

PRZEDMOWA 11

1. SYGNAŁY I SYSTEMY DYSKRETNE 19

- 1.1. Sygnały dyskretne i ich notacja 20
- 1.2. Wartość chwilowa, wartość bezwzględna i chwilowa moc sygnału 26
- 1.3. Symbole operacji w przetwarzaniu sygnałów 28
- 1.4. Wprowadzenie do dyskretnych systemów liniowych niezmiennych w czasie 30
- 1.5. Liniowe systemy dyskretne 30
 - 1.5.1. Przykład systemu liniowego 31
 - 1.5.2. Przykład systemu nieliniowego 32
- 1.6. Systemy niezmiennie w czasie 35
 - 1.6.1. Przykład systemu niezmiennego w czasie 36
- 1.7. Właściwość przemienności liniowych systemów niezmiennych w czasie 37
- 1.8. Analiza systemów liniowych niezmiennych w czasie 37

2. PRÓBKOWANIE RÓWNOMIERNE 39

- 2.1. Aliasing: niejednoznaczność sygnału w dziedzinie częstotliwości 39
- 2.2. Próbkowanie sygnałów dolnopasmowych 45
- 2.3. Próbkowanie sygnałów pasmowych 48
- 2.4. Odwrócenie widmowe w próbkowaniu pasmowym 57

3. DYSKRETNE PRZEKSZTAŁCENIE FOURIERA 62

- 3.1. Zrozumienie równania DFT 63
 - 3.1.1. Przykład 1 DFT 66
- 3.2. Symetria DFT 75
- 3.3. Liniowość DFT 77
- 3.4. Widmo amplitudowe DFT sygnału 77
- 3.5. Oś częstotliwości DFT 79
- 3.6. Twierdzenie o przesunięciu 79
 - 3.6.1. Przykład 2 DFT 80
- 3.7. Odwrotne DFT 82
- 3.8. Przeciek DFT 83
- 3.9. Okna 91
- 3.10. Strata pochodząca od zafalowań DFT 98
- 3.11. Rozdzielczość DFT, uzupełnianie zerami i próbkowanie w dziedzinie częstotliwości 99
- 3.12. Poprawa stosunku sygnał/szum za pomocą DFT 103
 - 3.12.1. Poprawa stosunku sygnał/szum pojedynczej DFT 104
 - 3.12.2. Poprawa stosunku sygnał/szum wynikająca z uśredniania wielokrotnych DFT 107
- 3.13. DFT funkcji prostokątnych 107
 - 3.13.1. DFT funkcji prostokątnej w postaci ogólnej 108
 - 3.13.2. DFT symetrycznej funkcji prostokątnej 114
 - 3.13.3. DFT funkcji prostokątnej o samych wartościach jednostkowych 116
 - 3.13.4. Osie czasu i częstotliwości związane z funkcjami prostokątnymi 119
 - 3.13.5. Alternatywne postaci DFT funkcji prostokątnej o samych wartościach jednostkowych 121
 - 3.13.6. Odwrotna DFT funkcji prostokątnej w postaci ogólnej 121
 - 3.13.7. Odwrotna DFT symetrycznej funkcji prostokątnej 124
- 3.14. DFT pobudzenia zespolonego 126
- 3.15. DFT rzeczywistego pobudzenia kosinusoidalnego 129
- 3.16. Jednoprzędkowa DFT pobudzenia będącego rzeczywistym sygnałem kosinusoidalnym 131
- 3.17. Interpretacja DFT 133

Literatura do rozdziału 3 136

4. SZYBKIE PRZEKSZTAŁCENIE FOURIERA 137

- 4.1. Związek pomiędzy FFT i DFT 138
- 4.2. Wskazówki dotyczące zastosowania FFT w praktyce 139
 - 4.2.1. Próbkowanie wystarczająco szybkie i wystarczająco długie 139
 - 4.2.2. Przetwarzanie wstępne danych czasowych przed wyznaczeniem FFT 140
 - 4.2.3. Poprawianie wyników FFT 141
 - 4.2.4. Interpretacja wyników FFT 142
 - 4.2.5. Oprogramowanie implementujące FFT 143
 - 4.2.6. Wyprowadzenie algorytmu FFT o podstawie 2 144

