

Capítulo 7

CONCLUSIONES



El algoritmo presentado en [1] se muestra como una técnica efectiva para identificar las zonas de señal determinista en un espectrograma contaminado por WGN y la extensión realizada en [3] muestra el potencial que el filtrado morfológico tiene en el contexto de las señales vocales y el reconocimiento automático de voz, si bien el comportamiento obtenido del reconocedor está todavía lejos de los niveles de exactitud que se consiguen mediante otras técnicas de mejora de la señal vocal como es el tratamiento con substracción espectral. Así en este proyecto se ha llevado a cabo un proceso de estudio y adaptación del algoritmo para trabajar en el entorno de la mejora de señales vocales para el reconocimiento automático, llevando a cabo un proceso de optimización de todas las variables del algoritmo para tratar tanto las muestras de entrenamiento como las de test. El resultado es un algoritmo cuyo comportamiento pasa a estar ligeramente por encima de los resultados obtenidos con la consolidada técnica de la substracción espectral, con porcentajes de mejora medios sobre la línea base del 30%. Por ello, el proceso de optimización del algoritmo para tratar señales vocales se considera un éxito, dando como resultado un algoritmo competitivo en el mundo del pre-procesamiento de señales vocales para el reconocimiento automático.

A continuación, como paso lógico en la mejora del algoritmo de filtrado morfológico a la hora de tratar las amplitudes espectrales se estudia la forma de combinar dicho proceso con la substracción espectral, de forma que se utilicen las amplitudes espectrales mejoradas que ofrece dicha técnica. Tras evaluar distintas posibilidades determinamos una configuración que ofrece cierta mejora en el comportamiento, por lo que se concluye que la combinación de ambas técnicas es beneficiosa, si bien se considera necesaria una futura optimización de parámetros conjunta para llegar a un algoritmo realmente eficiente. Así, este primer acercamiento a la posible creación de un algoritmo que aproveche las prestaciones de ambas técnicas, nos hace concluir que las principales razones por las que la substracción espectral obtiene un mejor comportamiento en el reconocimiento automático son las mismas por las que lo obtiene el filtrado morfológico; esto es, llevando a cabo una atenuación del ruido que rodea a las zonas de señal vocal en el espectrograma.

Por último, el elevado tiempo de proceso del filtrado morfológico hace inapropiado este algoritmo para cualquier aplicación que deba trabajar en tiempo real, como cualquiera de las utilizadas en la tecnología móvil. Por ello es este proyecto se han estudiado diversas modificaciones del algoritmo con el objetivo de reducir de manera ostensible los requerimientos computacionales sin degradar el comportamiento en el reconocimiento automático de palabra. Las alternativas

propuestas se centran por una parte en eliminar el proceso iterativo de búsqueda de las condiciones finales del algoritmo y por otra en evitar el costoso proceso de la propagación proponiendo una eficaz alternativa al algoritmo de región creciente utilizado en el proceso original. Aplicando las mejoras propuestas se llega a porcentajes de reducción del coste computacional de nada menos que del 95% a la vez que se mantienen los resultados competitivos en exactitud del reconocimiento automático, por lo que obviamente se cumple el objetivo de obtener un algoritmo con las prestaciones adecuadas.

Por lo tanto este proyecto sirve como continuación del trabajo de [1] y [3] en el estudio del filtrado morfológico y de la aplicación del mismo al campo de la mejora de señales vocales para el reconocimiento automático, de forma que se desarrolla un algoritmo optimizado para trabajar en este campo que obtiene resultados realmente competitivos en porcentajes de reconocimiento. Asimismo el primer acercamiento a la combinación con la substracción espectral abre la puerta a ulteriores mejoras en la exactitud del reconocimiento, mientras que la reducción con éxito de los requerimientos computacionales hace del algoritmo un proceso mucho más adecuado para trabajar en cualquier tipo de aplicación.

