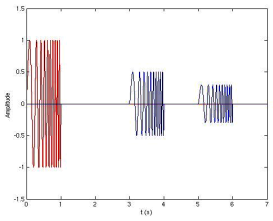
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIŞOARA
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ŞI CALCULATOARE
DEPARTAMENTUL DE CALCULATOARE

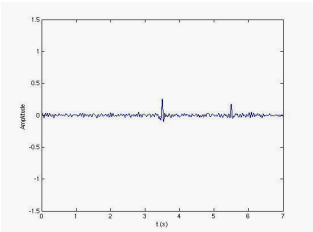
Mihai V. MICEA

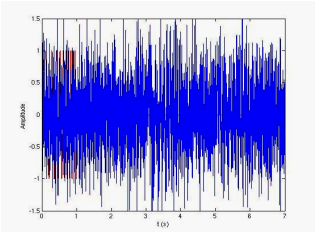
Introducere în Prelucrarea Numerică a Semnalelor

Suport de curs

Ediția a II-a







2007

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIŞOARA
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ŞI CALCULATOARE
DEPARTAMENTUL DE CALCULATOARE

Mihai V. MICEA

Introducere în Prelucrarea Numerică a Semnalelor

Suport de curs

Ediția a II-a

Material realizat în cadrul

2007

Notă asupra ediţiei

Ediția de față a apărut ca o continuare firească şi necesară a primei ediții, fiind motivată în primul rând de preocuparea constantă de a oferi studenților Facultății de Automatică şi Calculatoare ce urmează cursurile disciplinei "Prelucrarea Numerică a Semnalelor" un suport tipărit care să uşureze procesul de asimilare a materiei predate la curs.

Pe de altă parte, lucrarea aduce o serie de corecturi şi adăugiri ediției anterioare, rezultate în urma procesului de predare a materialului pe parcursul celor patru ani de când a fost tipărită prima ediție. Întregul material al suportului de curs a fost revăzut. Câteva dintre cele mai semnificative modificări aduse includ următoarele:

- Explicarea demonstrării formale a invarianței în timp a sistemelor numerice a fost modificată şi prezentată mai detaliat
- Au fost adăugate trei noi pagini ce ilustrează demonstrarea invarianței în timp a sistemelor numerice
- Titlurile unor subcapitole din secțiunea "9. Analiza sistemelor în domeniul timp" au fost modificate pentru a evidenția în mod corespunzător diferența dintre domeniul continuu şi cel discret
- Au fost aduse o serie de corecturi, în special materialului din capitolele "9. Analiza sistemelor în domeniul timp" şi "11.Transformata Fourier"
- Au fost refăcute o serie de figuri şi grafice, în special în materialul capitolelor "10. Transformata Z" şi "12. Analiza sistemelor LTI în domeniul frecvență"
- Bibliografia a fost completată cu titluri recente în domeniu

Timişoara, Octombrie 2007 Mihai V. MICEA

Prefaţă

Extraordinara răspândire a tehnologiei digitale în viaţa de zi cu zi a omului, de la simpla tehnoredactare pe un calculator personal a unui document şi până la sateliţii şi sondele spaţiale autonome, a adus în actualitate o serie de preocupări ştiinţifice şi tehnice specifice, deosebit de interesante.

"Achiziţia şi prelucrarea numerică a semnalelor" reprezintă un exemplu de domeniu ştiinţific şi ingineresc, ce are ca obiectiv găsirea de răspunsuri cât mai corecte şi mai eficiente la următoarele întrebări ce pot fi formulate din punctul de vedere al unui sistem de calcul:

- "Cum pot transforma cât mai fidel şi mai rapid semnalele fizice din mediul înconjurător în date numerice pe care apoi să le pot memora şi procesa ?"
- "Ce fac cu datele numerice rezultate în urma achiziţionării de semnale din mediul exterior ?"

Prima întrebare se referă la problematica interfaţării sistemelor de calcul numerice (sisteme ce lucrează cu valori discrete, binare) la mediul înconjurător, caracterizat prin mărimi fizice în majoritate neelectrice, cu valori continue. Achiziţia numerică a semnalelor este ramura de inginerie ce se ocupă de acest subiect, aflat la confluenţa dintre electronică şi ştiinţa calculatoarelor. Achiziţia numerică a semnalelor vizează teoria funcţionării, proiectarea, construcţia, testarea şi integrarea în aplicaţii a senzorilor electrici de semnal, a traductoarelor, actuatorilor (elemente de acţionare electrică), dispozitivelor de condiţionare a semnalelor electrice (amplificare/atenuare, pre-filtrare) şi a circuitelor de conversie analog-numerică şi numeric-analogică a semnalelor electrice.

