



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y
COMUNICACIONES



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SIMULADOR DE RADAR PARA
SISTEMAS DE RADIONAVEGACIÓN CIVIL.

GARCIA, JOHAND
RÍOS, ALEXANDER

BARBULA, NOVIEMBRE 2011

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SIMULADOR DE RADAR PARA
SISTEMAS DE RADIONAVEGACIÓN CIVIL.**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

**GARCIA, JOHAND
RÍOS, ALEXANDER**

BARBULA, NOVIEMBRE 2011

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SIMULADOR DE RADAR PARA SISTEMAS DE RADIONAVEGACIÓN CIVIL.”, realizado por los bachilleres: GARCIA, JOHAND y RÍOS, ALEXANDER, cédulas de identidad: **19.790.430** y **18.783.991** respectivamente, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Firma

DR. MARIO PETRIZZELLI
TUTOR

Firma

ING. GRECIA ROMERO
JURADO

Firma

MSC. PAULINO DEL PINO
JURADO

BARBULA, NOVIEMBRE 2011

ÍNDICE GENERAL

	pág
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
AGRADECIMIENTOS	XIII
DEDICATORIA	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Alcance	4
1.5. Limitaciones	5
1.6. Recursos a Utilizar	5
1.6.1. Recursos Humanos	5

1.6.2. Recursos Institucionales	5
1.6.3. Recursos Tecnológico	6
1.7. Resultados Alcanzados	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. El Radar	11
2.2.1. Concepto de Radar	12
2.2.2. Taxonomía del Radar	13
2.2.3. Ecuación de rango del radar (Radar Range Equation)	15
2.3. Esquema básico de un sistema de radar	21
2.4. Señales Básicas de Radar	21
2.4.1. Pulso de Frecuencia Constante	22
2.4.2. Pulso con Modulación Lineal en Frecuencia	26
2.4.3. Tren de Pulsos Coherentes	37
2.5. Procesamiento de la señal	44
2.5.1. MTI, MTD, Pulso Doppler	45
2.5.2. Razón de Falsa Alarma Constante (CFAR)	46
2.5.3. Procesamiento adaptativo	48
2.6. Aplicaciones	49
2.6.1. Radares Meteorológicos (Radar Doppler)	49
2.6.2. Radio Navegación	51
2.6.3. Control de Trafico Aéreo (ATC)	52

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	55
3.1. Tipo de Investigación	55
3.2. Técnicas de Recopilación de Datos	56
3.2.1. Análisis Documental	56
3.3. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	56
3.3.1. Etapa de Simulación	57
3.3.2. Etapa de Implementación	57
3.3.3. Procedimiento Metodológico	57
3.4. Descripción del Algoritmo para Sistema de Radar	59
3.4.1. Entrada de datos	59
3.4.2. Cálculo de la distancia	61
3.4.3. Cálculo de la velocidad	61
3.5. Descripción del Algoritmo para CTA	63
3.5.1. Entrada de datos	64
3.5.2. Cálculo de parámetros del avión	65
3.5.3. Cálculo de parámetros del clima	65
3.5.4. Cálculo de parámetros del radar	66
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
4.1. Pruebas de Estabilidad	68
4.2. Pruebas de Desempeño	69
4.2.1. Sistema de Radar	71
4.2.2. Control de Tráfico Aéreo	77

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
5.1. Conclusiones	81
5.2. Recomendaciones	83
APÉNDICE A. FUNCIÓN AMBIGÜEDAD	84
A.1. Algunas Propiedades de la Función Ambigüedad	84
A.1.1. Primera Propiedad: Máxima en (0,0)	85
A.1.2. Segunda Propiedad: Volumen Constante	85
A.1.3. Tercera Propiedad: Simetría con respecto al origen	85
A.1.4. Cuarta Propiedad: Efecto de LFM	86
APÉNDICE B. MANUAL DE USUARIO PARA EL SOFTWARE RADAR-SIM U.C.	87
B.1. ¿Qué es RADARSIM U.C.?	87
B.2. Ayuda	87
B.2.1. Interfaz Gráfica de Usuario de la Ecuación del Radar.	88
B.2.2. Interfaz Gráfica de Usuario de la Función Ambigüedad.	91
B.2.3. Interfaz Gráfica de Usuario del Sistema de Radar.	94
B.2.4. Interfaz Gráfica de Usuario del Sistema de Control de Tráfico Aéreo. .	100
BIBLIOGRAFÍA	104

