

8895

Contenido

Prólogo

xiii

1	Introducción	1
1.1	Señales, sistemas y procesado de la señal	2
1.1.1	Elementos básicos de un sistema de procesado digital de señales	4
1.1.2	Ventajas del procesado digital de señales frente al analógico	5
1.2	Clasificación de las señales	6
1.2.1	Señales multicanal y multidimensionales	6
1.2.2	Señales en tiempo continuo frente a señales en tiempo discreto	9
1.2.3	Señales continuas frente a señales discretas	10
1.2.4	Señales deterministas frente a señales aleatorias	11
1.3	El concepto de frecuencia en señales en tiempo continuo y en tiempo discreto	12
1.3.1	Señales sinusoidales en tiempo continuo	13
1.3.2	Señales sinusoidales en tiempo discreto	15
1.3.3	Exponenciales complejas relacionadas armónicamente	18
1.4	Conversión analógico-digital y digital-analógica	21
1.4.1	Muestreo de señales analógicas	22
1.4.2	Teorema del muestreo	28
1.4.3	Cuantificación de señales de amplitud continua	32
1.4.4	Cuantificación de señales sinusoidales	35
1.4.5	Codificación de muestras cuantificadas	37
1.4.6	Conversión digital a analógica	37
1.4.7	El análisis de señales y sistemas digitales en comparación con el de señales y sistemas en tiempo discreto	38
1.5	Resumen y referencias	38
	Problemas	39
2	Señales y sistemas en tiempo discreto	43
2.1	Señales en tiempo discreto	43
2.1.1	Algunas señales elementales en tiempo discreto	45
2.1.2	Clasificación de las señales en tiempo discreto	47
2.1.3	Manipulaciones simples de señales en tiempo discreto	52
2.2	Sistemas en tiempo discreto	55
2.2.1	Descripción entrada-salida de sistemas	56

2.2.2	Representación de sistemas discretos mediante diagramas de bloques	59
2.2.3	Clasificación de los sistemas discretos	62
2.2.4	Interconexión de sistemas discretos	70
2.3	Análisis de sistemas discretos lineales e invariantes en el tiempo	71
2.3.1	Técnicas para el análisis de sistemas lineales	72
2.3.2	Descomposición de una señal discreta en impulsos	73
2.3.3	Respuesta de un sistema LTI a entradas arbitrarias: la convolución	75
2.3.4	Propiedades de la convolución y la interconexión de sistemas LTI	82
2.3.5	Sistemas lineales, invariantes en el tiempo y causales	85
2.3.6	Estabilidad de sistemas lineales e invariantes en el tiempo	87
2.3.7	Sistemas con respuesta impulsional de duración finita e infinita	90
2.4	Sistemas discretos descritos mediante ecuaciones en diferencias	91
2.4.1	Sistemas discretos recursivos y no recursivos	92
2.4.2	Sistemas lineales e invariantes en el tiempo caracterizados por ecuaciones en diferencias con coeficientes constantes	95
2.4.3	Solución de ecuaciones en diferencias de coeficientes constantes	100
2.4.4	La respuesta impulsional de un sistema recursivo lineal e invariante en el tiempo	108
2.5	Implementación de sistemas discretos	111
2.5.1	Estructuras para la realización de sistemas lineales invariantes en el tiempo	111
2.5.2	Realización de sistemas FIR recursivos y no recursivos	116
2.6	Correlación de señales discretas	118
2.6.1	Autocorrelación y correlación cruzada	120
2.6.2	Propiedades de las secuencias de autocorrelación y correlación cruzada	122
2.6.3	Correlación de secuencias periódicas	125
2.6.4	Cálculo de la correlación	130
2.6.5	Secuencias de correlación de entrada-salida	131
2.7	Resumen y referencias	133
	Problemas	135
3	La transformada z y sus aplicaciones al análisis de sistemas LTI	153
3.1	La transformada z	153
3.1.1	La transformada z directa	154
3.1.2	La transformada z inversa	162
3.2	Propiedades de la transformada z	163
3.3	Transformadas z racionales	176
3.3.1	Polos y ceros	176
3.3.2	Localización de los polos y comportamiento en el dominio del tiempo de señales causales	181
3.3.3	La función de transferencia de un sistema lineal invariante en el tiempo	184
3.4	Inversión de la transformada z	187
3.4.1	La transformada z inversa por integración de contorno	187