Cea de-a doua întrebare formulată anterior este legată de domeniul prelucrării datelor cu ajutorul sistemelor numerice de calcul. Disciplina prelucrării numerice a semnalelor este un domeniu de inginerie cu rădăcini adânci în matematică, extrem de vast şi de actual. Cu toate acestea, preocupări legate de acest domeniu au existat cu mult înainte de a apărea însăşi noţiunea de sistem de calcul numeric.

În 1665, Sir Isaac Newton, cercetând natura luminii, a trecut o rază de soare printr-o prismă de sticlă, descompunând astfel lumina în componentele sale de frecvenţă (cele şapte culori ale curcubeului). Deoarece banda colorată obţinută era un fenomen insubstanţial (fără masă), Newton a denumit-o *spectru* (din latinescul *spectrum* = *fantomă*). Mai mult, Newton a trecut raza de lumină descompusă de

prima prismă printr-o a doua prismă, dispusă invers. Ca rezultat, spectrul luminii a fost recompus în raza de lumină albă, originală.

Astfel, Newton a realizat printre primii operațiile de descompunere a unui semnal (raza de lumină) în spectrul său de frecvențe, şi de sintetizare (recompunere) a acestuia, introducând în ştiință termenul de *spectru*.

Un alt exemplu notabil, care ilustrează vechimea preocupărilor în domeniul prelucrării semnalelor, îl reprezintă cazul lui Jean Baptiste Josef, baron de Fourier, care în 1798 avea 30 de ani şi participa ca om de ştiință în campania militară a lui Napoleon din Egipt. În 1807, Fourier şi-a prezentat la "Institut de France" ideile sale pe tema distribuției şi transmiterii căldurii prin corpurile solide, avansând o serie de soluții bazate pe serii trigonometrice. Deoarece lucrarea sa a fost controversată la vremea aceea, Fourier a trebuit să mai aştepte încă 15 ani până când monumentalul tratat despre căldură a văzut lumina tiparului.

Fourier a demonstrat în lucrarea sa faptul că semnalele periodice pot fi reprezentate (descompuse) ca sumă ponderată de sinusoide înrudite armonic (sinusoide având frecvențe multipli ai unei frecvențe de bază). El a arătat de asemenea că semnalele aperiodice pot fi reprezentate ca sume infinitezimale (integrale) ale unor sinusoide neînrudite armonic. Aceste două idei esențiale stau astăzi la baza faimoaselor *Serii Fourier* şi a *Transformatei Fourier* – instrumente de bază utilizate în analiza şi prelucrarea numerică a semnalelor.

Prelucrarea numerică a semnalelor este astăzi o disciplină extrem de vastă, din care s-au desprins deja o serie de ramuri specializate: prelucrarea numerică a imaginilor şi a secvențelor de imagini, teoria şi aplicațiile filtrării digitale, procesarea rețelelor de senzori, transmisiunile de date numerice, compresia digitală audio şi video, şi aşa mai departe.

De asemenea, diversitatea şi numărul enorm de domenii de aplicații ale prelucrării numerice a semnalelor evidențiază dimensiunile şi impactul acestei discipline în viața cotidiană. Iată în continuare doar câteva astfel de domenii de aplicație:

- Prelucrări generice de semnal (proiectarea filtrelor digitale adaptive, compresii/decompresii de date, algoritmi de cifrare/codare a datelor, sintetizare de semnale şi forme de undă, etc.)
- Grafică şi prelucrări de imagini (manipulări de imagini tridimensionale, animații, hărți digitale, recunoaşterea formelor, vedere artificială, prelucrarea calității imaginilor, etc.)
- Instrumentație industrială şi de laborator (generatoare de funcții programabile, analizoare spectrale, osciloscoape digitale de înaltă precizie şi performanță, instrumentație asistată de calculator, instrumentație virtuală, etc.)
- Aplicații militare (sisteme de ghidare a rachetelor, echipamente de navigare performante, procesare RADAR şi SONAR, comunicații securizate, etc.)