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Principio del Radar.[1]	15
2.2. Diagrama de bloques simple de un radar que emplea un amplificador de potencia para transmitir y un receptor superheterodino.[2]	22
2.3. Envolvente compleja de un pulso de frecuencia constante.[3]	23
2.4. Función Ambigüedad parcial de un pulso de frecuencia constante de longitud T . [3]	25
2.5. Contorno 0.1 (punteado) y 0.707 (continua) de la AF de un pulso.[3]	26
2.6. Corte cero-retraso (Zero-delay) de la AF de un pulso.[3]	27
2.7. Señal lineal FM.[3]	28
2.8. Función Ambigüedad parcial de un pulso lineal FM ($BT = 10$).[3]	29
2.9. Fase y Frecuencia característica del pulso con LFM utilizado en la figura 2.8.[3]	30
2.10. Corte cero-Doppler de la AF de un pulso con LFM con un producto tiempo-ancho de banda igual 10.[3]	31
2.11. Densidad Espectral (en dB) de un pulso no modulado y un pulso con LFM, $BT = 10$. [3]	32
2.12. Contornos 0.1 y 0.707 de la AF de un pulso con LFM ($BT = 10$).[3]	33
2.13. Implementación de las ventanas de peso: a) Ponderaciones iguales; b) Ponderaciones desiguales. [3]	34
2.14. Amplitud, auto-correlación, y espectro de un pulso LFM no ponderado, $BT = 100$. [3]	35

ÍNDICE DE FIGURAS

2.15. Amplitud, auto-correlación, y espectro de la raíz cuadrada un pulso LFM ponderado, $BT = 100$. [3]	35
2.16. Función Ambigüedad Parcial de un pulso LFM con $BT = 20$. [3]	37
2.17. Función Ambigüedad Parcial de un pulso con LFM ponderado con la Ventana de Hamming con $BT = 20$. [3]	38
2.18. Respuesta Cero-Doppler de un pulso LFM ponderado con la ventana de Hamming ($BT = 20$): a) Ponderación adaptada; b) Ponderación en el receptor. [3]	39
2.19. Envolvente de un tren de pulsos coherente. [3]	40
2.20. Función Ambigüedad parcial de un tren coherente de $N = 6$ pulsos. [3]	42
2.21. Los contornos 0.1 y 0.72 de la AF de un tren coherente de 6 pulsos. [3]	43
2.22. Corte CERO-Retraso de la función ambigüedad de 6 pulsos. [3]	43
2.23. Resoluciones y Ambigüedades marcadas en un zoom de los contornos en la Fig. 2.21. [3]	44
2.24. Diagrama de bloques de un Detector de Blanco en Movimiento (MTD).[4]	46
2.25. Sistema MTI coherente.[5]	46
2.26. Técnicas de CFAR: a) Sistema resguarda banda; b) Sistema fijo; c) ACG de alcance promediado; d) Blanco de lóbulo lateral. [5]	47
3.1. Esquema general del algoritmo empleado para determinar la posición y velocidad de un objeto.	60
3.2. Diagrama para el Análisis de la Distancia.	62
3.3. Diagrama para el Análisis de la Velocidad.	62
3.4. Esquema general del algoritmo empleado para el control de tráfico aéreo.	63
3.5. Esquema general del algoritmo empleado para calcular la potencia reflejada por el avión y su trayectoria.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

3.6. Esquema general del algoritmo empleado para calcular la potencia reflejada según las condiciones meteorológicas.	66
3.7. Esquema general del algoritmo empleado para el subsistema del radar de control de tráfico aéreo.	67
4.1. Prueba de estabilidad para el CTA.	69
4.2. Prueba de estabilidad para el Sistema de Radar (Error en el cálculo de los coeficientes del filtro).	70
4.3. Prueba de estabilidad para el Sistema de Radar (Error en Distancia).	70
4.4. Resultados de la Simulación (Pulso de Frecuencia Constante).	73
4.5. Señal Transmitida (Pulso de Frecuencia Constante).	73
4.6. Señal Recibida (Pulso de Frecuencia Constante).	74
4.7. Respuesta en Frecuencia del Filtro (Pulso de Frecuencia Constante).	74
4.8. Señal Procesada (Pulso de Frecuencia Constante).	75
4.9. Resultados de la Simulación (Tren de Pulsos Coherente).	75
4.10. Señal Transmitida (Tren de Pulsos Coherente).	76
4.11. Señal Recibida (Tren de Pulsos Coherente).	76
4.12. Respuesta en Frecuencia del Filtro (Tren de Pulsos Coherente).	77
4.13. Señal Procesada (Tren de Pulsos Coherente).	77
4.14. Rango actual del avión (amarillo) y rango estimado (magenta) por el sistema de control de tráfico aéreo.	79
4.15. Rango actual del avión (amarillo) y rango estimado (magenta) por el sistema de control de tráfico aéreo.	80