3.4.2	La transformada z inversa mediante expansión en serie de potencias	189
3.4.3	La transformada z inversa mediante expansión en fracciones simples	191
3.4.4	Descomposición de transformadas z racionales	199
3.5	La transformada z unilateral	200
3.5.1	Definición y propiedades	201
3.5.2	Solución de ecuaciones en diferencias	205
3.6	Análisis en el dominio z de sistemas lineales e invariantes en el tiempo	206
3.6.1	Respuesta de sistemas con función de transferencia racional	207
3.6.2	Respuesta de sistemas de polos y ceros con condiciones iniciales no nulas	208
3.6.3	Respuesta transitoria y en régimen permanente	210
3.6.4	Causalidad y estabilidad	212
3.6.5	Cancelaciones polo-cero	213
3.6.6	Polos de orden múltiple y estabilidad	215
3.6.7	El test de estabilidad de Schumlaur-Cohn	216
3.6.8	Estabilidad de sistemas de segundo orden	219
3.7	Resumen y referencias	223
	Problemas	224
4	Análisis frecuencial de señales y sistemas	235
4.1	Análisis frecuencial de señales en tiempo continuo	235
4.1.1	Serie de Fourier para señales periódicas en tiempo continuo	237
4.1.2	Densidad espectral de potencia de señales periódicas	240
4.1.3	La transformada de Fourier para señales aperiódicas en tiempo continuo	245
4.1.4	Densidad espectral de energía de señales aperiódicas	248
4.2	Análisis frecuencial de señales en tiempo discreto	251
4.2.1	Serie de Fourier de señales periódicas en tiempo discreto	252
4.2.2	Densidad espectral de potencia de señales periódicas	255
4.2.3	Transformada de Fourier de señales aperiódicas en tiempo discreto	258
4.2.4	Convergencia de la transformada de Fourier	261
4.2.5	Densidad espectral de energía de señales aperiódicas	263
4.2.6	Relación de la transformada de Fourier con la transformada z	269
4.2.7	El cepstro	270
4.2.8	La transformada de Fourier de señales con polos en la circunferencia unidad	271
4.2.9	El teorema del muestreo revisado	273
4.2.10	Clasificación de señales en el dominio de la frecuencia: El concepto de ancho de banda	283
4.2.11	Los rangos de frecuencia de algunas señales naturales	286
4.2.12	Dualidades físicas y matemáticas	286
4.3	Propiedades de la transformada de Fourier de señales en tiempo discreto	290
4.3.1	Propiedades de simetría de la transformada de Fourier	291
4.3.2	Teoremas y propiedades de la transformada de Fourier	299
4.4	Características en el dominio frecuencial	308

4.4.1	Respuesta a señales exponenciales complejas y sinusoidales: la función de respuesta en frecuencia	309
4.4.2	Respuesta transitoria y en régimen permanente a entradas sinusoidales	318
4.4.3	Respuesta en régimen permanente a señales de entrada periódicas	319
4.4.4	Respuesta a señales de entrada aperiódicas	320
4.4.5	Relaciones entre la función de transferencia y la respuesta en frecuencia	322
4.4.6	Cálculo de la respuesta en frecuencia	325
4.4.7	Espectros y funciones de correlación de entrada-salida	330
4.4.8	Funciones de correlación y espectros de potencia de señales de entrada aleatorias	331
4.5	Sistemas lineales e invariantes en el tiempo como filtros selectivos en frecuencia	333
4.5.1	Características de los filtros ideales	334
4.5.2	Filtros paso alto, paso bajo y paso banda	337
4.5.3	Resonadores digitales	344
4.5.4	Filtros ranura	347
4.5.5	Filtros peine	349
4.5.6	Filtros paso todo	353
4.5.7	Osciladores digitales sinusoidales	356
4.6	Deconvolución y sistemas inversos	358
4.6.1	Invertibilidad de sistemas lineales invariantes en el tiempo	359
4.6.2	Sistemas de fase mínima, fase máxima y fase mixta	362
4.6.3	Identificación de sistemas y deconvolución	367
4.6.4	Deconvolución homomórfica	369
4.7	Resumen y referencias	370
	Problemas	372
5	La transformada de Fourier discreta: sus propiedades y aplicaciones	401
5.1	Muestreo en el dominio de la frecuencia: la transformada de Fourier discreta	401
5.1.1	Muestreo en el dominio de la frecuencia y reconstrucción de señales en tiempo discreto	401
5.1.2	La transformada de Fourier discreta (DFT)	406
5.1.3	La DFT como una transformación lineal	410
5.1.4	Relación de la DFT con otras transformadas	414
5.2	Propiedades de la DFT	416
5.2.1	Propiedades de periodicidad, linealidad y simetría	417
5.2.2	Multiplicación de dos DFTs y convolución circular	422
5.2.3	Propiedades adicionales de la DFT	428
5.3	Métodos de filtrado lineal basados en la DFT	432
5.3.1	Uso de la DFT en el filtrado lineal	433
5.3.2	Filtrado de secuencias de larga duración	437
5.4	Análisis frecuencial de señales usando la DFT	441
5.5	Resumen y referencias	447

