

Cours et exercices corrigés

L3 • Master • Écoles d'ingénieurs

ANALYSE ET TRAITEMENT DES SIGNAUX

Méthodes et applications au son et à l'image

2e édition

Étienne Tisserand
Jean-François Pautex
Patrick Schweitzer

DUNOD

ANALYSE ET TRAITEMENT DES SIGNAUX

Méthodes et applications au son et à l'image

Consultez nos parutions sur dunod.com



ANALYSE ET TRAITEMENT DES SIGNAUX

Méthodes et applications au son et à l'image

Cours et exercices corrigés

Étienne Tisserand
Maître de conférences et directeur d'un atelier d'électronique et d'automatique à l'Université Henri Poincaré de Nancy

Jean-François Pautex
Assistant-Ingénieur à l'Université Henri Poincaré de Nancy

Patrick Schweitzer
Maître de conférences à l'IUT de Nancy-Brabois

DUNOD

Illustration de couverture :
Fotolia - Abstract Art © Sean Gladwell

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.
Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2008
ISBN 978-2-10-053984-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 • **PROPRIÉTÉS ET ACQUISITION DES SIGNAUX SONORES** 5

1.1 Les sons et l'audition 5
- 1.1.1 Nature physique d'une onde sonore 5
- 1.1.2 Caractéristiques principales de l'audition humaine 7

1.2 Les sons musicaux 10
- 1.2.1 Bruit et musique 10
- 1.2.2 Allure temporelle d'une note 10
- 1.2.3 Hauteur et timbre 11
- 1.2.4 Autres aspects fréquentiels 13
- 1.2.5 Battement, consonance et dissonance 15

1.3 Effets Doppler sonores 17
- 1.3.1 Source sonore fixe – Auditeurs mobiles 17
- 1.3.2 Source sonore mobile – Auditeurs fixes 17
- 1.3.3 Source sonore fixe – Obstacle réflecteur mobile 18

1.4 Microphones 20
- 1.4.1 Propriétés générales 20
- 1.4.2 Grands types de microphones 21
- 1.4.3 Sonomètre simple 23

EXERCICES 24

CHAPITRE 2 • **ACQUISITION ET REPRÉSENTATION DES IMAGES** 27

2.1 Obtention des images réelles 28
- 2.1.1 Formation optique des images 28
- 2.1.2 Réglages de l'optique 28

2.2 Vision et représentation des images couleurs 31
- 2.2.1 Colorimétrie 31
- 2.2.2 Représentation psychovisuelle des couleurs 34

2.3 Modélisation matricielle 36
- 2.3.1 Transformations élémentaires d'un repère 3D 36
- 2.3.2 Modèles de projection perspective 39
- 2.3.3 Matrices de transformation perspective 40
- 2.3.4 Cas général 41
- 2.3.5 Remarques 42

2.4 Calibration d'un système de prise de vue 43
2.4.1 Estimation de la matrice [C] 43
2.4.2 Exemple d'application 43
EXERCICES 46

CHAPITRE 3 • **ÉCHANTILLONNAGE, QUANTIFICATION ET RESTITUTION DES SIGNAUX** 49

3.1 Échantillonnage des signaux analogiques 50
3.1.1 Échantillonnage idéal 50
3.1.2 Échantillonnage-blocage 53
3.2 Quantification des signaux 56
3.2.1 Définition de la quantification uniforme et du bruit de quantification 56
3.2.2 Caractéristiques du bruit de quantification 57
3.2.3 Rapport signal sur bruit de quantification 58
3.2.4 Quantification après compression de dynamique 59
3.3 Aspects particuliers des opérations d'échantillonnage et de quantification 59
3.3.1 Choix de quelques fréquences d'échantillonnage et formats de quantification 59
3.3.2 Techniques du suréchantillonnage à la numérisation du signal 59
3.3.3 Introduction au convertisseur analogique numérique sigma-delta 62
3.3.4 Dithering 66
3.3.5 Conversion du taux d'échantillonnage sans transposition de hauteur 67
3.4 Interpolation à la restitution du signal 67
3.4.1 Principe 67
3.4.2 Fonction d'interpolation 68
3.4.3 Interpolation linéaire 68
3.4.4 Polynôme d'interpolation 69
3.4.5 Détermination du polynôme d'interpolation par la méthode de Lagrange 69
3.4.6 Interpolation de Lagrange d'un signal échantillonné 71
3.4.7 Interpolation par la méthode de Newton 72
3.5 Génération de signaux numériques usuels 74
3.5.1 Préambule 74
3.5.2 Génération par lecture cyclique d'une table d'échantillons mémorisés 75
3.5.3 Synthèse numérique directe 75
3.5.4 Génération par algorithme récurrent 77
EXERCICES 80