LISTA DE FIGURAS

REF	DESCRIPCIÓN	PAG
1.1	Dependencia de la exactitud del reconocimiento con la SNR	2
1.2	Diferencia entre los valores instantáneos de ruido y la media estimada	4
2.1	Modelo de producción de la voz	9
2.2	Señal vocal en tiempo y zoom mostrando la propiedad estacionaria local	10
2.3	Proceso de generación del espectrograma	12
2.4	Espectrograma de banda estrecha	13
2.5	Espectrograma de banda ancha	14
2.6	Proceso ideal de extracción de señal a través del espectrograma	15
2.7	Típico sistema de reconocimiento vocal	19
2.8	Comparación entre el vector de características bajo estudio y el patrón de referencia	20
2.9	Un proceso de Markov simple. Los círculos son estados y las flechas indican transiciones entre los estados con la probabilidad asociada	22
2.10	Tres funciones gaussianas ponderadas para formar una función de densidad de probabilidad	22
2.11	Espectrograma de señal vocal inmersa en ruido WGN	29
2.12	Espacio Característico, Región de Confianza de Ruido y Grid Teórico	31
3.1	Asociación de célula a cada píxel del espectrograma	35
3.2	Visión general del sistema	36
3.3	Valores del parámetros p para células en una zona sin señal determinista (a), una zona mixta (b) y una zona de señal determinista (c)	37
3.4	Grid Teórico ($E\{F_1\}, E\{F_2\}$) computado con una varianza de ruido $\sigma^2 = 10$ y una célula de $N = 3 \times 3$ puntos. El punto ($E\{F_1\} = 10, E\{F_2\} = 9.3$) es el valor de ruido esperado. Los 15 valores del los parámetros r y p son regularmente espaciados entre, respectivamente, $[0,6]$ y $[0,1]$ (+)	38
3.5	En (a) se muestra la obtención del límite de propagación. Para $P_e = 0.01$, el área a dejar a la izquierda del límite es el 99%. Este límite es llevado al <i>Espacio Característico</i> (b), donde se determinan la Región de Confianza (zona amarilla), y el Área de Trabajo (resto del <i>Espacio Característico</i>).	40
3.6	Diagrama de flujo del algoritmo iterativo	41
3.7	Ilustración del límite decreciente al incrementar el número de iteraciones	43
3.8	Ilustración del proceso de selección de las semillas comenzando por el punto más alto del Grid. Nótese que el radio d los círculos es distinto al depender estos de los valores de p y r en el Grid	44
3.9	Comparación de la Precisión en el Reconocimiento entre el Resultado Base y la Forma Espectral obtenida tras la segmentación.	46