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Nomenclatura estándar para la banda de frecuencia de radares.[2]	14
2.2. Aplicaciones del Radar. [5]	50
2.3. Sistemas de radio navegación a nivel mundial.[5]	52
3.1. Parámetros de entrada del programa principal del sistema de control de tráfico aéreo.	64
4.1. Pruebas realizadas.	71

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso, por habernos dado la sabiduría y la fortaleza para que fuera posible alcanzar este triunfo.

Al Profesor Mario Petrizzelli, por imponernos este reto, por el apoyo, experiencia y orientación que nos brindo para culminar este ultimo paso en nuestra carrera profesional.

A la familia Escalona Campos, por el apoyo prestado durante toda la carrera y en especial durante la elaboración de este trabajo especial de grado.

A Melissa Sarache, por su infinita colaboración para poder llevar a buen termino este proyecto.

A todos nuestros familiares y amigos, que de una u otra manera estuvieron pendientes a lo largo de este proceso, brindado su apoyo incondicional.

DEDICATORIA

A mi amado e inolvidable papá, gracias por guiarme y protegerme, estés donde estés. Tu presencia cada día crece más en mi alma. A ti te debo lo que soy!

A ti, insuperable, preciosa, bella y amorosa mamá, por darme tu cariño, paciencia, apoyo, consejos y, por sobretodo, valor para seguir adelante. Que nunca me vayas a faltar!

A mi inigualable tío Carlos, por su apoyo incondicional y por toda la ayuda que me ha brindado para seguir adelante.

Alexander Ríos

A mis padres: mi madre, una gran luchadora en la vida y ejemplo de valentía, gallardía y una gran consejera; mi padre, un hombre de grandes valores y un gran caballero.

A mis hermanas, grandes confidentes, incondicionales como nunca.

Mi mascota pillin, el hermano que nunca tuve y con el que me divierto mas que con cualquier persona.

Johand Garcia

INTRODUCCIÓN

Hoy día son de gran utilidad los software simuladores, debido a que se han convertido en una herramienta importante en el desarrollo tecnológico, científico y de formación académica. La simulación proporciona una tercera alternativa entre el análisis exacto y la intuición física. Por esto se recurre a herramientas computacionales capaces de reproducir el hecho real con buen porcentaje de fidelidad.

El nombre de radar está formado por las primeras letras de las palabras inglesas *Radio Detecting And Ranging*, “Detección por Radio y Medida de Distancia”. El radar tiene diversas aplicaciones. Inicialmente se usó en la guerra y la defensa, con el fin de localizar aviones, barcos o submarinos. En el control de tráfico aéreo se usan en la vecindad del aeropuerto y en el seguimiento de la ruta de un aeropuerto a otro desde el suelo así como en tráfico sobre las pistas. En meteorología permite seguir el desplazamiento de ciclones, huracanes y otros fenómenos.

Actualmente, la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo no cuenta con material de apoyo para el estudio y desarrollo de los sistemas de radar, que permita a los estudiantes conocer el funcionamiento de estos sistemas. De esta manera, se ha considerado fundamental desarrollar e implementar un programa que permita simular un radar para sistemas de radionavegación civil.

El presente trabajo describe detalladamente un simulador de un radar para sistemas de radionavegación civil, específicamente, control de tráfico aéreo. Consta de cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

En el primer capítulo, titulado el problema, presenta la situación actual y las razones de la importancia del problema. Se justifica el problema planteado y se definen los objetivos.

El segundo capítulo, presenta los antecedentes de la investigación, seguido de una breve descripción de los sistemas de radar, de las señales básicas empleadas en estos sistemas, sus principales aplicaciones y demás bases teóricas que fundamentan la investigación.