CHAPITRE 4 • **ANALYSE CORRÉLATIVE DES SIGNAUX** 85

4.1 Relations statistiques entre plusieurs variables 86
4.1.1 Notation – Abréviations 86
4.1.2 Relations statistiques entre deux variables x_1 et x_2 86
4.1.3 Cas multivariable 88
4.1.4 Analyse en composantes principales 89

4.2 Fonctions de corrélation monodimensionnelles de signaux analogiques et numériques 91
4.2.1 Définition mathématique 92
4.2.2 Calcul des fonctions de corrélation 92
4.2.3 Quelques propriétés 93
4.2.4 Théorème de Wiener-Khinchine 93
4.2.5 Autocorrélation de signaux périodiques 93
4.2.6 Remarques 94
4.2.7 Intercorrélation de signaux périodiques de même période 94
4.2.8 Corrélation de signaux aléatoires 94

4.3 Détection de signaux périodiques 95
4.3.1 Détection par autocorrélation d'un signal périodique noyé dans du bruit 96
4.3.2 Détection par intercorrélation d'un signal périodique noyé dans du bruit 98

4.4 Identification de la RI d'un système par intercorrélation entrée-sortie 98
4.4.1 Rappel 98
4.4.2 Méthode d'identification d'une réponse impulsionnelle par intercorrélation 99

4.5 Mesure de retard entre signaux aléatoires par corrélation 99
4.5.1 Principe général 99
4.5.2 Application à la localisation d'une source de bruit 100

4.6 Application à la comparaison et à la reconnaissance de signaux 102
4.6.1 Corrélation d'images numériques 102
4.6.2 Reconnaissance des sons voisés par autocorrélation court terme 105

EXERCICES 106

CHAPITRE 5 • **DÉCOMPOSITION ET ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX** 109

5.1 Analyse de Fourier 110
5.1.1 Joseph Fourier 110
5.1.2 Expérience de J. Fourier sur la propagation de la chaleur 110
5.1.3 Développement en séries de Fourier 112
5.1.4 Transformation de Fourier 113

5.2 Analyse spectrale des signaux analogiques 117
5.2.1 Analyse par banc de filtre passe-bande 117
5.2.2 Analyse par balayage fréquentiel 118
5.2.3 Analyseur hétérodyne à compression de balayage 120

5.3 Analyse spectrale des signaux numériques 121
5.3.1 Transformation de Fourier numérique 121
5.3.2 Transformation de Fourier discrète 122
5.3.3 Méthode d'analyse 124
5.3.4 Application : analyse spectrale à l'aide d'un oscilloscope numérique 127

5.4 Méthodes d'estimation de la densité spectrale de puissance d'un signal numérique 129
5.4.1 Méthode du périodogramme moyenné 129
5.4.2 Méthode du corrélogramme 130

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

5.5 Développement d'un signal en série de fonctions quelconques 130
5.5.1 Notions vectorielles étendues aux signaux analogiques 130
5.5.2 Extension aux signaux numériques 131
5.5.3 Approximation d'un signal pour une série de fonctions 131
5.5.4 Cas d'une famille de fonctions orthogonales 134
5.5.5 Applications à l'analyse et à la synthèse d'un signal 137

EXERCICES 138

CHAPITRE 6 • **FILTRAGE DES SIGNAUX ANALOGIQUES** 143

6.1 Généralités 144
6.1.1 Filtres idéaux 144
6.1.2 Filtres réels 144
6.1.3 Fonction de transfert des filtres élémentaires 147

6.2 Filtres passifs en électroacoustique 149
6.2.1 Constitution et comportement d'un haut-parleur électrodynamique 149
6.2.2 Filtres pour haut-parleur 150

6.3 Structures de filtrage actives 154
6.3.1 Cellules actives usuelles 154
6.3.2 Cellules actives du second ordre à performances améliorées 156
6.3.3 Structure de filtrage à variable d'état 159

6.4 Filtres actifs programmables 160
6.4.1 Contrôle des caractéristiques d'une structure à variable d'état 161
6.4.2 Filtres à capacités commutées 164

