

Contenido

| | | |
|----------------|---|-----|
| Prólogo | | vii |
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Panorama general del procesamiento digital de señales | 1 |
| 2 | Señales en tiempo discreto | 9 |
| 2.1 | Definición de señales discretas | 9 |
| 2.2 | Secuencias básicas | 10 |
| 2.3 | La secuencia impulso | 13 |
| 2.4 | Señales sinusoidales continuas y discretas | 14 |
| 2.5 | Propiedades de las señales sinusoidales en tiempo discreto | 16 |
| 2.6 | Exponenciales complejas discretas | 23 |
| 2.7 | Clasificación de señales en tiempo discreto | 25 |
| 3 | Sistemas en tiempo discreto | 29 |
| 3.1 | Definición de sistemas discretos | 29 |
| 3.2 | Representación de sistemas discretos mediante diagramas a bloques. | 29 |
| 3.3 | Clasificación de sistemas discretos | 31 |
| 3.4 | Métodos de análisis de los sistemas LTI. | 37 |
| 4 | Respuesta al impulso de los sistemas LTI | 41 |
| 4.1 | La convolución como método para obtener la respuesta de un sistema LTI a una determinada señal de entrada | 41 |
| 4.2 | Propiedades de los sistemas LTI basadas en el comportamiento de su respuesta al impulso unitario | 49 |
| 4.3 | Clasificación de los sistemas LTI basada en su respuesta al impulso. | 51 |
| 5 | Las ecuaciones en diferencias para describir a los sistemas LTI | 53 |
| 5.1 | Ecuaciones en diferencias lineales de coeficientes constantes | 53 |
| 5.2 | Respuesta al impulso unitario de la ecuación en diferencias de orden cero | 54 |
| 5.3 | Respuesta al impulso unitario de la ecuación en diferencias de primer orden | 55 |
| 5.4 | Solución de ecuaciones en diferencias de coeficientes constantes | 57 |
| 6 | Respuesta en frecuencia | 69 |
| 6.1 | Representación de señales y sistemas discretos en el dominio de la frecuencia | 69 |
| 6.2 | El concepto de respuesta en frecuencia | 75 |
| 6.3 | Periodicidad de la respuesta en frecuencia | 87 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7 | Transformada de Fourier de Tiempo Discreto | 89 |
| 7.1 | Transformada de Fourier de señales y sistemas en tiempo discreto | 89 |
| 7.2 | Propiedades de la Transformada de Fourier de Tiempo Discreto | 95 |
| 7.3 | Ejemplos de aplicación de la Transformada de Fourier de Tiempo Discreto y sus propiedades | 99 |
| | | |
| 8 | Procesamiento digital de señales continuas | 107 |
| 8.1 | Filtro anti-aliasing | 108 |
| 8.2 | Muestreo y retención (sample and hold) | 114 |
| 8.3 | Convertidor Analógico-Digital | 115 |
| 8.3.1 | Breve análisis de errores de cuantificación | 118 |
| 8.4 | Procesamiento digital de señales | 119 |
| 8.4.1 | Cambio digital de la frecuencia de muestreo | 124 |
| 8.4.1.1 | Aumento de la frecuencia de muestreo | 126 |
| 8.4.1.2 | Reducción de la frecuencia de muestreo por un entero | 130 |
| 8.4.1.3 | Cambio de la razón de muestreo por un factor no entero | 132 |
| 8.4.1.4 | Ejemplos de cambio digital de la frecuencia de muestreo | 132 |
| 8.5 | Convertidor Digital-Analógico | 137 |
| 8.6 | Filtro pasa-bajas | 139 |
| | | |
| 9 | Transformada Z | 141 |
| 9.1 | Definición de la Transformada Z | 142 |
| 9.2 | Región de Convergencia (RDC) | 144 |
| 9.2.1 | Propiedades de la Región de Convergencia de la TZ | 145 |
| 9.3 | Algunas propiedades de la Transformada Z | 153 |
| 9.4 | Solución de ecuaciones en diferencias mediante la Transformada Z | 161 |
| 9.5 | Propiedades de mapeo de la transformación $z = e^{sT}$ | 163 |
| 9.6 | Análisis de sistemas LTI en el dominio de la Transformada Z | 167 |
| 9.6.1 | Respuesta en Frecuencia | 167 |
| 9.6.2 | Retardo de Grupo (group delay) | 175 |
| 9.6.3 | Función de transferencia | 180 |
