

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Aplicaciones tecnológicas del ultrasonido: breve perspectiva histórica	2
1.2. Entorno de desarrollo de la tesis	4
1.3. Estructura de la tesis	5
2. Estado de la cuestión y objetivos planteados	7
2.1. Sistemas ultrasónicos en el aire. Visión general	8
2.1.1. El ultrasonido en la robótica	8
2.1.2. Otras aplicaciones de los sistemas ultrasónicos	10
2.1.3. Problemas asociados al uso del ultrasonido en el aire	13
2.2. Codificación y proceso de la señal ultrasónica	14
2.3. Implementación de los algoritmos de proceso de la señal ultrasónica	20
2.4. Sistemas ultrasónicos en el exterior	22
2.5. Otras tecnologías empleadas para la detección de obstáculos en el exterior .	27
2.6. Objetivos planteados	31
3. Propagación del ultrasonido en el exterior	35
3.1. Atenuación del ultrasonido en la atmósfera	36
3.1.1. Divergencia geométrica	36
3.1.2. Absorción atmosférica	38
3.1.3. Efecto de la niebla y de la lluvia	40
3.2. Mecanismos que influyen en la velocidad de propagación	43
3.2.1. Efecto de la temperatura	43
3.2.2. Efecto del viento	44

3.2.3.	Efecto de la niebla	45
3.3.	Análisis cuantitativo de la refracción	46
3.3.1.	Desviación de un rayo ultrasónico	46
3.3.2.	Perfiles de temperatura y velocidad del viento	47
3.3.3.	Linealización de la velocidad con la altura	50
3.3.4.	Valores Obtenidos	51
3.4.	El fenómeno de las turbulencias	54
3.4.1.	Aspectos generales sobre la teoría de turbulencias	55
3.4.2.	Propagación de una onda acústica a través de una atmósfera turbulenta	59
3.5.	Análisis experimental	61
3.5.1.	Medida de la atenuación	62
3.5.2.	Medida de la velocidad de propagación	62
3.5.3.	Medida del tiempo de coherencia	64
3.5.4.	Medida de las fluctuaciones de amplitud y fase: modelo experimental para una atmósfera turbulenta	65
3.6.	Conclusiones	71
4.	Nueva técnica de codificación con conjuntos de secuencias complementarias	75
4.1.	El filtro acoplado	76
4.2.	Códigos empleados en la compresión de pulsos	77
4.2.1.	Códigos Barker	78
4.2.2.	Secuencias Pseudoaleatorias	79
4.2.3.	Códigos Golay	81
4.3.	Codificación basada en el uso de secuencias complementarias	83
4.3.1.	Conjuntos de secuencias complementarias	83
4.3.2.	Nuevo algoritmo de generación de conjuntos de cuatro secuencias complementarias	87
4.3.3.	El Correlador eficiente	92
4.3.4.	Esquema de codificación	94
4.3.5.	Simulación de los sistemas propuestos	95

4.4. Conclusiones	96
5. Adaptación y proceso de la señal ultrasónica codificada.	101
5.1. El transductor ultrasónico	102
5.2. Modulación y detección de la señal ultrasónica	105
5.2.1. Modulación BPSK	106
5.2.2. Demodulación BPSK y detección del conjunto de cuatro secuencias .	108
5.2.3. Sistemas de detección de picos	114
5.3. Caracterización del sistema	117
5.3.1. Inmunidad al ruido	117
5.3.2. Resolución espacial	120
5.3.3. Operación multimodo	122
5.4. Efecto de las turbulencias sobre la señal ultrasónica codificada	122
5.4.1. Validación del sistema en exteriores	128
5.4.2. Emisión por encima de tiempo de coherencia	130
5.4.3. Predicciones del modelo experimental	134
5.5. Conclusiones	138
6. Implementación hardware y resultados	141
6.1. El módulo emisor	141
6.2. Implementación del módulo de detección en un sistema programable	143
6.3. Implementación del módulo de detección en un sistema configurable	144
6.3.1. Preamplificador digital	144
6.3.2. Demodulador BPSK	146
6.3.3. Correlador eficiente ESSC	146
6.3.4. Detector de picos	148
6.3.5. Características globales de la implementación	148
6.4. Resultados obtenidos con señales reales	149
6.4.1. Operación multimodo	151
6.4.2. Resolución espacial y dependencia de la capacidad de detección con el ángulo de recepción	156