4.3. Odwrócenie bitowe indeksu danych we/wy FFT 151

4.4. Struktury motylkowe FFT o podstawie 2 152

Literatura do rozdziału 4 160

5. FILTRY O SKOŃCZONEJ ODPOWIEDZI IMPULSOWEJ 162

5.1. Wprowadzenie do filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej – filtry SOI 163

5.2. Operacja splotu w filtrach SOI 168

5.3. Projektowanie dolnoprzepustowych filtrów SOI 178

5.3.1. Projektowanie metodą okna 178

5.3.2. Zastosowanie funkcji okien przy projektowaniu filtrów SOI 186

5.4. Projektowanie środkowoprzepustowych filtrów SOI 192

5.5. Projektowanie górnoprzepustowych filtrów SOI 195

5.6. Metoda Remeza projektowania filtrów SOI 196

5.7. Półpasemowe filtry SOI 198

5.8. Charakterystyka fazowa filtrów SOI 200

5.9. Ogólny opis splotu dyskretnego 205

5.10. Splot dyskretny w dziedzinie czasu 206

5.10.1. Twierdzenie o splocie 210

5.10.2. Zastosowanie twierdzenia o splocie 213

Literatura do rozdziału 5 216

6. FILTRY O NIESKOŃCZONEJ ODPOWIEDZI IMPULSOWEJ 218

6.1. Wprowadzenie do filtrów o nieskończonej odpowiedzi impulsowej 219

6.2. Przekształcenie Laplace’a 222

6.2.1. Bieguny i zera na płaszczyźnie s a stabilność 229

6.3. Przekształcenie Z 236

6.3.1. Bieguny i zera na płaszczyźnie z a stabilność 238

6.3.2. Zastosowanie przekształcenia Z do analizy filtrów NOI 240

6.3.3. Alternatywne struktury filtrów NOI 248

6.4. Projektowanie filtrów NOI metodą niezmienniczości odpowiedzi impulsowej 250

6.4.1. Przykład projektowania metodą niezmienniczości odpowiedzi impulsowej – Metoda 1 257

6.4.2. Przykład projektowania metodą niezmienniczości odpowiedzi impulsowej – Metoda 2 260

6.5. Projektowanie filtrów NOI metodą transformacji biliniowej 267

6.5.1. Przykład projektowania filtru z użyciem transformacji biliniowej 273

6.6. Zoptymalizowana metoda projektowania filtrów NOI 277

6.7. Pułapki czyhające przy budowie cyfrowych filtrów NOI 279

6.8. Poprawianie filtrów NOI – struktury kaskadowe 281

6.8.1. Właściwości filtrów kaskadowych i równoległych 281

6.8.2. Kaskadowe łączenie filtrów NOI 283

6.9. Krótkie porównanie filtrów NOI i SOI 286

Literatura do rozdziału 6 287

7. SPECJALIZOWANE DOLNOPRZEPUSTOWE FILTRY SOI 289

7.1. Filtry z próbkowaniem w dziedzinie częstotliwości: zapomniana sztuka 290

7.1.1. Kaskadowe połączenie filtru grzebieniowego i zespolonego rezonatora cyfrowego 292

7.1.2. Wielosekcyjne zespolone filtry FSF 297

7.1.3. Zapewnienie stabilności filtrów FSF 301

7.1.4. Wielosekcyjne filtry FSF o współczynnikach rzeczywistych 304

7.1.5. Wielosekcyjne filtry FSF o współczynnikach rzeczywistych i liniowej fazie 307

7.1.6. Gdzie byliśmy i dokąd zmierzamy z filtrami FSF 309

7.1.7. Efektywny filtr FSF o rzeczywistych współczynnikach 310

7.1.8. Modelowanie filtrów FSF 312

7.1.9. Poprawianie charakterystyk z użyciem współczynników w paśmie przejściowym 313