3.10	Ilustración de los cuantiles de una señal inmersa en ruido. Los valores por debajo de Q_i se asume que proporcionan una estimación fiable de los valores instantáneos de ruido	48
3.11	Comparación del Reconocimiento de palabra frente a SNR para la línea base sin tratar en rojo; y con el tratamiento de substracción espectral en azul (ruido de coche)	51
3.12	Comparación del Reconocimiento de palabra frente a SNR para la línea base sin tratar en rojo; y con el tratamiento de substracción espectral en azul (wgn)	52
3.13	Comparación del Reconocimiento de palabra frente a SNR para el tratamiento mediante substracción espectral en azul y el filtrado morfológico en verde (wgn)	54
4.1	Desajuste de la posición del Grid teórico respecto del Espacio Característico	59
4.2	Espacio Característico y Grid teórico de señal vocal inmersa en WGN a -5dB	60
4.3	Espacio Característico y Grid teórico (a) antes y (b) después del ajuste realizado en [3]	61
4.4	Determinación del ángulo de rotación del Grid teórico	62
4.5	Histograma del Espacio Característico de espectrograma de voz inmersa en ruido mostrando la densidad de puntos en cada localización.	63
4.6	Espectrograma de señal en condiciones limpias	64
4.7	(a) Espacio Característico y Grid teórico para espectrograma de señal de figura 4.6 inmersa en WGN a 10dB sin ajuste del Grid y (b) con ajuste. (c) y (d) muestran los resultados del proceso de segmentación para ambos casos.	64
4.8	Resultados de segmentación de espectrograma suavizado (a) y sin suavizar (b)	67
4.9	Proceso de aplicación de la máscara para recuperar las variaciones de amplitud espectrales	68
4.10	Perfil de la máscara antes (a) y después del suavizado (b)	71
4.11	Máscara sin suavizado (a) y tras el proceso de suavizado (b). Ondas temporales correspondientes tras la multiplicación (c) y (d) y zoom en discontinuidad debido a transición de ambas ondas (e) y (f).	72
4.12	Vista tridimensional de espectrograma original limpio (a), espectrograma de señal a 5dB (b) y resultado del proceso de segmentación con la inclusión de las variaciones espectrales (c)	73
4.13	Señales temporales correspondientes a los espectrogramas de la figura 4.12	74
4.14	Ondas temporales con una zona erróneamente segmentada para el esquema sin y con amplitudes espectrales en (a) y (b) respectivamente	74
4.15	Resultados de exactitud en el reconocimiento para la línea base en azul, morfológicamente procesado utilizando solo la forma espectral en verde y con las amplitudes espectrales en rojo.	75
4.16	Modificación de las áreas segmentadas al variar los parámetros del algoritmo	77
4.17	Variación del límite de propagación a lo largo de las iteraciones	78
4.18	Determinación del límite de propagación a partir de una probabilidad de error en la PDF de ruido.	80
4.19	Variación del área segmentada en función de la probabilidad de error usada en la PDF de ruido.	80
4.20	Error de reconocimiento frente a calidad del entrenamiento	83
4.21	Resultados de optimización entrenamiento / test para 10dB	87
4.22	Optimización fina de los ratios para las 7 SNR bajo estudio. Resultados de reconocimiento	92

	vocal con tres entrenamientos distintos: segmentando el 30%, 40% y 50%.	
4.23	Ratios en los que se detiene el algoritmo con $P_e=10\%$ en las muestras de entrenamiento	95
4.24	Patrones de variación de los ratios del algoritmo original ajustado con $P_e = 10\%$ para 5dB (a), 10dB (b) y 15dB (c).	96
4.25	Comparación de comportamiento del reconocedor antes y después de optimizar el parámetro P_e en entrenamiento y test	98
4.26	Comparación de resultados en exactitud del reconocimiento de palabra entre la línea base en azul, los resultados obtenidos en [3] en amarillo, utilizando substracción espectral en rojo y el filtrado morfológico optimizado en celeste.	99
5.1	Espectrograma antes (a) y después (b) del filtrado morfológico	102
5.2	Comparación de comportamientos del filtrado morfológico y la substracción espectral basada en cuantiles (QBNE) frente a la línea base	103
5.3	Configuración serie	105
5.4	Configuración paralelo	107
6.1	Dependencia del área segmentada con la relación señal a ruido	115
6.2	Función de relación entre la estimación de la SNR y el ratio a ajustar	119
6.3	Función de relación continua entre la estimación de la SNR y el ratio a ajustar	121
6.4	Comparación relativa de exactitud del reconocimiento y coste computacional del método de establecimiento de límites discreto y continuo frente al algoritmo original	122
6.5	Estado del Espacio Característico antes y después de la propagación	124
6.6	Función de relación continua entre la estimación de la SNR y el ratio a ajustar	129
6.7	Comparación relativa de exactitud del reconocimiento y coste computacional frente al algoritmo original del método que evita la propagación conservando las iteraciones y el método que elimina tanto la propagación como el proceso iterativo	131
6.8	Proceso iterativo de extracción de señal determinista. (a) primera iteración, (b) tercera iteración y (c) sexta y última iteración.	133
6.9	Espectrograma de señal vocal inmersa en ruido con el intervalo utilizado para estimar la PDF de ruido señalado en azul.	134
6.10	Comparación de los ratios definidos por el algoritmo original para 5dB (a), 10dB (b) y 15dB (c) y los ratios estimados a partir del intervalo inicial para 5dB (d), 10dB (e) y 15dB (f)	135
6.11	Comparación relativa de exactitud del reconocimiento y coste computacional frente al algoritmo original de los métodos que evitan las iteraciones mediante estimación directa del límite, con proceso de propagación y con la alternativa de 6.2.1.	140
6.12	Comparación de las prestaciones en reconocimiento automático de palabra y ahorro de coste computacional entre los distintos algoritmos propuestos	141
6.13	Comparación de resultados en exactitud de reconocimiento de palabra de los algoritmos C, E y F con la línea base y el perfil que se obtiene con la substracción espectral.	143