Luego, en el capítulo tres se exponen las metodologías escogidas y utilizadas para la realización, implementación y cumplimiento de los objetivos planteados para el presente proyecto. Por último se describen los algoritmos concebidos para la simulación del Sistema de Radar y para el Control de Tráfico Aéreo (CTA) por medio de diagramas de flujos.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de validación del código. Se exhiben cuatro pruebas de simulación que se desarrollaron con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento de los algoritmos descritos en el capítulo anterior.

El quinto y último capítulo, contiene la discusión de resultados que alcanzarán los autores luego del cumplimiento de los objetivos. Adicionalmente contiene las recomendaciones para futuros investigadores que pretendan estudiar los sistemas de radar aplicados a la radionavegación civil.

Finalmente se presentan los apéndices que contienen una breve descripción de la función ambigüedad y el manual de usuario del simulador desarrollado en MATLAB®.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

En el presente capítulo se explica todo lo relacionado al planteamiento del problema, los objetivos que se persiguen, así como la justificación, alcance, limitaciones y recursos a utilizar en la presente investigación.

1.1. Planteamiento del Problema

La Universidad de Carabobo y específicamente la Facultad de Ingeniería es una institución educativa que forma Ingenieros Electricistas en la mención de Electrónica y Comunicaciones, y próximamente empezaran a egresar de sus aulas las primeras cortes de profesionales en Ingeniería de Telecomunicaciones. Así mismo, cuenta con un postgrado en el área de Ingeniería Eléctrica. En consideración con lo indicado anteriormente, y con el propósito de complementar la formación establecida dentro de los pensum de estudio de las carreras indicadas, el presente trabajo de grado se ha planteado la necesidad de elaborar una herramienta computacional, a nivel didáctico y disponible en el laboratorio de comunicaciones, a través del cual es posible diseñar y/o definir, a partir de un algoritmo los distintos subsistemas que permitan “construir” un sistema de radar para aplicaciones en un ámbito civil. Además, la herramienta computacional que se plantea desarrollar debe ser capaz de simular los distintos procesos del sistema de radar mismo.

Existe bibliografía en la cual se describen los sistemas de radar y aplicaciones de radares, un conjunto limitado de esta bibliografía provee un software para la simulación. No obstante estas no engloban un algoritmo del proceso completo, sino breves simulaciones con relación a ciertos elementos de un todo, que viene siendo el sistema de radar en sí. En general el algoritmo ideal, por así decirlo, debe servir de referencia concluyente y detallada, útil tanto para ingenieros activos como para estudiantes en el aprendizaje, análisis y diseño de sistemas de radar, debe mostrar al usuario de forma amigable el contenido teórico requerido y debe ser reconfigurable para permitir que diferentes usuarios cambien las entradas para analizar mejor sus requerimientos relevantes y únicos, y aumentar el conocimiento del tema.

Todos los señalamientos precedentes tienen como intención desarrollar un algoritmo de simulación que permita de forma fácil y accesible generar una matriz de conocimientos acerca de los sistemas de radar. El mismo pretende ser un instrumento de apoyo en materias relacionadas con las comunicaciones, además de aumentar el potencial del programa MATLAB®

1.2. Justificación

El mundo se encuentra en un constante proceso de cambio; si se refiere a las herramientas de software también se puede decir lo mismo, estos cambios se ven reflejados en la realización, utilización y distribución de los programas. Como plantea David Held y Anthony McGrew (2000): “vivimos en un mundo cada vez mas globalizado, con interacciones y dinámicas cambiantes que obligan a todo profesional a poseer conocimientos, habilidades y destrezas académicas que le faciliten la inserción, la superación y el mantenimiento en el mercado de trabajo”. Sin embargo, el conocimiento actual en el área de radares para sistemas de navegación civil, en Venezuela, se resume a una serie de catálogos con especificaciones técnicas y características brindados por los fabricantes de dichos sistemas. Así, se ha considerado trascendente estudiar dichos sistemas con el propósito de generar un algoritmo de simulación

que a través de una interfaz gráfica amigable facilite el aprendizaje, análisis y diseño de sistemas de radar.

El estudio planteado ayudará, entre otros aspectos, a conocer el funcionamiento de diversos sistemas de radar en aplicaciones civiles y proporcionará información que será útil para profesores, estudiantes y profesionales del área sobre como implementar de modo más provechoso estos sistemas. De esta forma se tiende a presentar un aporte al proceso de enseñanza que se realiza en la escuela de ingeniería eléctrica y de telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo, específicamente en el área de radares, ya que el estudiante se introducirá en los sistemas de radares y navegación civil. Esta investigación es viable, pues se dispone de los recursos necesarios para llevarla a cabo.

