

CONTENIDO

PRÓLOGO	xix
EL SITIO WEB ASOCIADO	xxvi
AGRADECIMIENTOS	xxx
1 INTRODUCCIÓN	1
2 SEÑALES Y SISTEMAS EN TIEMPO DISCRETO	9
2.0 Introducción	9
2.1 Señales en tiempo discreto	10
2.2 Sistemas en tiempo discreto	17
2.2.1 Sistemas sin memoria	18
2.2.2 Sistemas lineales	18
2.2.3 Sistemas invariantes con el tiempo	20
2.2.4 Causalidad	21
2.2.5 Estabilidad	22
2.3 Sistemas lineales e invariantes con el tiempo	23
2.4 Propiedades de los sistemas lineales e invariantes con el tiempo	29
2.5 Ecuaciones en diferencias lineales con coeficientes constantes	35
2.6 Representación en el dominio de la frecuencia de señales y sistemas en tiempo discreto	39
2.6.1 Autofunciones de los sistemas lineales e invariantes con el tiempo	40
2.6.2 Aplicación súbita de entradas exponenciales complejas	45
2.7 Representación de secuencias mediante transformadas de Fourier	48
2.8 Propiedades de simetría de la transformada de Fourier	54
2.9 Teoremas de la transformada de Fourier	56

2.9.1	Linealidad de la transformada de Fourier	58
2.9.2	Desplazamiento en el tiempo y en la frecuencia	58
2.9.3	Inversión temporal	59
2.9.4	Diferenciación en el dominio de la frecuencia	59
2.9.5	Teorema de Parseval	59
2.9.6	El teorema de convolución	59
2.9.7	El teorema de modulación o enventanado	60
2.10	Señales aleatorias en tiempo discreto	64
2.11	Resumen	69
	Problemas	70
3	LA TRANSFORMADA Z	99
3.0	Introducción	99
3.1	La transformada Z	99
3.2	Propiedades de la región de convergencia de la transformada Z	110
3.3	La transformada Z inversa	115
3.3.1	Método de inspección	116
3.3.2	Descomposición en fracciones simples	116
3.3.3	Desarrollo en serie de potencias	121
3.4	Propiedades de la transformada Z	123
3.4.1	Linealidad	124
3.4.2	Desplazamiento en el tiempo	125
3.4.3	Multiplicación por una secuencia exponencial	126
3.4.4	Diferenciación de $X(z)$	127
3.4.5	Conjugación de una secuencia compleja	128
3.4.6	Inversión temporal	129
3.4.7	Convolución de secuencias	129
3.4.8	Resumen de algunas propiedades de la transformada Z	131
3.5	Transformadas Z y sistemas lineales e invariantes	131
3.6	La transformada Z unilateral	135
3.7	Resumen	137
	Problemas	138

4	MUESTREO DE SEÑALES EN TIEMPO CONTINUO	152
4.0	Introducción	152
4.1	Muestreo periódico	152
4.2	Representación del muestreo en el dominio de la frecuencia	155
4.3	Reconstrucción de señales de banda limitada a partir de sus muestras	161
4.4	Procesado en tiempo discreto de señales en tiempo continuo	165
4.4.1	Procesado de señales en tiempo continuo mediante sistemas en tiempo discreto lineales e invariantes con el tiempo	166
4.4.2	Invarianza al impulso	171
4.5	Procesado en tiempo continuo de señales en tiempo discreto	173
4.6	Cambio de la frecuencia de muestreo utilizando procesado en tiempo discreto	177
4.6.1	Reducción de la frecuencia de muestreo por un factor entero	178
4.6.2	Incremento de la frecuencia de muestreo por un factor entero	180
4.6.3	Filtros de interpolación simples y prácticos	185
4.6.4	Cambio de la frecuencia de muestreo por un factor no entero	188
4.7	Tratamiento multitasa de señales	190
4.7.1	Intercambio de filtrado y compresor/expansor	192
4.7.2	Diezmado e interpolación multietapa	193
4.7.3	Descomposiciones polifásicas	194
4.7.4	Interpretación polifásica de filtros de diezmado	197
4.7.5	Implementación polifásica de filtros de interpolación	198
4.7.6	Bancos de filtros multitasa	199
4.8	Procesado digital de señales analógicas	203
4.8.1	Filtrado previo para evitar el solapamiento	203
4.8.2	Conversión A/D	206
4.8.3	Análisis de los errores de cuantificación	211
4.8.4	Conversión D/A	218
4.9	Sobremuestreo y conformación de ruido en la conversión A/D y D/A	222
4.9.1	Conversión A/D sobremuestreada con cuantificación directa	222
4.9.2	Conversión A/D sobremuestreada con conformación de ruido	227
4.9.3	Sobremuestreo y conformación de ruido en la conversión D/A	232
4.10	Resumen	233
	Problemas	235