7.1.10. Alternatywne struktury filtrów FSF 315

7.1.11. Zalety filtrów FSF 316

7.1.12. Przykład filtru FSF Typu IV 318

7.1.13. Kiedy stosować filtry FSF 319

7.1.14. Projektowanie filtrów FSF 322

7.1.15. Podsumowanie filtrów FSF 325

7.2. Interpolowane dolnoprzepustowe filtry SOI 325

7.2.1. Wybór optymalnego współczynnika rozszerzenia M 330

7.2.2. Oszacowanie liczby ogniów filtru SOI 331

7.2.3. Modelowanie charakterystyki filtru ISOI 332

7.2.4. Problemy implementacyjne filtrów ISOI 335

7.2.5. Przykład projektowania filtru ISOI 336

Literatura do rozdziału 7 338

8. SYGNAŁY KWADRATUROWE 340

8.1. Dlaczego sygnały kwadraturowe? 341

8.2. Notacja liczb zespolonych 341

8.3. Reprezentacja sygnałów rzeczywistych z użyciem zespolonych wskazów 347

8.4. Garść przemyśleń na temat ujemnych częstotliwości 351

8.5. Sygnały kwadraturowe w dziedzinie częstotliwości 352

8.6. Pasmowe sygnały kwadraturowe w dziedzinie częstotliwości 355

8.7. Zespolona konwersja częstotliwości w dół 357

8.8. Przykład zespolonej konwersji częstotliwości w dół 359

8.9. Alternatywna metoda konwersji częstotliwości w dół 363

Literatura do rozdziału 8 365

9. DYSKRETNA TRANSFORMACJA HILBERTA 366

9.1. Definicja transformacji Hilberta 367

9.2. Dlaczego zajmujemy się transformacją Hilberta? 369

9.3. Odpowiedź impulsowa transformatora Hilberta 374

9.4. Projektowanie dyskretnego transformatora Hilberta 376

9.4.1. Transformacja Hilberta w dziedzinie czasu: implementacja filtru SOI 376

9.4.2. Transformacja Hilberta w dziedzinie częstotliwości 380

9.5. Generacja sygnału analitycznego w dziedzinie czasu 382

9.6. Porównanie analitycznych metod generacji sygnału 384

Literatura do rozdziału 9 385

10. KONWERSJA CZĘSTOTLIWOŚCI PRÓBKOWANIA 386

10.1. Decymacja 387

10.2. Interpolacja 392

10.3. Połączenie decymacji i interpolacji 395

10.4. Filtry polifazowe 396

10.5. Kaskadowe integracyjne filtry grzebieniowe 402

10.5.1. Rekursywny filtr sumujący 403

10.5.2. Struktury filtrów CIC 404

10.5.3. Poprawa tłumienia filtrów CIC 409

10.5.4. Aspekty implementacyjne filtrów CIC 410

10.5.5. Kompensacyjne filtry SOI 412

Literatura do rozdziału 10 414

11. UŚREDNIANIE SYGNAŁÓW 416

11.1. Uśrednianie koherentne 417

11.2. Uśrednianie niekoherentne 423

11.3. Uśrednianie wielokrotnych FFT 426

11.4. Aspekty filtracyjne uśredniania w dziedzinie czasu 435

11.5. Uśrednianie wykładnicze 436

Literatura do rozdziału 11 442

12. REPREZENTACJE DANYCH CYFROWYCH I ICH SKUTKI 443

12.1. Stałoprzecinkowe reprezentacje dwójkowe 443

12.1.1. Liczby ósemkowe 444

12.1.2. Liczby szesnastkowe 445

12.1.3. Ułamkowe liczby dwójkowe 446

12.1.4. Reprezentacja dwójkowa znak-moduł 447

12.1.5. Reprezentacja uzupełnienia do dwóch 447

12.1.6. Reprezentacja z przesunięciem dwójkowym 449