- Aplicații medicale (monitorizare fetală, aparate auditive, echipamente cu ultrasunete, protetică, echipamente de tomografie computerizată, etc.)
- Aparatură casnică şi de consum (aparate radio/TV digitale, sintetizatoare muzicale, roboți telefonici, aparatură casnică inteligentă, echipamente de monitorizare/supraveghere a locuinței, etc.).

Interesul ridicat de care se bucură domeniul prelucrării numerice a semnalelor în prezent este ilustrat şi de numărul extrem de mare de companii producătoare de echipament electronic şi de calcul digital care alocă importante resurse umane, financiare şi de marketing în acest domeniu: *Texas Instruments, Motorola, Philips, Siemens, Alcatel, Tektronix, Hewlett-Packard şi Compaq, Hitachi, Intel, AMD, Sun Microsystems* şi multe altele (practic, majoritatea companiilor importante care produc semiconductori, au importante preocupări şi în prelucrarea numerică a semnalelor). De asemenea, s-au înființat şi funcționează cu succes numeroase firme specializate în prelucrarea numerică a semnalelor: *National Instruments, MathWorks, Pentek, Choral Research, Signalogic* şi altele.

Procesoarele numerice de semnal (DSP – *Digital Signal Processor*) au fost concepute şi construite ca derivate ale procesoarelor şi microcontrollerelor generice, specializate pentru aplicații de prelucrări numerice de date. Arhitectura DSP-urilor este special proiectată pentru a oferi un suport cât mai eficient pentru operațiile intensive de calcul şi manipulare a datelor implicate de algoritmii de prelucrare a semnalelor: convoluție, corelație, Transformata Fourier, construcția de filtre digitale şi aşa mai departe. Tehnologia DSP-urilor a ajuns în prezent la maturitate, fiind utilizată într-un număr foarte mare de echipamente şi aplicații, de la banalul aspirator casnic (unde un sistem cu DSP este integrat pentru a anula zgomotul de pe liniile de alimentare şi zgomotul acustic al aspiratorului) şi până la sistemele complexe din sateliți (unde asigură prelucrarea datelor pentru transmiterea/recepționarea de date comprimate şi codificate corespunzător, sau prelucrarea primară a imaginilor prelevate).

Majoritatea instituțiilor de învățământ superior tehnic din lume au preocupări majore legate de achiziția şi prelucrarea numerică a semnalelor, dezvoltând trei sau chiar patru discipline de studiu în domeniu, alocând importante fonduri, specialişti şi laboratoare special echipate. De asemenea, achiziția şi prelucrarea numerică a semnalelor constituie un domeniu de interes special pentru cercetarea universitară şi pentru programele de doctorat şi masterat.

Universitatea "POLITEHNICA" din Timişoara este un bun exemplu în acest sens, inclusiv prin laboratorul *DSPLabs* (*Digital Signal Processing Laboratories*) din cadrul Departamentului de Calculatoare. DSPLabs operează de peste unsprezece ani în domeniile proiectării, construcției, testării şi integrării în aplicații a sistemelor de achiziție şi prelucrare numerică a semnalelor, sistemelor de prelucrare numerică a imaginilor şi a sistemelor cu microcontroller. Activitățile de

cercetare şi aplicative dezvoltate în cadrul DSPLabs sunt ilustrate şi de parteneriatele importante în care este implicat laboratorul:

- *Motorola, Incorporated – Semiconductor Product Sector*. Un program major de colaborare a fost iniţiat în 1999, pentru dezvoltarea de programe didactice şi de cercetare-dezvoltare de aplicaţii în domeniul prelucrării numerice a semnalelor. Cursul de faţă şi mai ales lucrările practice de laborator sunt realizate cu sprijinul Motorola.
- *Alcatel Network Systems Romania (ANSR) Timişoara*. Colaborarea, începută în 2000, abordează domeniul telecomunicaţiilor digitale moderne, fixe şi mobile, şi cuprinde dezvoltarea de programe didactice şi de proiecte de diplomă şi masterat.
- *Lasting Systems, Timişoara*. Ca unul dintre cei mai apropiaţi şi mai vechi parteneri, firma Lasting Systems Timişoara sprijină numeroase proiecte şi activităţi didactice în domeniile sistemelor de achiziţii de date şi a soluţiilor moderne de reţele de calcul.
- Laboratorul universitar interdisciplinar de *Modelare, Testare şi Monitorizare Asistată de Calculator a Maşinilor Electrice – D109*. În cei peste şase ani de colaborare cu DSPLabs în domeniul cercetării, au fost dezvoltate cu succes peste zece granturi naţionale majore.
- *Philips Research, Siemens VDO, Microsoft Research* – colaborări în curs de realizare.