LISTA DE TABLAS

REF	DESCRIPCIÓN	PAG
2.1	Clasificación del ruido basada en varias propiedades	15
2.2	Clasificación de métodos de mejora de la señal vocal	27
3.1	Valores óptimos de α y β para cada relación señal a ruido	53
4.1	Optimización del nivel base de la máscara	70
4.2	Comparación entre entrenamiento limpio y multicondición	84
4.3	Ratios utilizados en los conjuntos de entrenamiento y % segmentado	85
4.4	Resultados de optimización entrenamiento / test para 10dB	86
4.5	Ratios donde se encuentra el pico de reconocimiento para cada una de las SNR	88
4.6	Resumen de resultados de optimización de ratios para cada SNR	92
4.7	Media de ratios de parada para muestras de entrenamiento	94
4.8	Media de ratios de parada para muestras de test en 3 diferentes condiciones de SNR	96
4.9	Resultados de exactitud en reconocimiento para el algoritmo ajustado con $P_e = 8\%$, 10% y 12%	97
5.1	Comparación de resultados en exactitud de reconocimiento automático de palabra entre Substracción espectral, Filtrado morfológico y la combinación de ambas técnicas según la configuración serie	106
5.2	Comparación de resultados en exactitud de reconocimiento automático de palabra entre Substracción espectral, Filtrado morfológico y la combinación de ambas técnicas según la configuración paralelo	108
5.3	Variación del comportamiento al variar los parámetros α y β de la substracción espectral	110
6.1	Resultados de la medida de SNR	117
6.2	Comparación de resultados en reconocimiento de palabra entre el algoritmo original y el modificado estimando la SNR	119
6.3	Comparación de resultados en reconocimiento de palabra entre el algoritmo original y el modificado estimando la SNR con la determinación de límites continua	121
6.4	Comparación de resultados en reconocimiento de palabra entre el algoritmo original y el modificado evitando la propagación	126
6.5	Resultados de optimización de ratios para el algoritmo sin propagación	128
6.6	Ratios a utilizar para el algoritmo sin propagación	128
6.7	Comparación de resultados en reconocimiento de palabra entre el algoritmo original y el modificado estimando la SNR con la determinación de límites continua y sin propagación	130
6.8	Comparación de las medias de los límites para 4 valores diferentes de P_e en la estimación a partir del intervalo inicial y las medias óptimas computadas por el algoritmo original	136
6.9	Comparación de resultados en reconocimiento de palabra entre el algoritmo original y los que estiman el límite directamente con y sin propagación posterior	138