12.2. Precyzja i zakres dynamiki liczb dwójkowych 450

12.3. Skutki skończonej długości stałoprzecinkowego słowa dwójkowego 450

12.3.1. Błędy kwantyzacji w przetwornikach A/C 451

12.3.2. Przepelnienie danych	458
12.3.3. Obcięcie	462
12.3.4. Zaokrąglanie danych	465
12.4. Zmiennoprzecinkowe reprezentacje dwójkowe	466
12.4.1. Zakres dynamiki zmiennoprzecinkowej	470
12.5. Blokowa zmiennoprzecinkowa reprezentacja dwójkowa	472
Literatura do rozdziału 12	472
13. SZTUCZKI CYFROWEGO PRZETWARZANIA SYGNAŁÓW	474
13.1. Przesunięcie częstotliwości bez mnożenia	474
13.1.1. Przesunięcie częstotliwości o $f_s/2$	474
13.1.2. Przesunięcie częstotliwości o $f_s/4$	476
13.1.3. Filtracja i decymacja po przesunięciu w dół o $f_s/4$	479
13.2. Szybka aproksymacja modułu wektora	482
13.3. Okienkowanie w dziedzinie częstotliwości	486
13.4. Szybkie mnożenie liczb zespolonych	489
13.5. Obliczanie dwóch N-punktowych rzeczywistych FFT	490
13.5.1. Realizacja dwóch N-punktowych FFT	490
13.5.2. Realizacja 2N-punktowej rzeczywistej FFT	497
13.6. Obliczanie odwrotnej FFT za pomocą prostej FFT	501
13.6.1. Pierwsza metoda obliczania odwrotnej FFT	501
13.6.2. Druga metoda obliczania odwrotnej FFT	503
13.7. Uproszczona struktura filtru SOI	504
13.8. Redukcja szumu kwantyzacji przetwornika A/C	504
13.8.1. Nadpróbkowanie	506
13.8.2. Dithering	508
13.9. Techniki testowania przetworników A/C	511
13.9.1. Wyznaczanie szumu kwantyzacji za pomocą FFT	511
13.9.2. Detekcja zagubionych kodów	514
13.10. Szybka filtracja SOI z użyciem FFT	515
13.11. Generacja danych losowych o rozkładzie normalnym	517
13.12. Filtracja zerofazowa	519
13.13. Poprawianie charakterystyk filtrów SOI	520
13.14. Interpolacja sygnału pasmowego	522
13.15. Algorytm lokalizacji wartości szczytowych w widmie	524
13.16. Obliczanie współczynników obrotu FFT	526
13.17. Detekcja pojedynczego tonu	529
13.17.1. Algorytm Goertzela	530
13.17.2. Przykład użycia algorytmu Goertzela	532
13.17.3. Zalety algorytmu Goertzela	532
13.18. Przesuwne DFT	533
13.18.1. Algorytm przesuwne DFT	534
13.18.2. Stabilność SDFT	538
13.18.3. Redukcja przecieku SDFT	539
13.18.4. Mało znana właściwość SDFT	540
13.19. Zoom FFT	541
13.20. Praktyczny analizator widma	545
13.21. Efektywna aproksymacja arctangent	548
13.22. Algorytmy demodulacji częstotliwości	550
13.23. Usuwanie składowej stałej	552
13.23.1. Usuwanie składowej stałej z bloku danych	553
13.23.2. Usuwanie składowej stałej w systemach czasu rzeczywistego	553
13.23.3. Usuwanie składowej stałej z kwantyzacją w czasie rzeczywistym	555
13.24. Poprawa jakości tradycyjnych filtrów CIC	556
13.24.1. Nierekursywne filtry CIC	557
13.24.2. Nierekursywne filtry CIC dla czynnika R będącego liczbą pierwszą	560
13.25. Wygładzanie zakłóceń impulsowych	561
13.26. Sprawne obliczanie wielomianu	563

