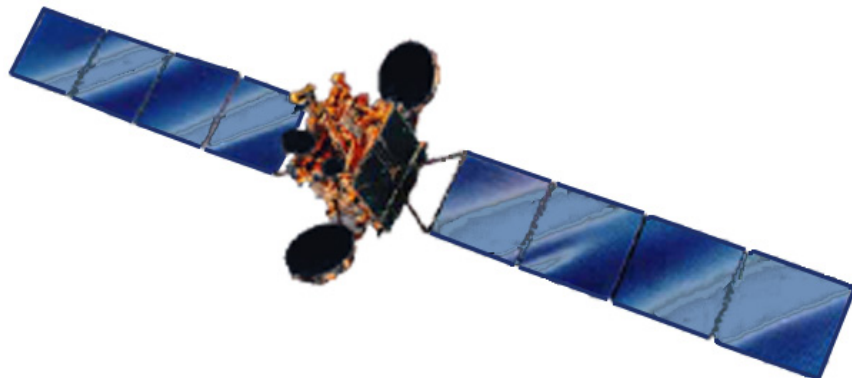
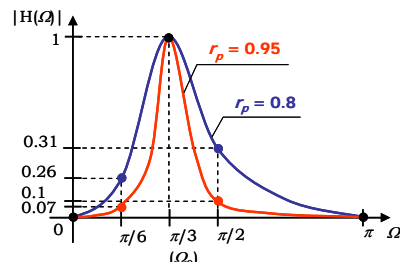
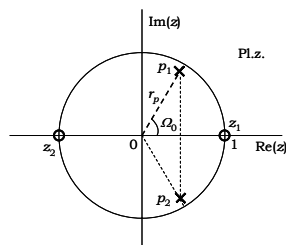


UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE  
DEPARTAMENTUL DE CALCULATOARE

Mihai V. MICEA

# Introducere în Prelucrarea Numerică a Semnalelor

Suport de curs



2003

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE  
DEPARTAMENTUL DE CALCULATOARE**

**Mihai V. MICEA**

# **Introducere în Prelucrarea Numerică a Semnalelor**

**Suport de curs**

**Material realizat în cadrul**



**cu sprijinul**



**2003**

## Prefață

Extraordinara răspândire a tehnologiei digitale în viața de zi cu zi a omului, de la simpla tehnoredactare pe un calculator personal a unui document și până la sateliții și sondele spațiale autonome, a adus în actualitate o serie de preocupări științifice și tehnice specifice, deosebit de interesante.

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

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

Prima întrebare se referă la problematica interfațării sistemelor de calcul numerice (sisteme ce lucrează cu valori discrete, binare) la mediul înconjurător, caracterizat prin mărimi fizice în majoritate neelectrice, cu valori continue. Achiziția numerică a semnalelor este ramura de inginerie ce se ocupă de acest subiect, aflat la confluența dintre electronică și știința calculatoarelor. Achiziția numerică a semnalelor vizează teoria funcționării, proiectarea, construcția, testarea și integrarea în aplicații a senzorilor electrici de semnal, a traductoarelor, actuatorilor (elemente de acționare electrică), dispozitivelor de condiționare a semnalelor electrice (amplificare/atenuare, pre-filtrare) și a circuitelor de conversie analog-numerică și 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 și de actual. Cu toate acestea, preocupări legate de acest domeniu au existat cu mult înainte de a apărea însăși noțiunea 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 frecvență (cele șapte culori ale curcubeului). Deoarece banda colorată obținută era un fenomen insubstanțial (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, și de sintetizare (recompunere) a acestuia, introducând în știință 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 și participa ca om de știință în campania militară a lui Napoleon din Egipt.

În 1807, Fourier și-a prezentat la "Institut de France" ideile sale pe tema distribuției și 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 aștepte 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 sinusoidale înrudite armonice (sinusoidale 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 sinusoidale neînrudite armonice. Aceste două idei esențiale stau astăzi la baza faimoaselor *Serii Fourier* și a *Transformatei Fourier* – instrumente de bază utilizate în analiza și 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 și a secvențelor de imagini, teoria și aplicațiile filtrării digitale, procesarea rețelelor de senzori, transmisiunile de date numerice, compresia digitală audio și video, și așa mai departe.

De asemenea, diversitatea și numărul enorm de domenii de aplicații ale prelucrării numerice a semnalelor evidențiază dimensiunile și 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 și forme de undă, etc.)
- Grafică și prelucrări de imagini (manipulări de imagini tridimensionale, animații, hărți digitale, recunoașterea formelor, vedere artificială, prelucrarea calității imaginilor, etc.)
- Instrumentație industrială și de laborator (generatoare de funcții programabile, analizoare spectrale, osciloscoape digitale de înaltă precizie și performanță, instrumentație asistată de calculator, instrumentație virtuală, etc.)