6.5 Synthèse de filtres actifs sur cahier des charges 167
6.5.1 Gabarit de filtrage 167
6.5.2 Paramètres caractéristiques des gabarits de filtrage 168
6.5.3 Transposition des fonctions de transfert et des gabarits 170
6.5.4 Filtres polynomiaux et elliptiques 170
6.5.5 Approximations mathématiques de la fonction de transfert d'un filtre PB polynomial 172
6.5.6 Exemples traités 174

EXERCICES 178

CHAPITRE 7 • **FILTRES NUMÉRIQUES À RÉPONSE IMPULSIONNELLE FINIE** 185

7.1 Aspects généraux des filtres numériques linéaires 186
7.1.1 Caractérisations d'un système numérique à coefficients constants 186
7.1.2 Représentation d'une fonction de transfert $H(z)$ par ses pôles et ses zéros 189

7.2 Structures usuelles des filtres numériques mono-dimensionnels 192
7.2.1 Structures transversale et récursive 192
7.2.2 Synthèse d'un filtre par une structure en cascade 193
7.2.3 Synthèse d'un filtre numérique par une structure en parallèle 194

7.3 Filtres numériques à réponse impulsionnelle finie – Généralités 195
7.3.1 Propriétés générales 195
7.3.2 Obtention d'un filtre RIF à phase linéaire 196
7.4 Synthèse de filtres RIF à phase linéaire par développement en séries de Fourier 197
7.4.1 Rappel 197
7.4.2 Application à une réponse impulsionnelle quelconque 198
7.4.3 Troncature d'une RII par fenêtrage temporel 198
7.4.4 Effet du fenêtrage rectangulaire 198
7.4.5 Diminution des ondulations par fenêtrage progressif 199
7.4.6 Application au calcul de filtres RIF élémentaires 200
7.4.7 Filtre RIF demi-bande 203
7.5 Synthèse des filtres RIF par transformation de Fourier discrète 205
7.5.1 TFD et TFD^{-1} 205
7.5.2 Exemple de synthèse d'un filtre RIF 205
7.5.3 Exemple d'application : correction spectrale pour prothèse auditive 206
7.6 Synthèse récursive des filtres RIF 207
7.6.1 Méthodologie 207
7.6.2 Exemple 209
7.7 Transformation de Hilbert et signaux analytiques 211
7.7.1 Transformation de Hilbert 211
7.7.2 Signaux analytiques 212
EXERCICES 212

CHAPITRE 8 • **FILTRES NUMÉRIQUES À RÉPONSE IMPULSIONNELLE INFINIE** 223
8.1 Méthode de synthèse des filtres RII 224
8.1.1 Synthèse par échantillonnage d'une réponse impulsionnelle analogique 224
8.1.2 Synthèse des filtres RII par équivalence de la dérivation 225
8.1.3 Synthèse des filtres RII par la transformation bilinéaire 226
8.2 Filtres récursifs génériques du second ordre 230
8.2.1 Détermination de $H(z)$ 230
8.2.2 Exemple de synthèse d'un filtre RII réjecteur de bande 231
8.2.3 Détermination rapide des filtres PB^{de} et CB à bande étroite 231
8.3 Filtres déphaseurs 232
8.3.1 Déphaseur pur élémentaire 232
8.3.2 En pratique 233
8.4 Applications spécifiques aux signaux audionumériques 233
8.4.1 Écho et réverbération numériques 233
8.4.2 Étude d'un égaliseur de spectre audionumérique 235
8.5 Filtrage numérique du bruit 240
8.5.1 Puissance de bruit en sortie d'un filtre 240
8.5.2 Estimation récursive de la moyenne d'un signal bruité 240
8.6 Algorithme de Goertzel 242
EXERCICES 243

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.

CHAPITRE 9 • **PRÉDICTION LINÉAIRE ET FILTRAGE ADAPTATIF DES SIGNAUX** 251

9.1 Compléments sur la quantification des signaux 252
9.1.1 Codage PCM 252
9.1.2 Codage et décodage DPCM 253

9.2 Prédiction linéaire d'un signal numérique 254
9.2.1 Schéma de principe et objectif 254
9.2.2 Système à résoudre pour M observations 255
9.2.3 Solution matricielle 255
9.2.4 Exemples de calcul 256
9.2.5 Application à la prédiction d'un signal vocal utilisée en téléphonie pour l'encodage DPCM 258
9.2.6 Application à l'analyse et à la synthèse vocale 258
9.2.7 Mots clés pour en savoir plus sur la prédiction des signaux 259