| 9.6.4 | Estabilidad y Causalidad | 180 |
| 9.6.5 | Sistemas Inversos | 184 |
| 9.6.6 | Respuesta en frecuencia de un cero complejo | 187 |
| 9.6.7 | Respuesta en frecuencia de un sistema de segundo orden | 188 |
| 9.6.8 | Esbozo de las respuestas de magnitud y fase | 190 |
| 9.7 | Pares de Transformadas Z de uso mas frecuente | 195 |
| | | |
| 10 | Filtros Digitales | 197 |
| 10.1 | Tipos de filtros digitales ideales | 197 |
| 10.1.1 | Filtro pasa-bajas ideal | 198 |
| 10.1.2 | Filtro pasa-altas ideal | 200 |
| 10.1.3 | Filtro pasa-banda ideal | 201 |
| 10.1.4 | Filtro de rechazo de banda ideal | 203 |
| 10.2 | Filtros Sencillos | 203 |
| 10.2.1 | Filtro <i>FIR</i> pasa-bajas | 204 |
| 10.2.2 | Filtro <i>FIR</i> pasa-altas | 207 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 10.2.3 | Filtro <i>IIR</i> pasa-bajas | 208 |
| 10.2.4 | Filtros peine (<i>comb filtros</i>) | 210 |
| 10.2.5 | Filtros <i>IIR</i> pasa-todo (<i>allpass</i>) | 212 |
| 10.2.6 | Sistemas de fase mínima | 219 |
| 10.2.6.1 | Compensación de la respuesta en frecuencia | 222 |
| 10.2.6.2 | Propiedades básicas de los sistemas de fase mínima | 227 |
| 10.2.7 | Filtros de fase cero | 227 |
| 10.2.8 | Filtros <i>FIR</i> de fase lineal | 228 |
| 10.2.8.1 | Condiciones para fase lineal de filtros <i>FIR</i> | 228 |
| 11 | Estructuras para sistemas discretos | 235 |
| 11.1 | Introducción | 235 |
| 11.1.1 | Estructuras canónicas y no canónicas | 237 |
| 11.2 | Estructuras básicas para filtros <i>IIR</i> | 238 |
| 11.2.1 | Forma Directa | 238 |
| 11.2.2 | Cascada (serie) | 242 |
| 11.3 | Estructuras básicas para filtros <i>FIR</i> | 244 |
| 11.3.1 | Forma Directa | 245 |
| 11.3.2 | Cascada | 246 |
| 11.4 | Efectos de la cuantificación de los coeficientes | 246 |
| 12 | Diseño de filtros digitales | 249 |
| 12.1 | Especificaciones de filtros digitales | 249 |
| 12.2 | Filtros <i>IIR</i> y <i>FIR</i> | 254 |
| 12.2.1 | Selección de filtros <i>IIR</i> y <i>FIR</i> | 254 |
| 12.2.2 | Métodos de diseño | 254 |
| 12.2.3 | Estimación del orden de filtros <i>IIR</i> | 256 |
| 12.2.4 | Estimación del orden de filtros <i>FIR</i> | 256 |
| 12.2.5 | Escalamiento de la función de transferencia digital | 259 |
| 12.3 | Diseño de filtros <i>IIR</i> | 260 |
| 12.3.1 | Método de la Transformación Bilineal para el diseño de filtros <i>IIR</i> | 261 |
| 12.3.2 | Conversión de filtros digitales pasa-bajas a otros tipos de filtros | 276 |
| 12.3.3 | Diseño de filtros digitales <i>IIR</i> usando MATLAB | 277 |
| 12.4 | Diseño de filtros <i>FIR</i> | 284 |
| 12.4.1 | Método de ventanas para el diseño de filtros <i>FIR</i> | 284 |
| 12.4.2 | Método de Ventanas Fijas | 291 |
| 12.4.3 | Método de Ventanas Ajustables: Ventana de Kaiser | 299 |
| 12.5 | Tabla auxiliar para el diseño de filtros digitales | 309 |
| 13 | Diseño de filtros analógicos | 311 |
| 13.1 | Especificaciones de filtros analógicos | 311 |
| 13.2 | Tipos de respuesta de filtros | 315 |
| 13.3 | Filtros Butterworth | 320 |
| 13.4 | Filtros Chebyshev | 326 |
| 13.5 | Filtros Bessel | 329 |
| 13.6 | Filtros de Función Elíptica (Filtros Cauer) | 330 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 13.7 | Diseño de filtros analógicos usando MATLAB | 332 |
| 14 | Transformada Discreta de Fourier (TDF) | 337 |
| 14.1 | Definición de la TDF | 337 |
| 14.2 | Propiedades de la TDF | 342 |
| 14.3 | Teorema de convolución circular | 346 |
| 14.4 | Convolución lineal a través de la convolución circular | 347 |
| 14.5 | Cálculo de la TDF usando MATLAB | 349 |
| A | Programas en MATLAB | 355 |
| B | Ejercicios | 441 |
| | Referencias bibliográficas | 445 |