- Aplicații militare (sisteme de ghidare a rachetelor, echipamente de navigare performante, procesare RADAR și SONAR, comunicații securizate, etc.)
- Aplicații medicale (monitorizare fetală, aparate auditive, echipamente cu ultrasunete, protetică, echipamente de tomografie computerizată, etc.)
- Aparatură casnică și 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 și de numărul extrem de mare de companii producătoare de echipament electronic și de calcul digital care alocă importante resurse umane, financiare și de marketing în acest domeniu: *Texas Instruments, Motorola, Philips, Siemens, Alcatel, Tektronix, Hewlett-Packard și Compaq, Hitachi, Intel, AMD, Sun Microsystems* și multe altele (practic, majoritatea companiilor importante care produc semiconductori, au importante preocupări și în prelucrarea numerică a semnalelor).

De asemenea, s-au înființat și funcționează cu succes numeroase firme specializate în prelucrarea numerică a semnalelor: *National Instruments, Math Works, Pentek, Choral Research, Signalogic* și altele.

Procesoarele numerice de semnal (DSP – *Digital Signal Processor*) au fost concepute și construite ca derivate ale procesoarelor și 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 și manipulare a datelor implicate de algoritmi de prelucrare a semnalelor: convoluție, corelație, Transformata Fourier, construcția de filtre digitale și așa mai departe.

Tehnologia DSP-urilor a ajuns în prezent la maturitate, fiind utilizată într-un număr foarte mare de echipamente și aplicații, de la banalul aspirator casnic (unde un sistem cu DSP este integrat pentru a anula zgomotul de pe liniile de alimentare și zgomotul acustic al aspiratorului) și până la sistemele complexe din sateliți (unde asigură prelucrarea datelor pentru transmiterea/recepționarea de date compresate și codificate corespunzător, sau prelucrarea primară a imaginilor prelevate).

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

Universitatea "POLITEHNICA" din Timișoara este un bun exemplu în acest sens, prin laboratorul *DSPLabs (Digital Signal Processing Laboratories)* din cadrul Departamentului de Calculatoare. DSPLabs operează de peste șapte ani în domeniile proiectării, construcției, testării și integrării în aplicații a sistemelor de

achiziție și prelucrare numerică a semnalelor, sistemelor de prelucrare numerică a imaginilor și a sistemelor cu microcontroller.

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

- *Motorola, Incorporated – Semiconductor Product Sector.* Un program major de colaborare a fost inițiat în 1999, pentru dezvoltarea de programe didactice și de cercetare-dezvoltare de aplicații în domeniul prelucrării numerice a semnalelor. Cursul de față și mai ales lucrările practice de laborator sunt realizate cu sprijinul Motorola.
- *Alcatel Network Systems Romania (ANSR) Timișoara.* Colaborarea, începută în 2000, abordează domeniul telecomunicațiilor digitale moderne, fixe și mobile, și cuprinde dezvoltarea de programe didactice și de proiecte de diplomă și masterat.
- *Lasting Systems, Timișoara.* Ca unul dintre cei mai apropiați și mai vechi parteneri, firma Lasting Systems Timișoara sprijină numeroase proiecte și activități didactice în domeniile sistemelor de achiziții de date și a soluțiilor moderne de rețele de calcul.
- Laboratorul universitar interdisciplinar de *Modelare, Testare și Monitorizare Asistată de Calculator a Mașinilor Electrice – D109.* În cei peste șase ani de colaborare cu DSPLabs în domeniul cercetării, au fost dezvoltate cu succes peste zece granturi naționale majore.
- *Philips Research, Siemens VDO, Microsoft Research* – colaborări în curs de realizare.

În cadrul general prezentat, lucrarea de față își propune a servi ca suport tipărit pentru cursul introductiv de prelucrare numerică a semnalelor ("Teoria Prelucrării Numerice a Semnalelor"), adresându-se astfel în special studenților anului IV Calculatoare din cadrul Facultății de Automatică și Calculatoare, Universitatea "POLITEHNICA" din Timișoara.

Lucrarea este structurată în trei secțiuni. Secțiunea introductivă cuprinde trei capitole – considerații generale legate de disciplina prelucrării numerice a semnalelor, enumerarea pe scurt a câtorva din domeniile de aplicație ale disciplinei și descrierea structurii cursului.

Secțiunea a doua tratează prelucrarea numerică a semnalelor în domeniul timp. Sunt introduse și descrise semnalele discrete în raport cu timpul (semnalele numerice), elementele de bază privind operațiile de conversie a semnalelor analogice în semnale numerice și reciproc, și sunt prezentate sistemele numerice și proprietățile acestora. Un interes aparte este acordat convoluției semnalelor ca fiind una din operațiile de bază ale domeniului. Corelația semnalelor numerice este descrisă în continuare, împreună cu importantele sale aplicații în practică. Ultimul

capitol al secțiunii se ocupă cu analiza sistemelor numerice în domeniul timp și cu descrierea acestora cu ajutorul ecuațiilor diferențiale.

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

Materialul conține slide-urile ce sunt prezentate în cadrul cursului prin video-proiecție. Pe fiecare pagină a suportului de curs, sub imaginea slide-ului, este prevăzut un spațiu pentru notițele care pot fi efectuate în timpul expunerii.

Prin această inițiativă s-a avut în vedere îmbunătățirea procesului de predare a materialului de curs și ușurarea asimilării acestuia de către studenți. Astfel, studenții vor putea participa mai eficient și într-un mod interactiv la orele de curs, eliminându-se operațiile de simplă copiere a informației în caietele de notițe.