9.3 Filtrage numérique adaptatif 260
9.3.1 Modélisation d'un système par un filtre RIF 260
9.3.2 Modélisation adaptative 261
9.3.3 Filtre RIF adapté par l'algorithme du gradient 263
9.3.4 Filtre RII adaptatif 265
9.3.5 Quelques exemples d'application des filtres adaptatifs 266

EXERCICES 269

CHAPITRE 10 • **TRAITEMENTS DES IMAGES NUMÉRIQUES** 273

10.1 Traitement ponctuel des images numériques 273
10.1.1 Image numérique monochrome 273
10.1.2 Histogramme d'une image 273
10.1.3 Correction ponctuelle d'une image 274
10.1.4 Recadrage de dynamique 275
10.1.5 Égalisation de l'histogramme 275
10.1.6 Binarisation 276
10.1.7 Représentation d'une image monochrome en fausses couleurs 277

10.2 Filtrage des images numériques 278
10.2.1 Convolution numérique bidimensionnelle 278
10.2.2 Lissage d'une image ou filtrage passe-bas 279
10.2.3 Accentuation des contours des objets d'une image 280
10.2.4 Gradients d'image monochrome 281
10.2.5 Filtrage non linéaire du bruit d'une image 283

10.3 Analyse de la netteté d'une image numérique 285
10.3.1 Préambule 285
10.3.2 Exemples de critères de netteté 285
10.3.3 Test des critères sur un exemple 286
10.3.4 Résultats des tests 286
10.3.5 Remarques générales 287

10.4 Transformation de Hough d'une image 287
10.4.1 Objectif 287

10.4.2 Principe de la méthode pour la recherche de ligne droite 287
10.4.3 Problème pour la recherche de ligne verticale – Représentation normale d'une droite 288
10.4.4 Transformation de Hough pout la détection de droites dans une image binaire 288
10.4.5 Charge de calcul 289
10.4.6 Exemples 290

EXERCICES 292

ANNEXE A • **DÉVELOPPEMENT EN SÉRIES DE FOURIER DE QUELQUES SIGNAUX COURANTS** 295

ANNEXE B • **TRANSFORMATION EN Z** 297

ANNEXE C • **SYSTÈME – PRODUIT DE CONVOLUTION** 301

ANNEXE D • **SIGNAUX ALÉATOIRES** 303

ANNEXE E • **ESTIMATION DES PARAMÈTRES D'UN MODÈLE PAR LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS** 307

BIBLIOGRAPHIE 311

INDEX 313

Introduction

PRÉAMBULE

Les signaux, les sons, les images sont les manifestations tangibles des choses et des êtres qui nous entourent. Ils sont également les principaux vecteurs de la communication entre les hommes.

Donner une définition simple et brève du concept de signal n'est pas chose aisée tant cette notion procède d'une diversité de phénomènes. En s'en tenant à son sens purement étymologique, signal provient des mots latins *signum* (marque, empreinte, signe...) et *signatio* (désignation). Au mot signal, on peut également rattacher les termes signature et signification.

Bien qu'assez vague, cette définition rappelle qu'un signal est porteur d'informations. Il faut cependant se garder de confondre signal et information. Une même information peut en effet être portée par une infinité de signaux forts différents. Le message « *Aujourd'hui il pleut* » peut être prononcé ou écrit en toute langue, traduit en braille, en morse, en binaire, crypté selon différents codages et que dire quand ces signaux en modulent d'autres...

Les méthodes et techniques de traitement des signaux ont connu un essor sans précédent au cours des trente dernières années. Tous les domaines s'appuyant sur l'industrie électronique en profitent.

Au début des années 1980, le Compact Disc a révolutionné la haute fidélité et toute l'industrie phonographique en reléguant le microsillon au musée. Ce support, qui permet de stocker la musique avec une qualité inégalée jusqu'alors, est une application directe de la théorie de l'échantillonnage et de la quantification des signaux. Sa descendance actuelle (SACD, DVD audio...) a encore amélioré la qualité en offrant à l'auditeur une dynamique, une finesse de timbres et une spatialisation sonore accrues.

Les télécommunications font face à un accroissement incessant des besoins d'échanges entre les hommes en exploitant des méthodes sophistiquées de codage des sons et des images.

Les mondes du multimédia et de l'Internet utilisent, quelques fois avec précipitation, les méthodes les plus récentes de compression audio et vidéo-numérique pour réduire les temps de transfert.

Les techniques instrumentales réalisent des mesures précises sur des signaux entachés de bruit ou perturbés par des grandeurs d'influence inconnues, en utilisant des méthodes corrélatives ou déconvolutives.

