Formes canoniques	3
1.1.3. Formes normalisées	4
1.1.4. Filtres d'ordre 2	5
1.2. Filtres optimums	6
1.2.1. Gabarit	6
1.2.2. Approximations	6
1.2.3. Temps de propagation	9
1.2.4. Illustration des réponses fréquentielles et temporelles	9
1.3. Filtres de Butterworth	13
1.3.1. Tableau des polynômes de Butterworth	14
1.3.2. Ordre et pulsation caractéristique d'un filtre	14
1.3.3. Synthèse d'un filtre de Butterworth	17
1.4. Filtres de Tchebycheff	20
1.4.1. Caractéristique des filtres de Tchebycheff	20
1.4.2. Calcul de l'ordre d'un filtre de Tchebycheff	20
1.4.3. Tableau des polynômes de Tchebycheff	21
1.4.4. Synthèse d'un filtre de Tchebycheff	21
1.5. Filtres de Bessel	24
1.5.1. Phase linéaire et temps de propagation	26
1.5.2. Temps de propagation des filtres passe-bas	26
1.5.3. Fonctions de transfert	27
1.5.4. Synthèse d'un filtre de Bessel	28
1.6. Largeur de bande et durée de la réponse temporelle	29
1.7. Réalisations des filtres analogiques	32
1.7.1. Filtres normalisés	32
1.7.2. Transformations d'un filtre normalisé	32
1.7.3. Circuits de Sallen et Key à gain fixe	32
1.7.4. Circuits de Sallen et Key à gain variable	37
1.7.5. Réalisation d'un filtre passe-bande	38
1.8. Exercices	43

2. Synthèse des filtres récurrents	45
2.1. Réponse fréquentielle d'un filtre numérique	45
2.2. Le problème de l'approximation	46
2.3. La transformation associée	47
2.3.1. Exemple de transformation associée	49
2.3.2. Modification de la transformation associée	52
2.4. La transformation bilinéaire	52
2.4.1. Introduction	52
2.4.2. Transformation bilinéaire d'une fonction de transfert	53
2.4.3. Exemple de transformation bilinéaire	54
2.5. Compensation de la distorsion des fréquences	55
2.6. Synthèse d'un filtre numérique récurrent	56
2.7. Exercices	60
3. Synthèse des filtres non récurrents	63
3.1. Introduction	63
3.2. Spécifications	63
3.3. Propriétés des filtres RIF à phase linéaire	64
3.3.1. Réponses impulsionnelle et fréquentielle	64
3.4. Synthèse par fenêtrage	68
3.4.1. Principe du fenêtrage	68
3.4.2. Effet de la troncation	69
3.5. Réponses fréquentielles et impulsionnelles idéales	71
3.5.1. Filtre passe-bas	71
3.5.2. Filtre passe-haut	74
3.5.3. Filtre passe-bande et réjecteur de bande	74
3.6. Caractéristiques de quelques fenêtrages	76
3.6.1. Fenêtrages analytiques	76
3.6.2. Fenêtrage de Kaiser-Bessel	79
3.7. Conclusions sur l'usage des fenêtrages	82
3.7.1. Propriétés et utilisation des fenêtrages	82
3.7.2. Démarche pour calculer un filtre	84
3.8. Réalisation d'un filtre passe-bas	84
3.8.1. Préliminaires	84
3.8.2. Fenêtrage de Hamming	85
3.8.3. Fenêtrage de Kaiser	87
3.9. Réalisation d'un filtre passe-bande	88
3.10. Exercices	90
II. Analyse des signaux	97
4. Analyse et comparaison des signaux	99
4.1. Transformation de Fourier	99
4.1.1. Définition de la transformation de Fourier	99
4.1.2. Puissance et énergie d'un signal	100

4.1.3.	Propriétés de la transformation de Fourier	100
4.2.	Exemples de spectres continus	100
4.2.1.	Spectre d'une impulsion rectangulaire	102
4.2.2.	Spectre d'un sinus amorti	104
4.2.3.	Spectre d'une impulsion sinusoïdale	105
4.2.4.	Spectres de deux impulsions	106
4.3.	Extension de la transformation de Fourier	107
4.4.	Classification et types de signaux	108
4.4.1.	Classification phénoménologique	110
4.4.2.	Classification énergétique	110
4.4.3.	Signaux types	111
4.5.	Comparaison des signaux	115
4.5.1.	Corrélation de signaux à énergie finie	117
4.5.2.	Corrélation de signaux à puissance finie	118
4.5.3.	Propriétés de l'autocorrélation	118
4.5.4.	Propriétés de l'intercorrélation	121
4.5.5.	Calcul numérique de la corrélation	121
4.6.	Exemples de corrélation	122
4.6.1.	Fonction de corrélation d'un signal chirp	122
4.6.2.	Fonction de corrélation d'une SBPA	124
4.7.	Deux applications de la corrélation	124
4.7.1.	Le radar	124
4.7.2.	La mesure d'un débit	125
4.8.	Description des signaux aléatoires	127
4.8.1.	Le bruit blanc à densité spectrale constante et bande infinie	130
4.8.2.	Le bruit à densité spectrale constante et bande limitée	130
4.8.3.	Le bruit coloré à puissance finie	131
4.9.	Systèmes linéaires et densités spectrales	131
4.10.	Énergie et puissance des signaux	132
4.10.1.	Domaine temporel	132
4.10.2.	Domaine fréquentiel	133
4.11.	Signaux, spectres et statistique	134
4.12.	Quelques exemples	136
4.13.	Table illustrée de quelques transformées de Fourier [2]	140
4.14.	Exercices	143
5.	Éléments d'analyse spectrale numérique	153
5.1.	Passage de la TF à la TFD	153
5.1.1.	Signaux continus non-périodiques	154
5.1.2.	Signaux discrets de durée infinie	154
5.1.3.	Signaux discrets de durée finie	156
5.1.4.	Discrétisation de la fréquence	157
5.2.	Relations temps-fréquence	158
5.2.1.	Pulsation normalisée	160
5.3.	Transformation de Fourier discrète	160
5.3.1.	Définition de la TFD	160