În cadrul general prezentat, lucrarea de faţă îşi propune a servi ca suport tipărit pentru cursul introductiv de prelucrare numerică a semnalelor ("Teoria Prelucrării Numerice a Semnalelor"), adresându-se astfel în special studenţilor anului IV Calculatoare din cadrul Facultăţii de Automatică şi Calculatoare, Universitatea "POLITEHNICA" din Timişoara.

Lucrarea este structurată în trei secţiuni. Secţiunea introductivă cuprinde trei capitole – consideraţii generale legate de disciplina prelucrării numerice a semnalelor, enumerarea pe scurt a câtorva din domeniile de aplicaţie ale disciplinei şi descrierea structurii cursului.

Secţiunea a doua tratează prelucrarea numerică a semnalelor în domeniul timp. Sunt introduse şi descrise semnalele discrete în raport cu timpul (semnalele numerice), elementele de bază privind operaţiile de conversie a semnalelor analogice în semnale numerice şi reciproc, şi sunt prezentate sistemele numerice şi proprietăţile acestora. Un interes aparte este acordat convoluţiei semnalelor ca fiind una din operaţiile de bază ale domeniului. Corelaţia semnalelor numerice este descrisă în continuare, împreună cu importantele sale aplicaţii în practică. Ultimul capitol al secţiunii se ocupă cu analiza sistemelor numerice în domeniul timp şi cu descrierea acestora cu ajutorul ecuaţiilor cu diferenţe.

În secţiunea a treia este abordată prelucrarea numerică a semnalelor în domeniul frecvenţă. Primul capitol al secţiunii – al zecelea al lucrării – introduce Transformata Z, ca fiind un operator cheie în analiza şi studiul semnalelor şi sistemelor numerice în domeniul frecvenţă. Capitolul următor tratează un alt operator esenţial în prelucrarea numerică a semnalelor – Transformata Fourier. Ultimul capitol se ocupă cu analiza sistemelor numerice în domeniul frecvenţă. Aici sunt introduse principalele tipuri de filtre digitale şi sunt studiate caracteristicile lor de bază.

Materialul conţine slide-urile ce sunt prezentate în cadrul cursului prin video-proiecţie. Pe fiecare pagină a suportului de curs, sub imaginea slide-ului, este prevăzut un spaţiu pentru notiţele care pot fi efectuate în timpul expunerii. Prin această iniţiativă s-a avut în vedere îmbunătăţirea procesului de predare a materialului de curs şi uşurarea asimilării acestuia de către studenţi. Astfel, studenţii vor putea participa mai eficient şi într-un mod interactiv la orele de curs, eliminându-se operaţiile de simplă copiere a informaţiei în caietele de notiţe.

În final, doresc să mulţumesc colegilor mei din cadrul Departamentului de Calculatoare al Universităţii "POLITEHNICA" din Timişoara, în general, şi profesorilor dr. ing. Ştefan HOLBAN, dr. ing. Vladimir CREŢU şi dr. ing. Mircea STRATULAT, în particular, pentru întregul sprijin acordat de-a lungul fructoasei noastre colaborări.

Mihai V. MICEA

Cuprins

SECȚIUNEA I. INTRODUCERE **1**

1 Considerații generale **2**

1.1 Ce este DSP ? ... 2
1.2 Arhitecturi uzuale DSP ... 3
1.3 Paşi de implementare SPNS ... 4

2 Domenii de aplicație **6**

2.1 Digital sau analogic ? ... 6
2.2 Domenii de aplicație ... 7
2.3 Exemple de aplicații DSP ... 11

3 Structura cursului **13**

3.1 Convenții şi notații ... 13
3.2 Structura materialului ... 15

SECȚIUNEA II. PRELUCRAREA NUMERICĂ A SEMNALELOR ÎN DOMENIUL TIMP **16**

4 Semnale discrete în raport cu timpul **17**

4.1 Introducere ... 17
4.2 Moduri de reprezentare ... 18
4.3 Semnale elementare ... 19
4.4 Clasificarea semnalelor ... 25
4.5 Operații simple cu semnale ... 28

