

Christian S. GARGOUR,
Marcel GABREA
et Venkat RAMACHANDRAN

Traitement numérique
des signaux

3^e édition

ÉTS

Extrait de la publication



Presses
de l'Université
de Québec

Traitement numérique des signaux

3^e édition

Membre de
**L'ASSOCIATION
NATIONALE
DES ÉDITEURS
DE LIVRES**

Presses de l'Université du Québec

Le Delta 1, 2875, boulevard Laurier, bureau 450, Québec (Québec) G1V 2M2

Téléphone: 418 657-4399

Télécopieur: 418 657-2096

Courriel: puq@puq.ca

Internet: www.puq.ca

Diffusion/Distribution:

CANADA Prologue inc., 1650, boulevard Lionel-Bertrand, Boisbriand (Québec) J7H 1N7
Tél.: 450 434-0306 / 1 800 363-2864

FRANCE AFPU-D – Association française des Presses d'université
Sodis, 128, avenue du Maréchal de Lattre de Tassigny, 77 403 Lagny, France – Tél.: 01 60 07 82 99

BELGIQUE Patrimoine SPRL, avenue Milcamps 119, 1030 Bruxelles, Belgique – Tél.: 02 736 68 47

SUISSE Servidis SA, Chemin des Chalets 7, 1279 Chavannes-de-Bogis, Suisse – Tél.: 022 960.95.32



La Loi sur le droit d'auteur interdit la reproduction des œuvres sans autorisation des titulaires de droits. Or, la photocopie non autorisée – le « photocopillage » – s'est généralisée, provoquant une baisse des ventes de livres et compromettant la rédaction et la production de nouveaux ouvrages par des professionnels. L'objet du logo apparaissant ci-contre est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit le développement massif du « photocopillage ».

**Christian S. GARGOUR,
Marcel GABREA
et Venkat RAMACHANDRAN**

**Traitement numérique
des signaux**

3^e édition



 **Presses
de l'Université
du Québec**

**Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives nationales du Québec
et Bibliothèque et Archives Canada**

Gargour, Christian Samir

Traitement numérique des signaux

3^e édition.

Comprend des références bibliographiques.

Publié en collaboration avec : École de technologie supérieure.

ISBN 978-2-7605-3787-3

1. Traitement du signal - Techniques numériques. 2. Systèmes linéaires invariants dans le temps. 3. Filtres numériques (Mathématiques). 4. Transformations (Mathématiques). 5. Traitement du signal - Techniques numériques - Problèmes et exercices. I. Gabrea, Gheorghe Marcel. II. Ramachandran, Venkat, 1934- . III. Université du Québec. École de technologie supérieure. IV. Titre.

TK5102.9.G37 2013 621.382'2 C2013-940875-4

Les Presses de l'Université du Québec

reconnait l'aide financière du gouvernement du Canada par l'entremise du Fonds du livre du Canada et du Conseil des Arts du Canada pour leurs activités d'édition.

Elles remercient également la Société de développement des entreprises culturelles (SODEC) pour son soutien financier.

Conception graphique

Vincent Hanrion

Mise en pages

Info 1000 mots

Dépôt légal : 3^e trimestre 2013

- › Bibliothèque et Archives nationales du Québec
- › Bibliothèque et Archives Canada

© 2013 – Presses de l'Université du Québec / École de technologie supérieure
Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés

Imprimé au Canada

*À nos parents,
à nos enfants,
à nos étudiants.*

Table des matières

Avant-propos	xiii
Chapitre 1	
Signaux et systèmes discrets	1
1.1 Introduction	1
1.2 Signaux continus, discrets et numériques	2
1.3 Signaux discrets de base	6
1.4 Signaux discrets périodiques	8
1.5 Systèmes discrets	11
1.6 Linéarité	11
1.7 Invariance	14
1.8 Systèmes linéaires et invariants dans le temps	15
1.9 Causalité	17
1.10 Réponse impulsionnelle et convolution	18
1.11 Stabilité	29
1.12 Équations aux différences, systèmes non récurrents et systèmes récurrents	30
1.13 Conclusion	32
1.14 Exercices et problèmes	32
Chapitre 2	
Transformées de Fourier des signaux discrets	37
2.1 Introduction	37
2.2 Transformée de Fourier continue (TFC) d'un signal discret	37
2.3 Quelques propriétés de la transformée de Fourier continue (TFC) d'un signal discret	44