5	ANÁLISIS EN EL DOMINIO TRANSFORMADO DE SISTEMAS LINEALES E INVARIANTES CON EL TIEMPO	271
5.0	Introducción	271
5.1	Respuesta en frecuencia de los sistemas lineales e invariantes con el tiempo	272
5.1.1	Fase de la respuesta en frecuencia y retardo de grupo	272
5.1.2	Ilustración de los efectos del retardo de grupo y de la atenuación	275
5.2	Sistemas caracterizados por ecuaciones en diferencias lineales con coeficientes constantes	280
5.2.1	Estabilidad y causalidad	281
5.2.2	Sistemas inversos	283
5.2.3	Respuesta al impulso de funciones de transferencia racionales	285
5.3	Respuesta en frecuencia de funciones de transferencia racionales	287
5.3.1	Respuesta en frecuencia de un polo o un cero simple	289
5.3.2	Ejemplos con polos y ceros múltiples	293
5.4	Relación entre el módulo y la fase	298
5.5	Sistemas paso todo	302
5.6	Sistemas de fase mínima	306
5.6.1	Fase mínima y descomposición paso todo	308
5.6.2	Compensación de la respuesta en frecuencia de sistemas de fase no mínima	310
5.6.3	Propiedades de los sistemas de fase mínima	310
5.7	Sistemas lineales con fase lineal generalizada	317
5.7.1	Sistemas con fase lineal	318
5.7.2	Fase lineal generalizada	322
5.7.3	Sistemas causales con fase lineal generalizada	324
5.7.4	Relación entre los sistemas FIR de fase lineal y los sistemas de fase mínima	333
5.8	Resumen	337
	Problemas	337
6	ESTRUCTURAS DE SISTEMAS EN TIEMPO DISCRETO	369
6.0	Introducción	369
6.1	Representación de ecuaciones en diferencias lineales con coeficientes constantes	370
6.2	Representación de ecuaciones en diferencias lineales con coeficientes constantes mediante grafos de flujo de señales	377
6.3	Estructuras básicas de sistemas IIR	382
6.3.1	Formas directas	383

6.3.2	Forma en cascada	385
6.3.3	Forma en paralelo	387
6.3.4	Realimentación en sistemas IIR	390
6.4	Formas traspuestas	391
6.5	Estructuras básicas de redes para sistemas FIR	395
6.5.1	Forma directa	395
6.5.2	Forma en cascada	395
6.5.3	Estructuras de sistemas FIR de fase lineal	396
6.6	Filtros en celosía	399
6.6.1	Filtros FIR en celosía	399
6.6.2	Estructura en celosía todo polos	406
6.6.3	Generalización de sistemas en celosía	409
6.7	Revisión de los efectos numéricos de precisión finita	409
6.7.1	Representaciones numéricas	409
6.7.2	Efectos de la cuantificación en la realización de sistemas	413
6.8	Efectos de la cuantificación de coeficientes	415
6.8.1	Efectos de la cuantificación de coeficientes en sistemas IIR	415
6.8.2	Ejemplo de la cuantificación de coeficientes en un filtro elíptico	417
6.8.3	Polos de secciones de segundo orden cuantificadas	421
6.8.4	Efectos de la cuantificación de coeficientes en sistemas FIR	422
6.8.5	Ejemplo de cuantificación de un filtro FIR óptimo	424
6.8.6	Mantenimiento de la fase lineal	426
6.9	Efectos del ruido de redondeo en filtros digitales	430
6.9.1	Análisis de estructuras IIR en forma directa	430
6.9.2	Escalado en implementaciones en coma fija de sistemas IIR	438
6.9.3	Ejemplo de análisis de una estructura IIR en cascada	442
6.9.4	Análisis de sistemas FIR en forma directa	449
6.9.5	Realizaciones en coma flotante de sistemas en tiempo discreto	451
6.10	Ciclos límite con entrada cero en realizaciones en coma fija de filtros digitales IIR	453
6.10.1	Ciclos límite debidos al truncamiento y al redondeo	453
6.10.2	Ciclos límite debidos al desbordamiento	455
6.10.3	Cómo evitar los ciclos límite	456
6.11	Resumen	457
	Problemas	458