REFERENCIAS

- [1] C. Hory, N. Martin and A. Chehikian, "Spectrogram Segmentation by Means of Statistical Features for Non-stationary Signal Interpretation", *IEEE Trans. on Signal Processing*, 50:2915-2925, 2002.
- [2] C. Hory and N. Martin, "Maximum Likelihood Noise Estimation for Spectrogram Segmentation Control", in *Proc. ICASSP*, Orlando, FL, Vol. 2, 2002, pp. 1581-1584.
- [3] F. Romero, W. Liu, N. Evans, J. Mason, "Morphological Filtering of Speech Spectrograms in the Context of Additive Noise". *Eurospeech 2003*.
- [4] Evans, N.W.D., Mason, J.S. and Roach, M.J., "Noise Compensation using Spectrogram Morphological Filtering", *Proc. 4th IASTED International Conference on Signal and Image Processing*, 2002, 157-161.
- [5] R. Adams and L. Bischof, "Seeded region growing," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 16, pp. 641-647, June 1994.
- [6] Boll, S. F., "Suppression of Acoustic Noise in Speech using Spectral Subtraction", *IEEE Trans. on Acoustics Speech and Signal Processing*, 27(2):13-20, 1979.
- [7] Evans, N. W. D. and Mason, J. S., "Time-Frequency Quantile-Based Noise Estimation", *Proc. EUSIPCO*, Vol. 1, 2002, 539-542
- [8] R. Martin, "Spectral Subtraction Based on Minimum Statistics," in *Proc. EUSIPCO*, 1994, pp.1182-1185.
- [9] G. Doblinger, "Computationally Efficient Speech Enhancement by Spectral Minima Tracking in Subbands", *Proc. Eurospeech*, 1995, Vol. 2, pp. 1513-1516.
- [10] L. Arslan, A. McCree, and V. Viswanathan, "New Methods for Adaptive Noise Supression," *Proc. ICASSP*, 1995, vol.1, pp. 812-815.
- [11] Stahl, V., Fischer, A. and Bippus, R., "Quantile-Based Noise Estimation for Spectral Subtraction and Wiener Filtering," *Proc. ICASSP*, Vol. 3, 2000, pp. 1875-1878.
- [12] Hirsch, H.G. and Ehrlicher, C., "Noise Estimation Techniques for Robust Speech Recognition", in *Proc. ICASSP*, 1995, vol. 1, pp. 153-156.
- [13] Ealey, D., Kelleher, H. and Pearce, D., "Harmonic Tunneling: Tracking Non-stationary Noises During Speech", *Proc. Eurospeech*, Vol. 1, 2001, pp. 437-450.
- [14] Mukul Bhatnagar, B.E. "A modified Spectral Subtraction method combined with perceptual weighting for speech enhancement"

- [15] Nicholas W.D. Evans, John S. Mason, Benoit Fauve, "Efficient Real-Time Noise Estimation without explicit Speech Non-Speech Detection: an assessment on the Aurora Corpus" DSP 985-988, 2002
- [16] D. Pearce, "Enabling New Speech Driven Services for Mobile Devices: "An overview of the ETSI standards activities for Distributed Speech Recognition Front-ends", *Applied Voice Input/Output Society Conference (AVIOS2000)*, San Jose, CA, May 2000.
- [17] Hansen, J.H.L., "Morphological Constrained Feature Enhancement with Adaptive Cepstral Compensation(MCE-ACC) for Speech Recognition in Noise and Lombard Effect", *IEEE Trans. On Speech and Audio Processing*, 2(4):598-614, 1994.
- [18] H. G. Hirsch and D. Pearce, "The Aurora Experimental Framework for the Performance Evaluation of Speech Recognition Systems Under Noisy Conditions," *ISCA ITRW ASR2000 'Automatic Speech Recognition: Challenges for the next Millenium'*, 2000.
- [19] R. G. Leonard, "A database for speaker independent digit recognition," in *Proc. ICASSP*, 1984, vol. 3, pp.42.11–14.
- [20] Magnus Andersson "An Evaluation of Noise Robustness of Comercial Speech Recognition Systems"
- [21] Young S, et al, "The HTK Book (for HTK Version 3.0)", <http://htk.eng.cam.ac.uk/docs/docs.shtml>, 2000.
- [22] ITU recommendation G.712, "Transmisi3n performance characteristics of pulse code modulation channels", Nov. 1996
- [23] ITU recommendation P.56, "Objective measurement of active speech level", Mar. 1993
- [24] ETSI standard document, "Speech Processing, Transmission and Quality aspects (STQ); Distributed speech recognition; Front-end feature extraction algorithm; Compression algorithm", ETSI ES 201 108 v1.1.1 (2000-02), Feb. 2000
- [25] L. Rabiner, B-H. Juang, *Fundamentals of Speech Recognition*, Prentice Hall, 1993.
- [26] T. Parsons, *Voice and Speech Processing*, McGraw Hill, 1987.
- [27] <http://www.ee.duke.edu/Research/Speech>