2.4	Échantillonnage et reconstitution des signaux continus.	58
2.5	Transformée de Fourier discrète (TFD) d'un signal discret. . .	61
2.6	Propriétés de la transformée de Fourier discrète d'un signal discret	68
2.7	TFD d'un signal discret périodique et fonctions fenêtres . . .	72
2.8	Conclusion	82
2.9	Exercices et problèmes	83
Chapitre 3		
	Transformée en Z	85
3.1	Introduction	85
3.2	Définition et région de convergence	85
3.3	Transformées en Z de quelques fonctions	90
3.4	Propriétés de la transformée en Z	96
3.5	Inversion de la transformée en Z	101
3.6	Relation entre la transformée de Fourier et la transformée en Z	124
3.7	Conclusion	127
3.8	Exercices et problèmes	127
Chapitre 4		
	Fonctions de transfert et stabilité	129
4.1	Introduction	129
4.2	Fonction de transfert d'un SLIT	129
4.3	Causalité d'un SLIT	139
4.4	Stabilité d'une fonction de transfert d'un SLIT	140
4.5	Fonctions de transfert causales, non causales et anticausales ayant le même module de réponse en fréquence	151
4.6	Conclusion	157
4.7	Exercices et problèmes	158
Chapitre 5		
	Réponses fréquentielles	161
5.1	Introduction	161
5.2	Réponse fréquentielle d'un SLIT	161
5.3	Réponses fréquentielles des facteurs du premier et du second ordre	169

5.4	Fonctions de transfert du second ordre	180
5.5	Fonctions de transfert en peigne	185
5.6	Fonctions de transfert passe-tout	188
5.7	Fonctions de transfert à déphasage minimal	192
5.8	Fonctions de transfert à déphasage linéaire	199
5.9	Conclusion	205
5.10	Exercices et problèmes	205
Chapitre 6		
	Structures de réalisation	207
6.1	Introduction	207
6.2	Concepts de base	207
6.3	Structures directes	212
6.4	Structure cascade	217
6.5	Structure parallèle	222
6.6	Structures mixtes	225
6.7	Structures pour la réalisation des fonctions de transfert non récursives (RIF) à coefficients symétriques	227
6.8	Structures en treillis	230
6.9	Conclusion	239
6.10	Exercices et problèmes	239
Chapitre 7		
	Conception des filtres récursifs	241
7.1	Introduction	241
7.2	Quelques méthodes de conception des filtres analogiques	242
7.3	Méthode de la réponse impulsionnelle invariante	264
7.4	Transformation bilinéaire	273
7.5	Utilisation de la transformation bilinéaire pour obtenir une fonction de transfert $H(z)$ ayant des caractéristiques fréquentielles données	281
7.6	Méthode de calcul de la transformation bilinéaire	298
7.7	Transformation des fonctions de transfert du domaine Z	304
7.8	Conclusion	307
7.9	Exercices et problèmes	307

Chapitre 8

Conception des filtres non récursifs 311

8.1 Introduction 311

8.2 Méthode des fenêtres 311

8.3 Méthode de l'échantillonnage en fréquence 341

8.4 Méthode de Parks-McLellan 344

8.5 Conclusion 347

8.6 Exercices et problèmes 347

Chapitre 9

Algorithmes de calcul de la transformée de Fourier discrète 351

9.1 Introduction 351

9.2 Algorithme de Goertzel 351

9.3 Méthodes de calcul de la transformée de Fourier rapide avec entrelacement temporel ou fréquentiel 353

9.4 Conclusion 366

Chapitre 10

Systèmes multiscadences 367

10.1 Introduction 367

10.2 Décimation par un entier 367

10.3 Transformée en Z d'un signal décimé 370

10.4 Transformée de Fourier d'un signal décimé 375

10.5 Décimation précédée d'un filtre passe-bas 382

10.6 Interpolation par un entier 389

10.7 Transformée en Z d'un signal interpolé 391

10.8 Transformée de Fourier d'un signal interpolé 392

10.9 Interpolation suivie d'un filtre passe-bas 396

10.10 Interpolation/décimation 402

10.11 Identités de Noble 412

10.12 Représentation polyphasée d'un décimateur 413

10.13 Filtres miroirs en quadrature (FMQ) et reconstruction parfaite du signal 419

10.14 Conclusion 424

Bibliographie 425

Avant-propos

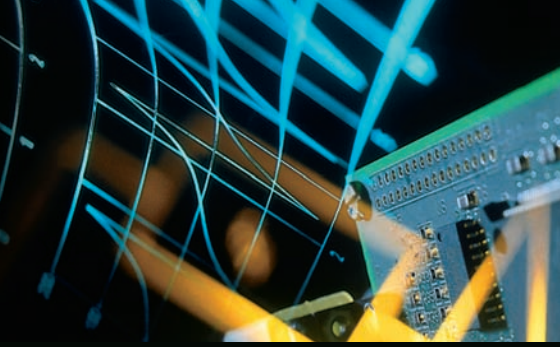
Depuis plusieurs années déjà, le traitement numérique des signaux n'a cessé de se développer et de prendre de l'ampleur. En peu de temps, il est passé du statut de technique complexe réservée à des applications très élaborées à celui d'outil indispensable à un nombre de plus en plus élevé d'applications de tous genres, allant des plus simples jusqu'aux plus complexes. Il remplace aujourd'hui un grand nombre de méthodes analogiques de traitement des signaux et, relativement à plusieurs aspects, s'est avéré plus polyvalent et plus avantageux que ces dernières. De plus, le traitement numérique des signaux permet certains types de manipulations qu'il serait difficile, voire impossible d'effectuer par les méthodes analogiques. Nous avons donc été témoins d'une explosion en matière d'applications de cette discipline. Ces applications s'étendent à un nombre toujours croissant de domaines en génie. Ainsi, l'analyse et le traitement des images et de la parole, les télécommunications et les techniques biomédicales, pour n'en citer que quelques-uns, ne sauraient s'en passer.