7	TÉCNICAS DE DISEÑO DE FILTROS	484
7.0	Introducción	484
7.1	Especificaciones del filtro	485
7.2	Diseño de filtros IIR en tiempo discreto a partir de filtros en tiempo continuo	487
7.2.1	Diseño de filtros mediante invarianza al impulso	488
7.2.2	La transformación bilineal	495
7.3	Filtros en tiempo discreto de Butterworth, Chebyshev y elípticos	498
7.3.1	Ejemplos de diseño de filtros IIR	500
7.4	Transformaciones en frecuencia de filtros IIR paso bajo	516
7.5	Diseño de filtros FIR mediante enventanado	522
7.5.1	Propiedades de las ventanas comúnmente utilizadas	525
7.5.2	Incorporación de la fase lineal generalizada	528
7.5.3	El método de diseño de filtros mediante la ventana de Kaiser	531
7.6	Ejemplos de diseño de filtros FIR mediante el método de la ventana de Kaiser	534
7.6.1	Filtro paso bajo	534
7.6.2	Filtro paso alto	535
7.6.3	Diferenciadores en tiempo discreto	537
7.7	Aproximaciones óptimas de filtros FIR	543
7.7.1	Filtros paso bajo de tipo I óptimos	548
7.7.2	Filtros paso bajo de tipo II óptimos	553
7.7.3	El algoritmo de Parks–McClellan	555
7.7.4	Características de los filtros FIR óptimos	557
7.8	Ejemplos de aproximación de rizado constante de filtros FIR	558
7.8.1	Filtro paso bajo	559
7.8.2	Compensación para el filtro de retención de orden cero	562
7.8.3	Filtro paso banda	563
7.9	Comentarios sobre los filtros FIR e IIR en tiempo discreto	566
7.10	Diseño de un filtro de sobremuestreo	567
7.11	Resumen	570
	Problemas	571
8	LA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER	610
8.0	Introducción	610
8.1	Representación de secuencia periódicas: desarrollo en serie de Fourier en tiempo discreto	611
8.2	Propiedades del desarrollo en serie de Fourier en tiempo discreto	615
8.2.1	Linealidad	615

8.2.2	Desplazamiento de una secuencia	616
8.2.3	Dualidad	616
8.2.4	Propiedades de simetría	617
8.2.5	Convolución periódica	617
8.2.6	Resumen de las propiedades de la representación de secuencias periódicas mediante el desarrollo en serie de Fourier en tiempo discreto	620
8.3	La transformada de Fourier de señales periódicas	621
8.4	Muestreo de la transformada de Fourier	624
8.5	Representación de Fourier de secuencias de duración finita	628
8.6	Propiedades de la transformada discreta de Fourier	633
8.6.1	Linealidad	633
8.6.2	Desplazamiento circular de una secuencia	634
8.6.3	Dualidad	636
8.6.4	Propiedades de simetría	638
8.6.5	Convolución circular	640
8.6.6	Resumen de las propiedades de la DFT	645
8.7	Cálculo de la convolución lineal mediante la DFT	645
8.7.1	Convolución lineal de dos secuencias de longitud finita	645
8.7.2	La convolución circular como una convolución lineal con solapamiento	646
8.7.3	Realización de sistemas lineales e invariantes con el tiempo mediante la DFT	651
8.8	La transformada discreta del coseno (DCT)	657
8.8.1	Definiciones de la DCT	658
8.8.2	Definición de la DCT-1 y la DCT-2	658
8.8.3	Relación entre la DFT y la DCT-1	661
8.8.4	Relación entre la DFT y la DCT-2	662
8.8.5	Propiedad de compactación de la energía de la DCT-2	664
8.8.6	Aplicaciones de la DCT	667
8.9	Resumen	667
	Problemas	668
9	CÓMPUTO DE LA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER	699
9.0	Introducción	699
9.1	Cómputo directo de la transformada discreta de Fourier	700
9.1.1	Evaluación directa de la definición de la DFT	701
9.1.2	El algoritmo de Goertzel	702
9.1.3	Explotación de la simetría y la periodicidad	705
9.2	Algoritmos de FFT mediante diezmado en el tiempo	706
9.2.1	Generalización y programación de la FFT	712