SOFTWARE INCLUIDO

En el CD-ROM que acompaña a la presente memoria se incluyen los archivos matlab correspondientes a los distintos algoritmos implementados. A continuación hacemos una relación de dichos archivos indicando a qué sección del proyecto pertenece cada uno:

- *original_optimizado.m* Este es el algoritmo optimizado como resultado de todas las medidas tomadas en la Capítulo 4 sobre el algoritmo original. Por lo tanto, incluye la alineación del Grid teórico, la inclusión de las variaciones espectrales mediante el proceso de multiplicación de máscara completo(la obtención de amplitudes sin degradar, definición de nivel base y suavizado de bordes de la máscara) y el ajuste de la P_e al 10%.
- *comb_QBNE.m* Se trata de la combinación del algoritmo original y la Substracción espectral mediante la configuración paralelo propuesta en el apartado 5.2.2.
- *SNR_estimación_discreto* Este algoritmo es el propuesto en el apartado 6.1.2.1. Es decir, el que elimina la necesidad de iterar mediante una estimación de la SNR y una definición de límites de manera discreta a partir de los datos de optimización del apartado 4.3.2
- *SNR_estimación_continuo* Es el algoritmo del apartado 6.1.2.2. El mismo que el anterior pero definiendo los límites a partir de la función continua de quinto grado.
- *scan.m* En este algoritmo es donde se implementa la alternativa a la propagación que se pone a prueba en el apartado 6.2.2
- *scan_SNR_estimación_continuo* Este es el que lleva a cabo la combinación para evitar tanto la propagación como las iteraciones que se describe en el apartado 6.2.3
- *limit_estimación_prop* Este algoritmo es uno de los pertenecientes al apartado 6.3.2. Se trata del algoritmo que estima el último límite de propagación a partir de los píxeles en las

primeras 5 columnas del espectrograma y que realiza la propagación clásica para llevar a cabo la segmentación.

- *limit_estimación_scan* Es el otro algoritmo correspondiente a la sección 6.3.2. Se trata exactamente del mismo procedimiento pero optando por la alternativa a la propagación en lugar de la propagación clásica para realizar la segmentación del área de señal vocal.

Los demás archivos contenidos en la carpeta ‘Archivos matlab’ son las distintas funciones a las que llaman estos diferentes algoritmos para llevar a cabo los diferentes pasos implicados en los procesos. Para ejecutar alguno de los algoritmos principales estas funciones deberían ser copiadas al correspondiente directorio de trabajo.

Capítulo primero: Introducción	1
Capítulo segundo: Fundamentos del procesamiento de voz y reconocimiento automático	7
- 2.1 La señal vocal	8
o 2.1.1 Producción de la voz	9
o 2.1.2 Características de la señal vocal	10
o 2.1.3 Espectrograma	11
- 2.2 Ruido	15
- 2.3 Aplicaciones y Objetivos de la mejora de voz	17
- 2.4 Reconocedores automáticos de voz	18
o 2.4.1 Fases en la creación de un reconocedor	19
o 2.4.2 Extracción de características	20
o 2.4.3 Clasificación	20
o 2.4.4 HMM	21
o 2.4.5 Dificultades en el reconocimiento	23
- 2.5 Aurora 2	24
o 2.5.1 Adición de ruido	25
o 2.5.2 Definición de conjuntos de entrenamiento y test	25
o 2.5.3 Reconocedor del paquete Aurora 2	26
- 2.6 Métodos de mejora de la señal vocal	27
o 2.6.1 Substracción Espectral	28
o 2.6.2 Filtrado morfológico	29
▪ Algoritmo propuesto por Hory [1]	30
Capítulo tercero: Filtrado morfológico y Substracción Espectral QBNE	33
- 3.1. Algoritmo de segmentación de Hory	34