6.4.3. Operación en tiempo real y reducción de la zona ciega	159
6.5. Conclusiones	165
7. Conclusiones y trabajos futuros	167
7.1. Conclusiones	167
7.1.1. Análisis de la propagación del ultrasonido en el exterior	167
7.1.2. Propuesta de un nuevo esquema de codificación	169
7.1.3. Diseño y caracterización del sistema sensorial ultrasónico	170
7.1.4. Implementación hardware de los algoritmos de proceso	172
7.2. Trabajos futuros	172
7.3. Publicaciones derivadas de la tesis	174
Apéndice A. Formulación relacionada con la propagación del ultrasonido en el exterior	177
A.1. Absorción de las ondas acústicas	177
A.2. Atenuación por niebla	181
A.3. Perfiles de viento y temperatura en la atmósfera. Teoría de Monin-Obukhov	186
Apéndice B. Otras alternativas de modulación	191
B.1. Modulación QPSK doble	191
B.2. Modulación 4D	193
B.3. Modulación 8PSK	195
Apéndice C. Aspecto físico de los sistemas empleados en los pruebas experimentales	199
C.1. Equipo empleado para las pruebas en exteriores	199
C.2. Equipo empleado en el Laboratorio de Percepción activa de la Universidad de Amberes	201
C.3. Hardware	202
Bibliografía	204

Índice de figuras

2.1. Modos alternativos de disponer los transductores en un robot móvil.	9
2.2. Sistema de eco-localización bidimensional propuesto por Mihajlik <i>et al.</i>	11
2.3. Módulo sensor y distribución de sensores en el sistema sónar propuesto por Ureña <i>et al.</i> para una silla de ruedas.	12
2.4. Sistema de posicionamiento local desarrollado por la Universidad de Bristol.	13
2.5. Técnica de detección de envolvente en la medida de TDVs.	15
2.6. Sistema NDT propuesto por Furgason <i>et al.</i>	17
2.7. Arquitectura propuesta en la Universidad Brigham Young para el procesamiento de la señal de un sónar marino.	21
2.8. Configuración de los sensores ultrasónicos en el vehículo NAVLAB.	23
2.9. Configuración del sensor SONAVIS.	24
2.10. Señales en el sensor CTFM.	25
2.11. Sistema de posicionamiento local desarrollado por el Instituto de Automática Industrial del CSIC.	25
2.12. Sistema sensorial ultrasónico propuesto por Sato <i>et al.</i> para la detección de obstáculos en un paso a nivel.	27
2.13. Señal emitida por un radar FMCW	30
3.1. Caracterización de la atmósfera como canal dinámico de transmisión del ultrasonido.	36
3.2. Orientación del transductor.	37
3.3. Dependencia del coeficiente de absorción con la frecuencia.	40
3.4. Dependencia del coeficiente de absorción con la temperatura y la humedad.	41
3.5. Atenuación provocada por la presencia de niebla y lluvia en función de la frecuencia.	43

3.6. Refracción provocada por los gradientes de temperatura.	44
3.7. Efecto del viento sobre la propagación de un pulso ultrasónico.	44
3.8. Refracción provocada por el viento.	45
3.9. Trayectoria seguida por un rayo bajo un gradiente constante.	47
3.10. Relación entre z_0 , L y las clases de Turner.	49
3.11. Elipsoide de Fresnel.	50
3.12. Representación esquemática del algoritmo desarrollado para el cálculo de la refracción.	52
3.13. Atenuación media provocada por las turbulencias.	54
3.14. Efecto de las turbulencias sobre la coherencia de la onda acústica	55
3.15. Evolución de los remolinos en un régimen turbulento.	57
3.16. Configuración del sistema empleado en el análisis experimental	62
3.17. Ensanchamiento del espectro provocado por un canal dinámico	64
3.18. Fluctuaciones de amplitud y fase observadas en el laboratorio.	67
3.19. Fluctuaciones de amplitud y fase observadas con muy baja actividad turbulenta.	67
3.20. Fluctuaciones de amplitud y fase observadas con muy alta actividad turbulenta.	68
3.21. Modelo para una atmósfera turbulenta.	69
3.22. Fluctuaciones de amplitud y fase predichas por el modelo para un tiempo de coherencia de 10 ms	70
3.23. Dispersión espectral predicha por el modelo para un tiempo de coherencia de 10 ms	71
4.1. Implementación práctica de un filtro acoplado como un correlador digital.	77
4.2. Registro de desplazamiento realimentado lineal.	79
4.3. Correlador eficiente de parejas Golay	83
4.4. Generador rápido de conjuntos de cuatro secuencias complementarias.	92
4.5. Correlador eficiente de conjuntos de cuatro secuencias complementarias.	93
4.6. Esquema de codificación para un sistema sensorial genérico.	94
4.7. Autocorrelación de la secuencias obtenidas con el generador rápido	97
4.8. Correlaciones cruzadas de la secuencias obtenidas con el generador rápido	97
4.9. Respuesta del correlador eficiente a un conjunto acoplado	98