Table des matières

- 5.3.2. TFD d'un signal périodique 162
- 5.3.3. Relations entre les domaines analogique et numérique 162
- 5.3.4. TFD et FFT 162
- 5.4. Spectre d'une sinusoïde 163
 - 5.4.1. Le nombre de périodes enregistrées est un entier 163
 - 5.4.2. Le nombre de périodes enregistrées n'est pas un entier 164
- 5.5. Fenêtres d'observation 164
 - 5.5.1. Quatre fenêtres usuelles 164
 - 5.5.2. Effet d'une fenêtre 165
 - 5.5.3. Choix d'une fenêtre 168
- 5.6. Exemple 1 : analyse spectrale élémentaire 168
- 5.7. Exemple 2 : reconstruction d'un signal 171
- 5.8. Exemple 3 : analyse spectrale détaillée 173
 - 5.8.1. Données 173
 - 5.8.2. Signal temporel 173
 - 5.8.3. Paramètres d'acquisition 174
 - 5.8.4. Analyse spectrale 175
 - 5.8.5. Estimation des amplitudes 176
 - 5.8.6. Détail du calcul des signaux et des spectres 178
- 5.9. Exercices 182

III. Travaux pratiques avancés 189

- 6. Analyse de la parole 191**
 - 6.1. Introduction 191
 - 6.2. Analyse de la parole 191
 - 6.2.1. Classification des phonèmes 191
 - 6.2.2. Période des sons voisés 192
 - 6.3. Acquisition et analyse avec CoolEdit 192
 - 6.3.1. Paramètres pour l'enregistrement 192
 - 6.3.2. Visualisation des signaux et de leur spectre 193
 - 6.4. Analyse du signal acoustique avec Matlab 193
 - 6.4.1. Lecture du fichier de données 193
 - 6.4.2. Initialisation 195
 - 6.4.3. Valeur efficace 195
 - 6.4.4. Taux de passages par zéro 195
 - 6.4.5. Spectre 195
 - 6.5. Recherche du pitch 196
 - 6.5.1. Filtrage du signal 196
 - 6.5.2. Autocorrélation 197
 - 6.6. Travail pratique 198
 - 6.6.1. Avec CoolEdit : 198
 - 6.6.2. Avec Matlab 199

7. Codage et décodage LPC de la parole	203
7.1. Introduction	203
7.2. Prédiction linéaire	203
7.2.1. Mesure de l'erreur de prédiction	203
7.2.2. Calcul des coefficients de prédiction linéaire	204
7.2.3. Interprétation de la prédiction linéaire	206
7.3. Modèle du conduit vocal	206
7.4. Analyse du signal	208
7.4.1. Initialisation	208
7.4.2. Spectre	208
7.5. Analyse LPC	209
7.5.1. Valeur efficace et gain	209
7.5.2. Fonction de transfert $H(z)$ du conduit vocal	210
7.5.3. Réponse fréquentielle du conduit vocal	211
7.6. Recherche du pitch	211
7.6.1. Filtrage du signal	211
7.6.2. Recherche du signal d'excitation $e[n]$	212
7.6.3. Autocorrélation de $e[n]$	212
7.6.4. Critères de décision	214
7.7. Synthèse d'un son	215
7.7.1. Signaux réel et synthétique	215
7.7.2. Mise en valeur des résultats	216
7.8. Travail pratique	218
7.8.1. Codage et décodage d'une phrase	218
7.8.2. Analyse des résultats	219
7.8.3. Analyse et amélioration de la synthèse	219
7.9. Minimisation de l'écart quadratique	220
8. Introduction au filtrage adaptatif	225
8.1. Notions de probabilités	225
8.1.1. Définitions de quelques estimateurs statistiques	225
8.1.2. Remarques	226
8.1.3. Fonction de répartition et densité de probabilités	226
8.1.4. Modèles statistiques	227
8.2. Régression linéaire	228
8.2.1. Mesure, modèle et écart	229
8.2.2. Minimisation de l'écart quadratique	230
8.2.3. Équations de la régression linéaire	231
8.3. Filtrage de Wiener	231
8.3.1. Définition du problème	231
8.3.2. Résolution au sens des moindres carrés	233
8.3.3. Description matricielle	234
8.3.4. Applications du filtrage de Wiener	235
8.4. Suppression d'une perturbation	236
8.4.1. Filtrage de Wiener classique	237
8.4.2. Remarque	237

Table des matières

8.5. Filtrage adaptatif	238
8.5.1. Algorithme récursif des moindres carrés (RLMS)	238
8.5.2. Algorithme récursif normalisé (NLMS)	242
8.6. Exercices	246