Finalmente, la realización de este trabajo especial de grado, permitirá a sus autores cumplir con el último requisito académico exigido para obtener el Título de Ingeniero Electricista. Además de profundizar y aplicar los conocimientos en el área de antenas, electromagnetismo y procesamiento digital de señales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar una herramienta computacional que permita facilitar el aprendizaje, análisis y diseño de sistemas de radares en un ámbito civil.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Recopilar el material bibliográfico relacionado con los conceptos básicos de radares y sus aplicaciones civiles.
2. Desarrollar un esquema general del algoritmo, haciendo uso de diagramas de flujos, que sirva de guía para la etapa de programación en MATLAB®.
3. Escribir el código en MATLAB® que permita realizar la tarea planteada.
4. Organizar la ayuda para cada uno de los programas y estructuras de los programas elaborados.
5. Realizar simulaciones y verificar la correspondencia entre el modelo computacional elaborado y el modelo conceptual.
6. Realizar pruebas bajo ambiente Windows® para validar la funcionalidad de la herramienta.

1.4. Alcance

La librería de programas a realizarse abarcará el área sistemas de navegación civil, particularmente el *Control de Tráfico Aéreo* en las bandas de frecuencia L y S . Se programó bajo el ambiente MATLAB®.

1.5. Limitaciones

El desarrollo de la herramienta tiene como limitaciones las siguientes:

- Se estudiarán solo sistemas de radares para radio navegación civil aplicados al control de tráfico aéreo.
- Los programas desarrollados contemplarán el entorno MATLAB® como único entorno de programación.

1.6. Recursos a Utilizar

1.6.1. Recursos Humanos

Se contó con la ayuda del Dr. Mario Petrizzelli, Profesor Jubilado del Departamento de Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de Carabobo, como tutor académico.

1.6.2. Recursos Institucionales

Se tuvo acceso a material bibliográfico proporcionado por la Biblioteca Central de la Facultad de Ingeniería y Biblioteca Rental de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y la biblioteca personal del Profesor Mario Petrizzelli.

1.6.3. Recursos Tecnológico

Se utilizó un computador cuyo sistema operativo sea Windows® , la herramienta de programación empleada para el desarrollo del presente proyecto fue la aplicación MATLAB® . Se contó con información y manuales interactivos sobre el lenguaje de programación de MATLAB® obtenidos de forma gratuita de internet.

1.7. Resultados Alcanzados

En primer lugar, se completó un algoritmo eficaz para realizar la simulación del proceso realizado por un sistema de radar empleado en el control de tráfico aéreo.

Con la culminación de este proyecto, el Laboratorio de Comunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo cuenta con una herramienta computacional para el estudio de sistemas de radar empleados para radio navegación civil, capaz de analizar, a través de una interfaz gráfica de usuario, la forma de onda a transmitir, los efectos meteorológicos en la propagación de la onda, el efecto Doppler, entre otros fenómenos de interés para estos sistemas.

Además, se espera que haciendo uso del algoritmo desarrollado los estudiantes del área de Telecomunicaciones puedan llevar a cabo practicas de laboratorio en la asignatura *Sistemas de Radar*.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las bases teóricas, definiciones y planteamientos generales que sustentan los modelos matemáticos utilizados para el desarrollo de las unidades de cálculos y los objetivos de este trabajo de grado.

2.1. Antecedentes

En el proceso de búsqueda de información y revisión bibliográfica se han encontrado los siguientes trabajos, los cuales brindan importantes aportes para el desarrollo de este proyecto, sirviendo de orientación para la planificación y desarrollo del mismo. Estos trabajos son:

- Jing Xu, M. W. Hoffman, B. L. Cheong y R. D. Palmer, “*Simulation of Coherent Radar Imaging Using Continuous Wave Noise Radar*”, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (2009).

Un simple modelo computacional de correlación cruzada para múltiples retro-dispersiones del radar de ruido de onda continua es desarrollado y verificado con análisis teórico y simulaciones en el dominio del tiempo, es tratado en este artículo. Basado en este modelo de correlación cruzada, una modificación de un método numérico existente originalmente desarrollado por Haldsworth y Reid para radares de pulsos con antenas espaciadas es usado para simular el estimado de la correlación cruzada correspondiente a la retro-dispersión de la

atmósfera usando un radar de onda continua coherente. Posteriormente, las comparaciones de los procesamientos de la imagen del radar entre un radar de onda continua y un radar de pulso convencional que son presentados verifican el potencial del radar de onda continua para imágenes de la atmósfera.