Problemas	447
6 Cálculo eficiente de la DFT: algoritmos para la transformada rápida de Fourier	457
6.1 Cálculo eficiente de la DFT: algoritmos FFT	457
6.1.1 Cálculo directo de la DFT	458
6.1.2 Metodología de “divide y vencerás” para el cálculo de la DFT	459
6.1.3 Algoritmos para la FFT base 2	465
6.1.4 Algoritmos para la FFT base 4	473
6.1.5 Algoritmos para la FFT de base partida	478
6.1.6 Implementación de algoritmos para la FFT	482
6.2 Aplicaciones de los algoritmos para la FFT	484
6.2.1 Cálculo eficiente de la DFT de dos secuencias reales	484
6.2.2 Cálculo eficiente de la DFT de una secuencia real de $2N$ puntos	485
6.2.3 Utilización de los algoritmos para la FFT en el filtrado lineal y la correlación	486
6.3 Un método para el cálculo de la DFT mediante filtrado lineal	487
6.3.1 El algoritmo de Goertzel	488
6.3.2 Algoritmo de la transformada z chirp	490
6.4 Efectos de la cuantificación en el cálculo de la DFT	495
6.4.1 Errores de cuantificación en el cálculo directo de la DFT	495
6.4.2 Errores de cuantificación en los algoritmos para la FFT	497
6.5 Resumen y referencias	501
Problemas	502
7 Implementación de sistemas en tiempo discreto	509
7.1 Estructuras para la realización de sistemas en tiempo discreto	509
7.2 Estructuras para sistemas FIR	511
7.2.1 Estructuras en forma directa	512
7.2.2 Estructuras en forma de cascada	513
7.2.3 Estructuras de muestreo en frecuencia [†]	515
7.2.4 Estructura en celosía	520
7.3 Estructuras para sistemas IIR	528
7.3.1 Estructuras en forma directa	528
7.3.2 Grafos y estructuras traspuestas	530
7.3.3 Estructuras en forma de cascada	536
7.3.4 Estructuras en forma paralela	537
7.3.5 Estructuras en celosía y en celosía escalonada para sistemas IIR	541
7.4 Análisis de sistemas y estructuras en el espacio de estados	547
7.4.1 Descripciones de espacio de estados para sistemas caracterizados por ecuaciones en diferencias	548
7.4.2 Solución de las ecuaciones de espacio de estados	552
7.4.3 Relaciones entre la entrada y la salida y las descripciones de espacio de estados	553
7.4.4 Análisis de espacio de estados en el dominio z	559