9.2.2	Cómputo en el mismo lugar	713
9.2.3	Formas alternativas	716
9.3	Algoritmos de FFT mediante diezmado en frecuencia	718
9.3.1	Cómputo en el mismo lugar	722
9.3.2	Formas alternativas	722
9.4	Consideraciones prácticas	724
9.4.1	Indexación	724
9.4.2	Coefficientes	725
9.5	Algoritmos de FFT más generales	726
9.5.1	Algoritmos para valores compuestos de N	726
9.5.2	Algoritmos de FFT optimizados	728
9.6	Realización de la DFT mediante convolución	729
9.6.1	Presentación del algoritmo de Winograd para el cálculo de la transformada de Fourier	729
9.6.2	El algoritmo de transformada chirp	730
9.7	Efectos de la longitud finita de registros	735
9.8	Resumen	742
	Problemas	742
10	ANÁLISIS DE FOURIER DE SEÑALES MEDIANTE LA DFT	769
10.0	Introducción	769
10.1	Análisis de Fourier de señales mediante la DFT	769
10.2	Análisis de señales sinusoidales mediante la DFT	773
10.2.1	El efecto del enventanado	773
10.2.2	Propiedades de las ventanas	777
10.2.3	El efecto del muestreo del espectro	779
10.3	La transformada de Fourier dependiente del tiempo	787
10.3.1	Invertibilidad de $X[n, \lambda]$	792
10.3.2	Interpretación de $X[n, \lambda]$ como banco de filtros	792
10.3.3	El efecto de la ventana	793
10.3.4	Muestreo en el tiempo y en la frecuencia	795
10.3.5	El método solapamiento-suma de reconstrucción	798
10.3.6	Tratamiento de señales basado en la transformada de Fourier dependiente del tiempo	801
10.3.7	Interpretación de la transformada de Fourier dependiente del tiempo como banco de filtros	803
10.4	Ejemplos de análisis de Fourier de señales no estacionarias	806
10.4.1	Análisis de Fourier dependiente del tiempo de señales de voz	806
10.4.2	Análisis de Fourier dependiente del tiempo de señales radar	810