5 Conversia semnalelor **33**

5.1 Introducere ... 33
5.2 Conversia analog-numerică ... 34
5.3 Operația de eşantionare ... 35
5.4 Teorema eşantionării în domeniul timp ... 37
5.5 Parametrii semnalelor numerice ... 41
5.6 Cuantizarea şi codificarea binară a semnalelor ... 42
5.7 Conversia numeric-analogică ... 52

6 Sisteme numerice 53

6.1 Definire ... 53
6.2 Reprezentare ... 55
6.3 Clasificarea sistemelor numerice ... 56

7 Convoluția semnalelor numerice 63

7.1 Definirea convoluției ... 63
7.2 Calculul convoluției ... 64
7.3 Interpretarea practică a convoluției ... 65
7.4 Convoluția liniară şi convoluția circulară ... 66
7.5 Răspunsul impuls al sistemelor numerice ... 67
7.6 Proprietățile convoluției ... 68

8 Corelația semnalelor numerice 69

8.1 Corelația semnalelor de energie ... 69
8.2 Corelația semnalelor de putere ... 71
8.3 Proprietățile corelației ... 72

9 Analiza sistemelor numerice în domeniul timp 76

9.1 Interconectarea sistemelor numerice ... 76
9.2 Cauzalitatea sistemelor numerice ... 78
9.3 Stabilitatea sistemelor numerice ... 79
9.4 Sisteme numerice FIR şi IIR ... 80
9.5 Sisteme numerice descrise prin ecuații diferențiale ... 81
9.6 Sisteme caracterizate prin ecuații diferențiale cu coeficienți constanți ... 84

SECȚIUNEA III. PRELUCRAREA NUMERICĂ A SEMNALELOR ÎN DOMENIUL FRECVENȚĂ 88

10 Transformata Z 89

10.1 Definirea Transformatei Z ... 89
10.2 ROC şi clasificarea semnalelor numerice ... 90
10.3 Proprietățile Transformatei Z ... 94
10.4 Transformata Z rațională. Poli şi zerouri ... 99
10.5 Comportarea în domeniul timp a semnalelor numerice în funcție de configurația poli-zerouri ... 102
10.6 Funcția de transfer a sistemelor numerice ... 109
10.7 Comportarea sistemelor numerice LTI în domeniul frecvență ... 111

11 Transformata Fourier 122

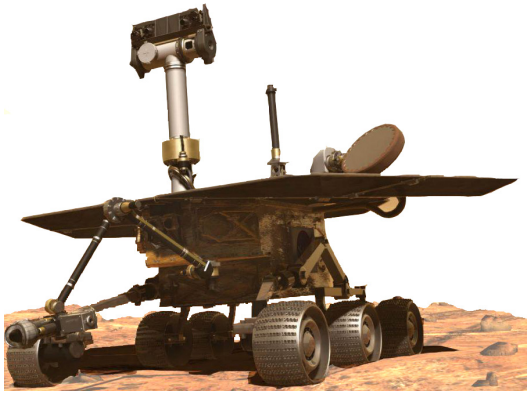
11.1 Introducere ... 122
11.2 Definirea Transformatei Fourier ... 123

11.3 Teorema eşantionării în domeniul frecvenţă 126
11.4 Proprietăţile Transformatei Fourier 129

12 Analiza sistemelor numerice LTI în domeniul frecvenţă 136

12.1 Răspunsul sistemelor la semnale exponenţiale complexe 136
12.2 Caracteristicile filtrelor ideale 137
12.3 Filtre trece-jos 142
12.4 Filtre trece-sus 147
12.5 Filtre trece-bandă 148
12.6 Filtre opreşte-bandă 153
12.7 Rezonatoare digitale 154
12.8 Filtre crestătură 156
12.9 Oscilatoare sinusoidale 158

Bibliografie selectivă 161



Lucrare executată sub comanda nr. .....
la Centrul de Multiplicare al
Universității POLITEHNICA Timişoara
2007