○ 3.1.1 Análisis estadístico del espectrograma	34
○ 3.1.2 Modelo estadístico teórico	36
○ 3.1.3 Estimación de la PDF de ruido WGN	39
▪ 3.1.3.1 Estimación de la potencia de ruido	39
▪ 3.1.3.2 Definición del Área de trabajo y la Región de ruido	39
▪ 3.1.3.3 Determinación de la condición de parada	40
○ 3.1.4 Descripción del algoritmo iterativo de segmentación	41
▪ 3.1.4.1 Generación espectrograma y computación de Espacio Característico	42
▪ 3.1.4.2 Módulo 1	42
▪ 3.1.4.3 Módulo 2	43
▪ 3.1.4.4 Convergencia de la PDF de ruido	45
○ 3.1.5 Aplicación al reconocimiento vocal	45
- 3.2 Substracción Espectral QBNE	46
○ 3.2.1 Notación y Asunciones	47
○ 3.2.2 Estimación de ruido	47
○ 3.2.3 Eliminación del ruido de la señal vocal	49
○ 3.2.4 Experimentos y resultados	50
- 3.3 Análisis comparativo y Objetivos	53
Capítulo cuarto: Optimización del filtrado morfológico para tratar señales vocales	57
- 4.1 Alineamiento de Grid teórico	58
○ 4.1.1 Descripción del problema	58
○ 4.1.2 Ajuste de la posición	60
▪ 4.1.2.1 Ajuste utilizado en [3]	61
▪ 4.1.2.2 Ajuste eficiente	62
- 4.2 Recuperación de amplitudes espectrales	65
○ 4.2.1 Obtención de las amplitudes espectrales	66
○ 4.2.2 Inclusión mediante aplicación de máscara	67
○ 4.2.3 Optimización del nivel base	69
○ 4.2.4 Suavizado de los bordes de la máscara	71
○ 4.2.5 Experimentos y resultados	73
- 4.3 Optimización de áreas segmentadas	76
○ 4.3.1 Parámetros que determinan el área segmentada	77
▪ 4.3.1.1 Condición de parada de las iteraciones	78
▪ 4.3.1.2 Probabilidad de error	79
○ 4.3.2 Optimización de los parámetros	81

▪ 4.3.2.1 Experimento 1: mejores entrenamientos y límites en test	83
• 4.3.2.1.1 Conjuntos de entrenamiento y test	85
• 4.3.2.1.2 Experimentos y resultados	86
• 4.3.2.1.3 Conclusiones	87
▪ 4.3.2.2 Experimento 2: optimización fina de ratios en test	88
▪ 4.3.2.3 Experimento 3: ajuste de P_e en el algoritmo original	94
▪ 4.3.2.4 Experimento 4: algoritmo original optimizado	97
- 4.4 Conclusiones	98
Capítulo quinto: Combinación Filtrado morfológico – Substracción espectral	101
- 5.1 Introducción	102
- 5.2 Combinación de ambas técnicas	104
○ 5.2.1 Configuración serie	105
○ 5.2.2 Configuración paralelo	106
- 5.3 Conclusiones	110
Capítulo sexto: Reducción de la carga computacional	113
- 6.1 Estimación de SNR y definición de condiciones finales	114
○ 6.1.1 Estimación de la SNR	115
○ 6.1.2 Definición de condiciones finales	118
▪ 6.1.2.1 Definición de límites discreta	118
▪ 6.1.2.2 Definición de límites continua	120
○ 6.1.3 Conclusiones	122
- 6.2 Alternativa a la propagación	123
○ 6.2.1 Motivación y descripción	124
○ 6.2.2 Experimentos y resultados	125
○ 6.2.3 Reducción de las iteraciones	127
▪ 6.2.3.1 Obtención de límites óptimos	127
▪ 6.2.3.2 Experimentos y resultados	129
○ 6.2.4 Conclusiones	130
- 6.3 Estimación directa del límite	132
○ 6.3.1 Estimación del límite a partir de zona ruidosa	133
○ 6.3.2 Experimentos y resultados	137
○ 6.3.3 Conclusiones	139
- 6.4 Conclusiones	140
Índice	158

Capítulo séptimo: Conclusiones	144
Lista de figuras	148
Lista de tablas	151
Referencias	152
Descripción de software incluido	154