10.5	Análisis de Fourier de señales aleatorias estacionarias: el periodograma	812
10.5.1	El periodograma	813
10.5.2	Propiedades del periodograma	814
10.5.3	Promediado de periodogramas	818
10.5.4	Cálculo de periodogramas promedio mediante la DFT	820
10.5.5	Un ejemplo de análisis de periodogramas	821
10.6	Análisis espectral de señales aleatorias	825
10.6.1	Cómputo de la autocorrelación y de la estimación del espectro de potencia mediante la DFT	828
10.6.2	Estimación del espectro de potencia del ruido de cuantificación	830
10.6.3	Estimación del espectro de potencia de una señal de voz	836
10.7	Resumen	837
	Problemas	839
11	MODELADO PARAMÉTRICO DE SEÑALES	865
11.0	Introducción	865
11.1	Modelado todo polos de señales	866
11.1.1	Aproximación por mínimos cuadrados	867
11.1.2	Modelo inverso de mínimos cuadrados	867
11.1.3	Formulación de predicción lineal del modelado todo polos	869
11.2	Modelos de señales deterministas y aleatorios	870
11.2.1	Modelado todo polos de señales deterministas de energía finita	870
11.2.2	Modelado de señales aleatorias	871
11.2.3	Error cuadrático medio mínimo	872
11.2.4	Propiedad de ajuste de la autocorrelación	873
11.2.5	Determinación del parámetro de ganancia G	873
11.3	Estimación de las funciones de correlación	875
11.3.1	El método de la autocorrelación	875
11.3.2	El método de la covarianza	877
11.3.3	Comparación de métodos	878
11.4	Orden del modelo	879
11.5	Análisis espectral todo polos	881
11.5.1	Análisis todo polos de señales de voz	882
11.5.2	Posiciones de los polos	885
11.5.3	Modelado todo polos de señales sinusoidales	887
11.6	Solución de las ecuaciones normales de la autocorrelación	889
11.6.1	La recursión de Levinson–Durbin	890
11.6.2	Obtención del algoritmo de Levinson–Durbin	891
11.7	Filtros en celosía	894

11.7.1	Red en celosía de error de predicción	894
11.7.2	Red en celosía de un modelo todo polos	898
11.7.3	Cálculo directo de los parámetros k	898
11.8	Resumen	900
	Problemas	900
12	TRANSFORMADAS DISCRETAS DE HILBERT	916
12.0	Introducción	916
12.1	Suficiencia de las partes real e imaginaria de la transformada de Fourier	918
12.2	Teoremas de suficiencia para secuencias de longitud finita	923
12.3	Relaciones entre el módulo y la fase	929
12.4	Relaciones de transformada de Hilbert para secuencias complejas	930
12.4.1	Diseño de transformadores de Hilbert	933
12.4.2	Representación de señales paso banda	937
12.4.3	Muestreo paso banda	940
12.5	Resumen	942
	Problemas	943
13	ANÁLISIS CEPSTRAL Y DECONVOLUCIÓN HOMOMÓRFICA	953
13.0	Introducción	953
13.1	Definición de cepstrum	954
13.2	Definición de cepstrum complejo	955
13.3	Propiedades del logaritmo complejo	957
13.4	Expresiones alternativas para el cepstrum complejo	958
13.5	Propiedades del cepstrum complejo	959
13.5.1	Secuencias exponenciales	959
13.5.2	Secuencias de fase mínima y de fase máxima	962
13.5.3	Relación entre el cepstrum real y el cepstrum complejo	963
13.6	Cálculo del cepstrum complejo	964
13.6.1	Desenrollado de la fase	966
13.6.2	Cálculo del cepstrum complejo utilizando la derivada logarítmica	969
13.6.3	Realizaciones de fase mínima de secuencias de fase mínima	970
13.6.4	Cálculo recursivo del cepstrum complejo para secuencias de fase mínima y de fase máxima	971
13.6.5	Uso de ponderación exponencial	972
13.7	Cálculo del cepstrum complejo utilizando raíces de polinomios	973
13.8	Deconvolución utilizando el cepstrum complejo	974

13.8.1	Deconvolución homomórfica fase mínima/paso todo	975
13.8.2	Deconvolución homomórfica fase mínima/fase máxima	977
13.9	Cepstrum complejo para un modelo multicamino simple	978
13.9.1	Cómputo del cepstrum complejo mediante análisis de transformada Z	980
13.9.2	Cómputo del cepstrum utilizando la DFT	983
13.9.3	Deconvolución homomórfica del modelo multicamino	988
13.9.4	Descomposición de fase mínima	989
13.9.5	Generalizaciones	995
13.10	Aplicaciones a procesado de voz	996
13.10.1	El modelo de la voz	996
13.10.2	Ejemplo de deconvolución homomórfica de voz	999
13.10.3	Estimación de los parámetros del modelo de voz	1001
13.10.4	Aplicaciones	1003
13.11	Resumen	1005
	Problemas	1005
A	Señales aleatorias	1015
B	Filtros en tiempo continuo	1028
C	Respuestas a problemas básicos seleccionados	1033
	Bibliografía	1056
	Índice	1064