7.4.5	Estructuras adicionales de espacio de estados	563
7.5	Representación de números	565
7.5.1	Representación de números en punto fijo	566
7.5.2	Representación de números en punto flotante	569
7.5.3	Errores resultantes del redondeo y truncamiento	572
7.6	Cuantificación de los coeficientes del filtro	576
7.6.1	Análisis de la sensibilidad a la cuantificación de los coeficientes del filtro	577
7.6.2	Cuantificación de los coeficientes en filtros FIR	587
7.7	Efectos de redondeo en filtros digitales	590
7.7.1	Oscilaciones de ciclo límite en sistemas recursivos	591
7.7.2	Escalado para prevenir desbordamiento	596
7.7.3	Caracterización estadística de los efectos de cuantificación en realiza- ciones en punto fijo de filtros digitales	598
7.8	Resumen y referencias	606
	Problemas	608
8	Diseño de filtros digitales	623
8.1	Consideraciones generales	623
8.1.1	Causalidad y sus implicaciones	624
8.1.2	Características de filtros prácticos selectivos en frecuencia	627
8.2	Diseño de filtros FIR	629
8.2.1	Filtros FIR simétricos y antisimétricos	629
8.2.2	Diseño de filtros FIR de fase lineal usando ventanas	632
8.2.3	Diseño de filtros FIR de fase lineal mediante el método de muestreo en frecuencia	639
8.2.4	Diseño de filtros óptimos FIR de fase lineal y rizado constante	646
8.2.5	Diseño de diferenciadores FIR	660
8.2.6	Diseño de transformadores de Hilbert	665
8.2.7	Comparación de métodos de diseño para filtros FIR de fase lineal	672
8.3	Diseño de filtros IIR a partir de filtros analógicos	674
8.3.1	Diseño de filtros IIR mediante la aproximación de derivadas	676
8.3.2	Diseño de filtros IIR mediante invarianza impulsional	679
8.3.3	Diseño de filtros IIR mediante la transformación bilineal	684
8.3.4	La transformación z adaptada	689
8.3.5	Características de los filtros analógicos usados habitualmente	690
8.3.6	Algunos ejemplos de diseño de filtros digitales basados en la transfor- mación bilineal	700
8.4	Transformación de frecuencia	702
8.4.1	Transformaciones de frecuencia en el dominio analógico	703
8.4.2	Transformaciones de frecuencia en el dominio digital	707
8.5	Diseño de filtros digitales basado en el método de mínimos cuadrados	709
8.5.1	Método de aproximación de Padé	709
8.5.2	Métodos de diseño de mínimos cuadrados	713
8.5.3	Filtros inversos FIR de mínimos cuadrados (Wiener)	720

8.5.4	Diseño de filtros IIR en el dominio de la frecuencia	727
8.6	Resumen y referencias	732
	Problemas	734
9	Muestreo y reconstrucción de señales	747
9.1	Muestreo de señales paso banda	747
9.1.1	Representación de señales paso banda	747
9.1.2	Muestreo de señales paso banda	750
9.1.3	Procesado discreto de señales continuas	755
9.2	Conversión analógico-digital	757
9.2.1	Muestreo y mantenimiento	758
9.2.2	Cuantificación y codificación	758
9.2.3	Análisis de los errores de cuantificación	763
9.2.4	Convertidores A/D con sobremuestreo	765
9.3	Conversión digital-analógico	771
9.3.1	Muestreo y mantenimiento	773
9.3.2	Mantenedor de primer orden	776
9.3.3	Interpolación lineal con retardo	780
9.3.4	Convertidores D/A con sobremuestreo	783
9.4	Resumen y referencias	783
	Problemas	784
10	Procesado digital de tasa múltiple	791
10.1	Introducción	792
10.2	Diezmado por un factor D	793
10.3	Interpolación por un factor I	796
10.4	Conversión de la tasa de muestreo por un factor racional I/D	799
10.5	Diseño e implementación de filtros para conversión de la tasa de muestreo	801
10.5.1	Estructuras para filtros FIR en forma directa	801
10.5.2	Estructuras de filtros polifase	805
10.5.3	Estructuras variantes en el tiempo	808
10.6	Implementación multi-etapa de la conversión de la tasa de muestreo	815
10.7	Conversión de la tasa de muestreo de señales paso banda	818
10.7.1	Diezmado e interpolación por conversión de frecuencia	820
10.7.2	Método sin modulación para diezmado e interpolación	822
10.8	Conversión de la tasa de muestreo por un factor arbitrario	823
10.8.1	Aproximación de primer orden	824
10.8.2	Aproximación de segundo orden (interpolación lineal)	827
10.9	Aplicaciones del procesado de tasa múltiple	829
10.9.1	Diseño de desplazadores de fase	830
10.9.2	Conexión de sistemas digitales con diferentes tasas de muestreo	830
10.9.3	Implementación de filtros paso bajo de banda estrecha	832
10.9.4	Implementación de bancos de filtros digitales	833
10.9.5	Codificación subbanda de señales de voz	838
10.9.6	Filtros espejo en cuadratura	840
10.9.7	Transmultiplexadores	849

