



DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR



Procesamiento Adaptivo de Señales

Juan Cousseau

2001



Contenidos

1	Introducción	6
1.1	El problema de filtrado	6
1.2	Filtros adaptivos	6
1.3	Estructuras de filtros lineales	7
1.4	Algoritmos de filtrado adaptivo	8
1.4.1	Aproximación de gradiente estocástico	8
1.4.2	Estimación de Cuadrados Mínimos	9
1.5	Filtros adaptivos en forma real y compleja	11
1.6	Aplicaciones	11
1.7	Algunos ejemplos de aplicación	13
1.7.1	Un identificador recursivo básico	13
1.7.2	Identificación de sistemas: cancelamiento de eco	14
1.7.3	Predicción: codificación de voz	16
1.7.4	Filtrado inverso: ecualización lineal y con realimentación de decisión	18
1.7.5	Cancelamiento de interferencias	23
2	Procesos estacionarios, modelos y densidad espectral	26
2.1	Caracterización de procesos estocásticos	26
2.2	Matriz Correlación	27
2.2.1	Propiedades de la matriz correlación	27
2.3	Modelos estocásticos	31
2.3.1	Modelos autoregresivos (AR)	31
2.3.2	Modelos de promedios móviles (MA)	32
2.3.3	Modelos ARMA	32
2.3.4	Función correlación de un proceso AR	33
2.4	Ecuaciones de Yule-Walker	35
2.4.1	Varianza del ruido blanco	35
2.4.2	Ejemplo: AR de segundo orden	36
2.5	Densidad espectral de potencia	38
2.5.1	Propiedades	39
2.5.2	Ruido blanco a través de filtros lineales	40
2.5.3	El teorema de Wiener - Khintchine	42
2.5.4	Ruido coloreado a través de filtros lineales	43
2.5.5	El problema de modelado	43
2.6	El problema de los autovalores	45
2.6.1	Propiedades	46
2.7	Apéndice: Procesos estacionarios y variables de estado	53
2.7.1	Descripción por Variables de Estado (DVE)	53
2.7.2	DVE y una entrada estacionaria	60
3	Filtros de Wiener	66
3.1	El problema de filtrado óptimo lineal	66
3.2	El principio de ortogonalidad	67
3.2.1	Corolario del principio de ortogonalidad	69
3.3	El error medio cuadrático mínimo	70



3.4	Ecuaciones de Wiener-Hopf	70
3.4.1	Solución para filtros lineales transversales	71
3.4.2	Formulación matricial	72
3.5	Superficie de Error	72
3.5.1	Error medio cuadrático mínimo	74
3.5.2	Forma canónica de la superficie de error	74
3.5.3	Ejemplo	75
3.6	Ecuación de Ecuación	77
3.7	Beamforming: Filtrado de varianza mínima con restricciones lineales	79
4	Predicción lineal	89
4.1	Predicción lineal forward	89
4.1.1	Relación entre predicción lineal y modelado AR	90
4.1.2	Ecuaciones de Wiener-Hopf aumentadas para predicción forward	91
4.2	Predicción lineal backward	93
4.3	Algoritmo de Levinson Durbin	96
4.3.1	Algoritmo de Levinson Durbin inverso	101
4.4	Propiedades de filtros de error de predicción	102
4.5	Factorización de Cholesky	105
4.6	Predictores Lattice	108
4.7	Estimación conjunta	110
4.8	Estimación en bloques	112
5	Filtros Kalman	116
5.1	Estimación recursiva de MMS, caso escalar	117
5.2	El problema de filtrado Kalman	120
5.3	El proceso de Innovación $\alpha(n)$	122
5.3.1	Matriz correlación del proceso de innovación $R(n)$	122
5.4	Predicción usando $\alpha(n)$	125
5.4.1	Ganancia de Kalman $G(n)$	126
5.4.2	Ecuación de Riccati	126
5.5	Filtrado	129
5.5.1	Error de estimación y factor de conversión en filtrado	129
5.5.2	Matriz de correlación del error de estados en filtrado $K(n)$	129
5.6	Algoritmo completo	132
5.7	Variantes del filtro de Kalman	133
5.7.1	Caso especial: sin ruido de proceso	133
5.7.2	Algoritmo de filtrado tipo <i>covarianza</i>	134
5.7.3	Algoritmo de filtrado tipo <i>información</i>	135
5.7.4	Factorización de $K(n)$	136
6	Método de Steepest Descent	138
6.1	Algunos conceptos	138
6.2	Algoritmo Steepest Descent	139
6.3	Estabilidad del algoritmo	140
6.4	Ejemplo	144



7	Algoritmo Least Mean Square	158
7.1	Preliminares	158
7.2	Ajuste de los coeficientes	161
7.3	Ejemplos	162
7.4	Estabilidad y desempeño del algoritmo LMS	175
7.5	El algoritmo LMS normalizado	186
8	Filtrado adaptivo en el dominio frecuencia	190
8.1	Filtrado adaptivo en bloques	190
8.2	Algoritmo LMS en bloques eficiente	194
8.3	Filtrado adaptivo en el dominio frecuencia	199
8.4	Algoritmo adaptivo con preprocesamiento	200
8.5	Clasificación de algoritmos	208
9	Método de Cuadrados Mínimos	210
9.1	Problema de cuadrados mínimos	210
9.2	Ventanas de datos	212
9.3	Revisión del principio de ortogonalidad	213
9.4	Suma mínima de los errores al cuadrado	215
9.5	Filtros lineales de cuadrados mínimos	215
9.6	Matriz Correlación de promedios temporales Φ	218
9.7	Ecuaciones normales y matriz de datos	219
9.8	Propiedades de la estimación	222
9.9	Cuadrados Mínimos Recursivo (RLS)	226
9.10	El lema de inversión de matrices	229
9.11	Algoritmo RLS ponderado exponencialmente	229
9.12	Aspectos adicionales	232
9.13	Análisis de convergencia	233
9.14	Formulación por variables de estado	238
10	Seguimiento de sistemas variantes en el tiempo	242
10.1	Modelo de Markov para identificación de sistemas	242
10.2	Grado de no estacionaridad	244
10.3	Criterios de seguimiento	245
10.4	Desempeño de seguimiento del algoritmo LMS	246
10.5	Desempeño de seguimiento del algoritmo RLS	249
10.6	Comparación del desempeño de seguimiento del LMS y RLS	252
11	Efectos de precisión finita	256
11.1	Errores de cuantización	256
11.2	Algoritmo LMS	258
11.3	Algoritmo RLS	263