Les départements de recherche des armées ont toujours été à l'avant garde en matière de traitement des signaux et de l'information. La radiotéléphonie portative, l'enregistrement magnétique, le cryptage des signaux, la reconnaissance automatique de formes, le radar, la surveillance satellitaire par analyse d'image... ont été, à l'origine, développés à des fins militaires.

Le secteur de la santé n'est pas en reste. Les prothèses auditives, le monitoring médical font appel au filtrage numérique adaptatif des sons et des signaux. L'imagerie par résonance magnétique (IRM), largement utilisée pour visualiser les structures anatomiques, s'appuie sur l'analyse de Fourier.

Enfin tous les secteurs de la recherche scientifique (physique, biologie, astronomie, automatique...) exploitent l'analyse et le traitement du signal pour extraire l'information utile.

On devra garder à l'esprit qu'un signal conserve une grande part d'héritage de la source qui le produit. La connaissance de cette dernière permet de choisir les méthodes d'analyse et de traitement les mieux appropriées.

ORIENTATION DE L'OUVRAGE

Cet ouvrage présente les méthodes d'analyse et de traitement des signaux les plus courantes.

Nous souhaitons relier le plus possible les concepts théoriques aux applications pratiques. Afin de faciliter la compréhension de l'exposé, nous avons choisi d'illustrer notre propos par des exemples tirés le plus souvent des domaines du son et de l'image. Les raisons à ce choix sont doubles :

– d'une part, ces domaines intéressent directement ou indirectement de nombreux secteurs d'activités ;
– d'autre part, la représentation mentale des signaux sonores et des images nous semble plus naturelle que le concept théorique de signal.

Des exercices traités, issus de notes d'application, complètent les chapitres les plus théoriques.

Nous proposons également au lecteur de réaliser quelques expériences simples qui devraient faciliter l'assimilation des aspects les plus abstraits.

PUBLIC VISÉ ET PRÉREQUIS

L'ouvrage est destiné aux étudiants, techniciens ou ingénieurs désireux d'appliquer ces méthodes dans leurs projets scientifiques et techniques.

Son contenu correspond à un programme dispensé en Sciences pour l'Ingénieur, notamment dans les formations de l'automatique, l'informatique, l'électronique, la physique et les mathématiques appliquées. Il correspond à un niveau d'études de Licence/Master dans le schéma européen actuel des études supérieures.

Pour suivre sans difficulté cet ouvrage, il est souhaitable que le lecteur possède les notions de système, de produit de convolution et qu'il soit un peu familiarisé avec l'algèbre des transformations (Laplace, Fourier, en z) et le calcul matriciel. Si besoin est, le lecteur pourra consulter les fiches en annexe, qui résument les principales propriétés de ces outils mathématiques.

La bonne compréhension du chapitre consacré au filtrage analogique nécessite la connaissance des montages classiques à base d'amplificateurs opérationnels.

OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES ET CONTENU DE LA DEUXIÈME ÉDITION

Cette deuxième édition, entièrement corrigée, comporte plusieurs compléments théoriques et méthodologiques importants, des exercices supplémentaires et quelques allègements.

Apporter une approche scientifique des signaux sonores et des images

Les chapitres 1 et 2 rappellent la nature et les propriétés physiques des phénomènes sonores ainsi que la formation et la représentation des images.

Le premier chapitre, « Propriétés et acquisition des signaux sonores » est complété par des exercices sur la mesure par voie ultrasonore (vélocimétrie doppler et télémétrie).

Dans le chapitre 2, « Acquisition et représentation des images », nous avons supprimé la partie consacrée à l'acquisition du signal vidéo que nous jugeons trop dépendante de l'évolution des technologies. En remplacement, il nous a semblé intéressant de présenter la modélisation matricielle de la formation optique d'une image. Cette méthode simple et très utilisée permet de modéliser la transformation d'une scène 3D en une image 2D. Elle est complétée par la calibration d'un système de prise de vue, étape indispensable lorsque l'on veut exploiter l'image dans un but métrologique.

Comprendre les méthodes d'échantillonnage, de quantification et de restitution des signaux

À l'origine, la plupart des signaux possèdent une évolution continue, incompatible avec les processeurs actuels de traitement qui exigent des signaux échantillonnés et numérisés. Le troisième chapitre expose les propriétés, avantages et limitations des méthodes d'échantillonnage et de quantification. Il s'achève par des techniques de restitution, d'interpolation et de génération des signaux.

© Dunod. La photocopie non autorisée est un délit.