10.9.8	Conversión A/D y D/A con sobremuestreo	851
10.10	Resumen y referencias	851
	Problemas	853
11	Predicción lineal y filtros lineales óptimos	861
11.1	Representación de innovaciones de un proceso aleatorio estacionario	861
11.1.1	Espectros de potencia racionales	863
11.1.2	Relaciones entre los parámetros del filtro y la secuencia de autocorrelación	865
11.2	Predicción lineal hacia delante y hacia atrás	866
11.2.1	Predicción lineal hacia delante	866
11.2.2	Predicción lineal hacia atrás	869
11.2.3	Los coeficientes de reflexión óptimos para los predictores en celosía hacia delante y hacia atrás	872
11.2.4	Relación de un proceso AR con la predicción lineal	873
11.3	Solución de las ecuaciones normales	873
11.3.1	El algoritmo de Levinson-Durbin	873
11.3.2	El algoritmo de Schumlaunt ur	877
11.4	Propiedades de los filtros de error de predicción lineal	881
11.5	Filtros en celosía AR y celosía escalonada ARMA	885
11.5.1	Estructura en celosía AR	885
11.5.2	Procesos ARMA y filtros en celosía escalonada	886
11.6	Filtros de Wiener para predicción y filtrado	889
11.6.1	Filtro FIR de Wiener	890
11.6.2	Principio de ortogonalidad en estimación lineal de mínimos cuadrados	892
11.6.3	Filtro IIR de Wiener	893
11.6.4	Filtro de Wiener no causal	897
11.7	Resumen y referencias	898
	Problemas	900
12	Estimación espectral de potencia	905
12.1	Estimación de espectros a partir de observaciones de señales de duración finita	905
12.1.1	Cálculo de la densidad espectral de energía	906
12.1.2	Estimación de la autocorrelación y espectro de potencia de señales aleatorias; el periodograma	911
12.1.3	El uso de la DFT en la estimación espectral de potencia	915
12.2	Métodos no paramétricos para estimación espectral de potencia	916
12.2.1	El método de Bartlett: promediado de periodogramas	917
12.2.2	El método de Welch: promediado de periodogramas modificados	920
12.2.3	El método de Blackman y Tukey: suavizado del periodograma	921
12.2.4	Prestaciones de los estimadores no paramétricos de la potencia espectral	924
12.2.5	Requisitos computacionales de las estimas no paramétricas de la potencia espectral	927
12.3	Métodos paramétricos de estimación espectral de potencia	929

12.3.1	Relaciones entre la autocorrelación y los parámetros del modelo	931
12.3.2	El método de Yule-Walker para los parámetros del modelo AR	933
12.3.3	El método de Burg para los parámetros del modelo AR	934
12.3.4	Método de mínimos cuadrados sin restricciones para los parámetros del modelo AR	937
12.3.5	Métodos de estimación secuencial para los parámetros del modelo AR	938
12.3.6	Selección del orden del modelo AR	939
12.3.7	Modelo MA para estimación espectral de potencia	941
12.3.8	Modelo ARMA para estimación espectral de potencia	942
12.3.9	Algunos resultados experimentales	944
12.4	Estimación espectral de mínima varianza	950
12.5	Algoritmos de autoanálisis para estimación espectral	954
12.5.1	Método de descomposición armónica de Pisarenko	956
12.5.2	Autodescomposición de la matriz de autocorrelación para sinusoides en ruido blanco	958
12.5.3	Algoritmo MUSIC	960
12.5.4	Algoritmo ESPRIT	961
12.5.5	Criterios de selección del orden	963
12.5.6	Resultados experimentales	964
12.6	Resumen y referencias	967
	Problemas	968
A	Señales aleatorias, funciones de correlación y espectros de potencia	A1
B	Generadores de números aleatorios	B1
C	Coefficientes de transición para el diseño de filtros FIR de fase lineal	C1
D	Lista de funciones MATLAB	D1
	Referencias bibliográficas	RB1
	Índice	I1