În final, doresc să mulțumesc colegilor mei din cadrul Departamentului de Calculatoare al Universității "POLITEHNICA" din Timișoara, în general, și profesorilor dr. ing. Ștefan HOLBAN, dr. ing. Vladimir CREȚU și dr. ing. Mircea STRATULAT, în particular, pentru întregul sprijin acordat de-a lungul fructoasei noastre colaborări.

## Cuprins

<b>SECȚIUNEA I. INTRODUCERE</b>	<b>1</b>
<b>1 Considerații generale</b>	<b>2</b>
1.1 Ce este DSP ? .....	2
1.2 Arhitecturi uzuale DSP.....	3
1.3 Pași de implementare SPNS .....	4
<b>2 Domenii de aplicație</b>	<b>6</b>
2.1 Digital sau analogic ? .....	6
2.2 Domenii de aplicație.....	7
2.3 Exemple de aplicații DSP.....	11
<b>3 Structura cursului</b>	<b>13</b>
3.1 Convenții și notații .....	13
3.2 Structura materialului .....	15
<b>SECȚIUNEA II. PRELUCRAREA NUMERICĂ A SEMNALELOR ÎN DOMENIUL TIMP</b>	<b>16</b>
<b>4 Semnale discrete în raport cu timpul</b>	<b>17</b>
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
<b>5 Conversia semnalelor</b>	<b>33</b>
5.1 Introducere.....	33
5.2 Conversia analog-numerică.....	34
5.3 Operația de eșantionare .....	35
5.4 Teorema eșantionării în domeniul timp.....	37
5.5 Parametrii semnalelor numerice .....	41
5.6 Cuantizarea și codificarea binară a semnalelor .....	42
5.7 Conversia numeric-analogică .....	52



<b>6</b>	<b>Sisteme numerice.....</b>	<b>53</b>
6.1	Definire.....	53
6.2	Reprezentare.....	55
6.3	Clasificarea sistemelor numerice.....	56
<b>7</b>	<b>Convoluția semnalelor numerice</b>	<b>61</b>
7.1	Definirea convoluției.....	61
7.2	Calculul convoluției.....	62
7.3	Interpretarea practică a convoluției.....	63
7.4	Convoluția liniară și convoluția circulară.....	64
7.5	Răspunsul impuls al sistemelor numerice.....	65
7.6	Proprietățile convoluției.....	66
<b>8</b>	<b>Corelația semnalelor numerice</b>	<b>67</b>
8.1	Corelația semnalelor de energie.....	67
8.2	Corelația semnalelor de putere.....	69
8.3	Proprietățile corelației.....	70
<b>9</b>	<b>Analiza sistemelor numerice în domeniul timp</b>	<b>74</b>
9.1	Interconectarea sistemelor numerice.....	74
9.2	Cauzalitatea sistemelor numerice.....	76
9.3	Stabilitatea sistemelor numerice.....	77
9.4	Sisteme numerice FIR și IIR.....	78
9.5	Sisteme numerice descrise prin ecuații diferențiale.....	79
9.6	Sisteme caracterizate prin ecuații diferențiale cu coeficienți constanți.....	82
<b>SECȚIUNEA III. PRELUCRAREA NUMERICĂ A SEMNALELOR ÎN DOMENIUL FRECVENȚĂ</b>		<b>86</b>
<b>10</b>	<b>Transformata Z</b>	<b>87</b>
10.1	Definirea Transformatei Z.....	87
10.2	ROC și clasificarea semnalelor numerice.....	88
10.3	Proprietățile Transformatei Z.....	92
10.4	Transformata Z rațională. Poli și zerouri.....	97
10.5	Comportarea în domeniul timp a semnalelor numerice în funcție de configurația poli-zerouri.....	100
10.6	Funcția de transfer a sistemelor numerice.....	107
10.7	Comportarea sistemelor numerice LTI în domeniul frecvență.....	109
<b>11</b>	<b>Transformata Fourier</b>	<b>120</b>
11.1	Introducere.....	120
11.2	Definirea Transformatei Fourier.....	121

11.3	Teorema eşantionării în domeniul frecvență .....	124
11.4	Proprietățile Transformatei Fourier .....	127
<b>12</b>	<b>Analiza sistemelor numerice LTI în domeniul frecvență</b> .....	<b>134</b>
12.1	Răspunsul sistemelor la semnale exponențiale complexe .....	134
12.2	Caracteristicile filtrelor ideale .....	135
12.3	Filtre trece-jos.....	140
12.4	Filtre trece-sus .....	145
12.5	Filtre trece-bandă.....	146
12.6	Filtre oprește-bandă.....	151
12.7	Rezonatoare digitale .....	152
12.8	Filtre crestătură.....	154
12.9	Oscilatoare sinusoidale.....	156
	<b>Bibliografie selectivă</b> .....	<b>159</b>



**Lucrare executată sub comanda nr. 120  
la Centrul de Multiplicare al  
Universității POLITEHNICA Timișoara  
2003**