4.10. Respuesta del correlador eficiente a un conjunto ortogonal	99
5.1. Transductor electrostático de Polaroid (serie 600).	102
5.2. Respuesta en transmisión del transductor Polaroid.	103
5.3. Etapa de excitación del transductor Polaroid.	103
5.4. Respuesta en frecuencia del módulo de emisión.	104
5.5. Patrón de emisión del transductor Polaroid.	105
5.6. Espectro de la señal con modulación BPSK.	107
5.7. Correlador eficiente modificado empleado en el sistema de detección.	110
5.8. Diagrama de bloques del módulo de detección de un conjunto.	110
5.9. Detección de un conjunto de cuatro secuencias en ausencia de ruido externo.	112
5.10. Detección de un conjunto de cuatro secuencias en un ambiente ruidoso	112
5.11. Respuesta del módulo detector a un conjunto ortogonal en ausencia de ruido	113
5.12. Respuesta del módulo detector a un conjunto ortogonal con $SNR = -12dB$	113
5.13. Ejemplo de validación de dos señales con umbral estático.	115
5.14. Ejemplo de validación de dos señales con umbral dinámico	116
5.15. Ejemplo de validación de dos señales con preproceso	118
5.16. Recepción de tres señales en distintas condiciones de SNR.	119
5.17. Recepción de dos señales con una separación de 48 muestras	121
5.18. Diagrama de bloques del sistema completo	123
5.19. Ejemplo de recepción de cuatro conjuntos ortogonales en ausencia de ruido	124
5.20. Ejemplo de recepción de cuatro conjuntos ortogonales con $SNR = -9dB$	125
5.21. Ejemplo de recepción de cuatro conjuntos ortogonales en ausencia de ruido con un solapamiento del 90%	126
5.22. Ejemplo de recepción de cuatro conjuntos ortogonales con $SNR = -9dB$ y un solapamiento del 90%	127
5.23. Detección en condiciones de muy baja actividad turbulenta	129
5.24. Detección en condiciones de actividad turbulenta media.	129
5.25. Detección en condiciones de muy alta actividad turbulenta.	130
5.26. Detección de conjuntos de secuencias de 256 bits con actividad turbulenta muy baja.	131

5.27. Detección de conjuntos de secuencias de 256 bits con actividad turbulenta muy alta.	131
5.28. Comparación entre las señales emitida y recibida con actividad turbulenta muy baja	132
5.29. Comparación entre las señales emitida y recibida con actividad turbulenta muy alta	133
5.30. Detección de conjuntos de secuencias de 1024 bits con actividad turbulenta muy alta	133
5.31. Resultados obtenidos con el modelo para una señal formada por conjuntos de secuencias de 64 bits y un tiempo de coherencia de 10 <i>ms</i>	136
5.32. Resultados obtenidos con el modelo para una señal formada por conjuntos de secuencias de 256 bits y un tiempo de coherencia de 10 <i>ms</i>	136
5.33. Comparación entre el patrón emitido y la señal modelada	137
5.34. Resultados obtenidos con el modelo para una señal formada por conjuntos de secuencias de 1024 bits y un tiempo de coherencia de 10 <i>ms</i>	137
5.35. Resultados obtenidos con el modelo para una señal formada por conjuntos de secuencias de 64 bits y un tiempo de coherencia de 1 <i>ms</i>	138
6.1. Implementación hardware del módulo emisor con un generador rápido de secuencias FSSG.	142
6.2. Implementación hardware del módulo emisor con una memoria FIFO.	143
6.3. Plataforma del sistema programable empleado.	144
6.4. Implementación hardware del preamplificador digital.	145
6.5. Implementación hardware del demodulador BPSK asíncrono.	146
6.6. Arquitectura propuesta para la implementación del correlador eficiente	147
6.7. Estructura de los bloques combinacional y secuencial en una etapa del correlador eficiente	147
6.8. Implementación hardware del detector de picos	148
6.9. Comportamiento de la implementación sobre hardware configurable del módulo de detección	150
6.10. Recepción simultánea de los conjuntos ortogonales A y B en el laboratorio	152
6.11. Recepción simultánea de los conjuntos ortogonales C y D en el laboratorio	153
6.12. Recepción simultánea de los conjuntos ortogonales A y B en el exterior con actividad turbulenta de intensidad media	154