L'ouvrage présenté ici se veut une introduction au traitement numérique des signaux. Il en présente les éléments de base en dix chapitres. Le premier chapitre est une introduction générale aux systèmes linéaires et invariants dans le temps ainsi qu'aux signaux à temps discret. Le deuxième chapitre présente une introduction à la transformée de Fourier de ces signaux. Le troisième chapitre porte sur l'étude de la transformée en Z . Le quatrième chapitre traite des fonctions de transfert et de la stabilité des systèmes linéaires invariants dans le temps. Une étude des réponses en fréquence de tels systèmes est présentée dans le cinquième chapitre et quelques méthodes importantes utilisées pour leur réalisation font l'objet du sixième. Les chapitres 7 et 8 présentent respectivement des méthodes de conception de filtres récursifs et non récursifs. Le neuvième chapitre présente et décrit sommairement quelques algorithmes utilisés pour le calcul rapide de la transformée de Fourier. Enfin, le dixième chapitre porte sur le traitement multicausal des signaux. L'ouvrage comprend de nombreux exemples et exercices destinés à illustrer les concepts présentés et à en parfaire la compréhension.

La solution d'un grand nombre de ces exemples fait usage de programmes écrits pour le logiciel MATLAB[®] afin de familiariser les lecteurs et lectrices avec les méthodes d'analyse et de conception assistées par ordinateur utilisées en traitement numérique des signaux.

Cet ouvrage s'adresse aussi bien aux étudiants et étudiantes en génie électrique qu'aux ingénieurs et ingénieures et aux scientifiques œuvrant dans les nombreux domaines où l'on a recours à cette discipline.

Les auteurs adressent leurs remerciements à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, les ont aidés à mener à bien la publication de ce volume. Ils remercient l'École de technologie supérieure pour son appui et sa confiance, la compagnie The MathWorks Inc. pour son aide sous forme de logiciels gracieusement fournis et l'ensemble de leurs étudiants sans lesquels ce livre n'aurait jamais pu voir le jour. Ils remercient enfin leurs familles respectives pour le soutien et la compréhension dont elles ont fait preuve tout au long de la rédaction de cet ouvrage.



Le traitement numérique des signaux n'a cessé de se développer et de prendre de l'ampleur au cours des dernières années. Ses applications, de plus en plus nombreuses, s'étendent à des domaines aussi divers que les télécommunications, le traitement des images et de la parole, le génie biomédical, etc. Une bonne maîtrise de cette discipline est donc essentielle pour tous ceux et celles qui étudient ou œuvrent dans les différents domaines du génie en général, et plus particulièrement dans celui du génie électrique.

Cet ouvrage est une introduction aux principes et aux méthodes du traitement numérique des signaux. On vise à y présenter de façon claire et concise des systèmes de base, des techniques utilisées pour ce type de traitement et des méthodes de conception des filtres numériques. De nombreux exemples y sont résolus pour illustrer la théorie exposée. Le logiciel MATLAB® y est utilisé pour présenter certaines méthodes d'analyse et de conception assistées par ordinateurs.

CHRISTIAN S. GARGOUR, docteur en génie de l'Université Concordia de Montréal, membre senior à vie de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) et fellow de l'Institution of Engineering and Technology (IET), est professeur au Département de génie électrique de l'École de technologie supérieure, Université du Québec. Il a été en 1985 l'un des récipiendaires du Myrill B. Reed Best Paper Award décerné par le Midwest Symposium on Circuits and Systems. Il est coauteur d'un ouvrage sur le filtrage analogique et de plusieurs chapitres d'un ouvrage collectif sur le traitement numérique des signaux 2D. Ses travaux de recherche, qui portent sur le traitement analogique et numérique des signaux ainsi que sur ses applications à différents domaines du génie, ont fait l'objet de nombreuses communications et publications.

MARCEL GABREA, docteur en génie de l'Université de Bordeaux 1 et de l'Université « Politehnica » de Timisoara, est professeur au Département de génie électrique de l'École de technologie supérieure, Université du Québec. Ses travaux de recherche portent sur le traitement numérique et analogique des signaux, le rehaussement de la parole en ambiance bruitée et la reconnaissance robuste de la parole. Il a publié de nombreux articles de recherche dans ces domaines.

VENKAT RAMACHANDRAN, docteur en génie de l'Institut indien des sciences de Bangalore en Inde, est professeur au Département de génie électrique de l'Université Concordia de Montréal. Il est fellow de l'IEEE et a reçu le Western Electric Fund Award de l'Association américaine pour l'enseignement du génie en 1983 et le Myrill B. Reed Best Paper Award du Midwest Symposium on Circuits and Systems en 1985. Ses principaux travaux de recherche portent sur la théorie des circuits et sur le filtrage numérique. Il a publié de nombreux ouvrages et articles de recherche dans ces domaines.