Esta publicación es de gran apoyo a la investigación pues contempla un modelo computacional simple de correlación cruzada para estimar la retro-dispersión de la atmósfera, con la finalidad de tomar en cuenta la dispersión de la onda en el procesamiento digital de la señal que permitirá obtener una buena imagen de la atmósfera, en este caso, con la diferencia que el presente proyecto no se enfoca en el área de radares de uso meteorológico sino en radares para radio-navegación civil.

- Mariano Javier Pamies Porras, “*Estudio y Desarrollo de un Sistema Radar para el Seguimiento de Blancos*”, Universidad Politécnica de Cartagena (2008).

En este proyecto se desarrolla el diseño y parte de la implementación de un radar de seguimiento, basado en la idea de controlar el haz de un arreglo de antenas unidimensional digitalmente, y su posterior aplicación para desarrollar un sistema de seguimiento. Por otro lado ha de tenerse en cuenta que no se tratará de una aplicación con motivaciones profesionales sino con un claro marco docente de aplicación.

El trabajo descrito brinda un esquema de las etapas de un sistema de radar (transmisión, recepción y control) las cuales formarán parte de la base para el desarrollo de la presente investigación, con la diferencia que el presente proyecto solo se dirige al estudio de radares de seguimiento sino a radares con aplicaciones en la radio-navegación.

- Dmitriy Garmatyuk, “*High-resolution radar system modeling with MATLAB/SIMULINK*”, Rf Design (2006).

Este artículo trata acerca de que modelando nuevos clases de sistemas para la obtención de imágenes de radar es una manera robusta y económica de medir el rendimiento esperado del sistema y de crear una guía de diseño de prueba del concepto. Ilustrando esto, con el ejemplo de un estudio de simulación de un radar de apertura sintética con Ultra-ancho de banda (UWB) basado en una señal multifrecuencia.

Este estudio se diferencia en el problema en estudio, donde Garmatyuk se enfocó en modelar sistemas de radares de alta resolución y la presente investigación se enfoca en la simulación de sistemas de radar para radio-navegación civil, a pesar de esto los esquemas mostrados por Garmatyuk en conjunto con los planteados por Pamies, formarán parte fundamental en el desarrollo del presente proyecto.

- José González, Carlos Castillo y Mateo Burgos, “*Modelado de blancos extensos para la simulación de escenarios en radares de apertura sintética*”, XX Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Gandía (2005).

Un tarea importante en el desarrollo de un simulador de radar de apertura sintética (SAR) consiste en una generación de escenarios apropiados los cuales podrían reproducir el comportamiento de no sólo los blancos puntuales sino también los blancos extendidos con bastante exactitud y generalidad. Un nuevo modelo de blanco extendido es propuesto aquí y está basado en un análisis de dos pasos. En primer lugar, un análisis en pequeña escala es mostrado, presentando un modelo estadístico y físico del esparcimiento electromagnético el cual es capaz de reproducir el esparcimiento de una onda electromagnética plana con suficiente confiabilidad. En segundo lugar, un análisis a gran escala propone un modelo de facetas para cualquier superficie, incluyendo los efectos geométricos y de sombreado. El modelo se

ha realizado minimizando la carga computacional y se ha utilizado como un generador de escenarios en un simulador de SAR completo que se está desarrollando.

Este trabajo sirve de gran apoyo a la investigación pues contempla el modelado de blancos extensos para la simulación de escenarios en radares de apertura sintética, con la diferencia que el presente proyecto no solo se enfoca en el área de radares de apertura sintética sino también en radares para radio-navegación civil.

- Álvaro Blanco del Campo, Alberto Asensio López, David Ramírez Morán, Javier Gismero Menoyo y Saúl Castro González, “*Formas de onda para radares de alta resolución*”, Universidad Politécnica de Madrid (2002).

En los últimos años nuevas aplicaciones han ido surgiendo en el campo de radares. La mayoría de ellas pertenecen al sector civil y más precisamente a aplicaciones de seguridad. En éstos tipos de usos no solamente la detección es perseguida sino también su clasificación e incluso la identificación. Para conseguir las características de operaciones requeridas, Los Radares de alta resolución (HRR) son muy apropiados. Uno de los problemas principales a ser solucionado mientras se desarrolla el HRR, es la selección de la forma de onda a ser transmitida. Esto, sin duda, afectará todo lo sistema.