6.13. Recepción simultánea de los conjuntos ortogonales C y D en el exterior con actividad turbulenta de intensidad media	155
6.14. Escenario de pruebas empleado en el estudio de la resolución espacial.	156
6.15. Resultados reales obtenidos en el análisis de la resolución para una separación de 3 cm	157
6.16. Resultados reales obtenidos en el análisis de la resolución para una separación de 2 cm	158
6.17. Resultados reales obtenidos en el análisis de la resolución para una separación de 1 cm	158
6.18. Escenario de pruebas empleado en el barrido	160
6.19. Resultados obtenidos en el barrido	160
6.20. Comparación de los resultados obtenidos para un ángulo de emisión de 0° y un ángulo de 23°.	161
6.21. Sistema de proceso en tiempo real	162
6.22. Dependencia del SMR con el porcentaje de secuencias complementarias perdido.	163
6.23. Resultados obtenidos en tiempo real	164
B.1. Modulación QPSK digital.	192
B.2. Espectro de la señal con modulación QPSK.	193
B.3. Diagrama de bloques para el módulo de detección de conjuntos modulados con QPSK.	193
B.4. Modulación 4D digital.	194
B.5. Espectro de la señal con modulación 4D.	195
B.6. Diagrama de bloques para el módulo de detección de conjuntos modulados con 4D.	195
B.7. Modulación 8PSK digital.	196
B.8. Espectro de magnitud de la señal con modulación 8PSK.	197
C.1. Equipo experimental completo	199
C.2. Escenario de pruebas realizadas en el exterior.	200
C.3. Vista lateral de uno de los transductores y de la central meteorológica	200
C.4. Vista frontal del sistema sonda desarrollado en el marco del Proyecto CIRCE	201

C.5. Escenario de pruebas en el laboratorio de Percepción Activa de la Universidad de Amberes	201
C.6. Módulo emisor formado por un transductor Polaroid y la tarjeta de acondicionamiento de la serie 6500 modificada	202
C.7. Tarjeta de adquisición de altas prestaciones NuDAQ-2010	202
C.8. Plataforma basada en la FPGA XCV1000E.	203

Índice de tablas

3.1. Valores típicos para la longitud de las rugosidades.	48
3.2. Desviaciones máximas obtenidas para un haz ultrasónico.	52
3.3. Medida experimental de la atenuación.	63
3.4. Medida experimental de la velocidad de propagación.	63
3.5. Niveles de intensidad turbulenta	65
3.6. Medida experimental del tiempo de coherencia Doppler de la señal.	66
4.1. Conjunto de códigos Barker.	79
4.2. Parejas Golay primitivas.	82
4.3. Número de parejas Golay con longitudes inferiores a cien.	82
4.4. Conjuntos ortogonales generados en la primera iteración	91
4.5. Conjuntos ortogonales obtenidos a partir del Generador rápido	95
5.1. Análisis de ruido autoinducido	114
5.2. Análisis estadístico de la separación entre picos reales consecutivos.	134
6.1. Tiempos de ejecución de las tareas de detección en un sistema programable.	144
6.2. Recursos consumidos por la implementación propuesta.	149
6.3. Recursos consumidos por la implementación real.	162