13.27. Projektowanie filtrów SOI bardzo wysokich rzędów	564
13.28. Interpolacja w dziedzinie czasu z użyciem FFT	567
13.28.1. Obliczanie interpolowanych sygnałów rzeczywistych	568
13.28.2. Obliczanie interpolowanych sygnałów analitycznych	570
13.29. Translacja częstotliwości poprzez decymację	571
13.30. Automatyczna kontrola wzmocnienia	571
13.31. Przybliżona detekcja obwiedni	574
13.32. Oscylator kwadraturowy	575
13.33. Uśrednianie dwumodowe	578
Literatura do rozdziału 13	579
A. ARYTMETYKA LICZB ZESPOLONYCH	583
A.1. Reprezentacja graczna liczb rzeczywistych i zespolonych	583
A.2. Arytmetyczna reprezentacja liczb zespolonych	584
A.3. Operacje arytmetyczne na liczbach zespolonych	586
A.3.1. Dodawanie i odejmowanie liczb zespolonych	586
A.3.2. Mnożenie liczb zespolonych	587
A.3.3. Sprzężenie liczby zespolonej	587
A.3.4. Dzielenie liczb zespolonych	588
A.3.5. Odwrotność liczby zespolonej	588
A.3.6. Potęgowanie liczb zespolonych	589
A.3.7. Pierwiastki liczby zespolonej	589
A.3.8. Logarytmy naturalne liczby zespolonej	590
A.3.9. Logarytm o podstawie 10 liczby zespolonej	590
A.3.10. Logarytm o podstawie 10 liczby zespolonej, wyrażony za pomocą logarytmu naturalnego	590
A.4. Pewne praktyczne implikacje używania liczb zespolonych	591
Literatura do Dodatku A	592
B. JAWNA POSTAĆ SZEREGU GEOMETRYCZNEGO	593
C. ODWRACANIE CZASU I DFT	595
D. WARTOŚĆ ŚREDNIA, WARIANCJA I ODCHYLENIE STANDARDOWE	598
D.1. Miary statystyczne	598
D.2. Odchylenie standardowe lub wartość skuteczna, ciągłej sinusoidy	601
D.3. Wartość średnia i wariancja sygnałów przypadkowych	602
D.4. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu normalnego	605
Literatura do Dodatku D	606
E. DECYBELE (dB i dBm)	607
E.1. Zastosowanie miary logarytmicznej do określania względnej mocy sygnału	607
E.2. Pewne użyteczne liczby decybelowe	612
E.3. Moc bezwzględna wyrażona decybelami	612
F. TERMINOLOGIA FILTRÓW CYFROWYCH	614
Literatura do Dodatku F	624
G. ROZWAŻANIA NA TEMAT FILTRÓW PRÓBKUJĄCYCH W DZIEDZINIE CZĘSTOTLIWOŚCI	624
G.1. Odpowiedź impulsowa filtru grzebieniowego	625
G.2. Odpowiedź impulsowa pojedynczego zespolonego filtru FSF	626
G.3. Zależności fazowe w wielosekcyjnych filtrach FSF	627
G.4. Funkcja transmitancji wielosekcyjnego filtru FSF	628
G.5. Funkcja transmitancji rzeczywistego filtru FSF	629
G.6. Charakterystyka częstotliwościowa filtru FSF Typu-IV	631
H. TABLICE WSPOMAGAJĄCE PROJEKTOWANIE FILTRÓW PRÓBKUJĄCYCH W DZIEDZINIE CZĘSTOTLIWOŚCI	633
Indeks	643