Este trabajo pretende discutir sobre las posibles formas de ondas a ser seleccionadas enfatizando los pro y contra de las consecuencias principales que esta selección concierne. Por consiguiente es de gran apoyo durante el desarrollo de los distintos módulos de transmisión de la presente investigación, ya que se enfoca en la selección de la forma de onda a ser transmitida en radares de alta resolución, siendo esto ultimo la diferencia, pues el proceso de estudio realizado se hará a sistemas de radares para radio-navegación civil.

- Bassem R. Mahafza y Atef Z. Elsherbeni, “*MATLAB Simulations for Radar Systems Design*”, Chapman & Hall/CRC CRC Press LLC (2004).

El énfasis de “MATLAB Simulations for Radar Systems Design” es en el diseño de sistemas de radar. La organización de este libro fue pensada con la intención de enseñar el proceso conceptual de radares y relacionarlo con el análisis y cálculo. El mismo pretende servir como referencia para ingenieros que se desempeñan en el campo de sistemas radares. Adicionalmente provee códigos en MATLAB® diseñados con el propósito de suministrar al usuario la experiencia práctica en sistemas de radares, tanto en el proceso de análisis como en el proceso de diseño.

Este libro representa un gran aporte a la investigación, ya que se enfoca en el diseño de sistemas de radar bajo un entorno de simulación en la herramienta de cálculo MATLAB®, misma herramienta que será utilizada en el proceso de desarrollo de la presente investigación.

2.2. El Radar

Durante la segunda guerra mundial los investigadores ingleses lograron poner en funcionamiento un sistema radioeléctrico que detectaba la aproximación de los aviones alemanes antes de que estos entrasen en el campo visual o acústico de los observadores. Este rudimentario sistema fue decisivo para el desarrollo del radar.

La palabra RADAR se utiliza para designar una amplia variedad de equipos de muy diversa utilización. El tipo de radar más conocido es el de pulsos, utilizado para la navegación marítima con el que se evitan un gran número de situaciones de peligro tales como abordajes y aproximaciones peligrosas a la costa.

El control de espacio aéreo de un país está basado en los datos obtenidos por un sistema de radar que además detecta la presencia de cualquier objeto volante, lo interroga y si se trata de una aeronave, esta se identifica mediante el radar secundario. Los radares meteorológicos se emplean para detectar masas nubosas facilitando la realización de previsiones sobre tormentas, granizo, entre otros, siendo de gran ayuda para la agricultura.

En el campo de la defensa se combinan con computadoras de alta velocidad y gran potencia de cálculo formando sistemas de dirección de tiro para baterías antiaéreas o lanzadores de misiles utilizados para evitar incursiones aéreas, interceptar misiles, entre otros.

2.2.1. Concepto de Radar

La palabra radar quiere decir “*radio detection and ranging*”, que puede traducirse como Detección por Radio y Medida de Distancia, designa los sistemas que utilizan la energía electromagnética para la detección y localización de objetos.

Una mejor definición de lo que es un radar es la siguiente: Un radar es un sensor electromagnético activo que utiliza su propia fuente de energía para iluminar una región del espacio y luego registra el eco generado por los objetos presentes en la región iluminada.

Un radar detecta la presencia de un objeto, la distancia a la que se encuentra, la dirección de su trayectoria, y su velocidad radial.

La detección se realiza procesando la parte de energía electromagnética que después de reflejarse en el objeto vuelve a ser captada por el RADAR. La localización consiste en la determinación de la distancia y la dirección en que está situado el objeto respecto de la posición del RADAR y para esto es necesario, la medida de las tres coordenadas de situación.

La detección depende de la capacidad que tiene el objeto de reflejar la energía electromagnética que incide sobre él. Se entiende por respuesta la energía devuelta en el objeto, que en la terminología utilizada en RADAR se denomina blanco, bien por reflexión pasiva de la energía emitida por el RADAR o por respuesta activa del blanco.

La localización del blanco es posible gracias a las cualidades directivas y telemétricas de la energía electromagnética.

La cualidad directiva es la facultad de concentrar la energía radiada en un ángulo sólido muy pequeño, cuya orientación es conocida, por lo que la respuesta recibida procede de la dirección en que está orientado el ángulo sólido de propagación, es decir, la antena.

Para la telemetría, es decir, la medida de la distancia, se emplea la conocida ley “*espacio = velocidad x tiempo*”.

$$2R = c \times t \quad (2.1)$$

Donde c es la velocidad de la luz, es decir, la velocidad con que se propaga la onda, y R la distancia entre el RADAR y el blanco. Esta distancia se multiplica por 2 para tener en cuenta el camino de ida y el de vuelta. La distancia se calcula en función del tiempo transcurrido desde el envío de la onda por parte del radar y la recepción de la respuesta.

2.2.2. Taxonomía del Radar

Los radares pueden ser clasificados como sistemas de radar con base en tierra, en el aire, en el espacio, o en embarcaciones. También pueden ser clasificados en numerosas categorías sobre la base de las características específicas del radar, como la banda de frecuencia (Ver Tabla 2.1), tipo de antena y forma de onda utilizada. Otra clasificación está interesada por

la misión y/o la funcionalidad del radar. Esto incluye: el clima, la adquisición y la búsqueda, seguimiento, exploración, control de fuego, advertencia temprana, sobre el horizonte, seguimiento de terreno y radares para evitar el terreno. El arreglo en fase de radares utiliza arreglos de antenas, y son llamados radares multifunción (ó multimodo) a menudo. Un arreglo en fase está conformado por antenas construidas con dos o más radiadores básicos. El arreglo de antenas sintetiza el ancho del haz, éste puede ser dirigido mecánicamente o electrónicamente. La dirección electrónica es conseguida controlando la fase de la corriente de alimentación del arreglo, y por lo tanto, se dice que el arreglo es adaptativo [16].

Designación de la Banda	Rango de Frecuencia Nominal
<i>HF</i>	3 MHz - 30 MHz
<i>VHF</i>	30 MHz - 300 MHz
<i>UHF</i>	300 MHz - 1000 MHz
<i>L</i>	1 GHz - 2 GHz
<i>S</i>	2 GHz - 4 GHz
<i>C</i>	4 GHz - 8GHz
<i>X</i>	8 GHz - 12 GHz
<i>K_u</i>	12 GHz - 18 GHz
<i>K</i>	18 GHz - 27 GHz
<i>K_a</i>	27 GHz - 40 GHz
<i>V</i>	40 GHz - 75 GHz
<i>W</i>	75 GHz - 110 GHz
<i>mm</i>	110 GHz -300 GHz

Tabla 2.1: Nomenclatura estándar para la banda de frecuencia de radares.[2]

Los radares a menudo son clasificados por el tipo de forma de onda que usan, o por su frecuencia operativa. Considerando la forma de onda primero, los radares pueden ser de onda continua (CW por sus siglas en ingles Continuous Wave) o Radares Pulsados (PR por sus siglas en ingles Pulsed Radars). Los Radares CW son aquellos que continuamente emiten la energía electromagnética, y usan distintas antenas para transmisión y recepción. Un radar CW sin modulación puede medir con exactitud la velocidad radial (desplazamiento Doppler) y la posición angular de un blanco. El rango de información del blanco no puede ser extendido sin utilizar un poco de modulación. El uso principal de los radares CW sin modulación es la

búsqueda de trayectoria y velocidad de blancos, y en la orientación de misiles. Los radares pulsados usan un tren de pulsos (principalmente con modulación). En esta categoría, los sistemas de radar pueden ser clasificados en base a la frecuencia de repetición de pulso (PRF por sus siglas en inglés Pulse Repetition Frequency) como bajo PRF, mediano PRF y radares de alto PRF. Los radares de bajo PRF son usados para medir la distancia al blanco, la velocidad (el desplazamiento Doppler) no es de interés principalmente. Los radares de alto PRF son usados para medir la velocidad del blanco principalmente. Tanto los radares CW como los pulsados pueden medir la distancia y la velocidad radial del blanco utilizando diferentes esquemas de modulación [16].

2.2.3. Ecuación de rango del radar (Radar Range Equation)

El factor más fundamental que determina el comportamiento de un radar es el radar range equation, la cual es, básicamente, un cómputo de la relación señal a ruido (signal to noise ratio) [20].

Considerando una fuente isotrópica (un fuente que irradia con la misma potencia en todas las direcciones) irradiando al espacio abierto un pulso de energía electromagnética con potencia pico P .

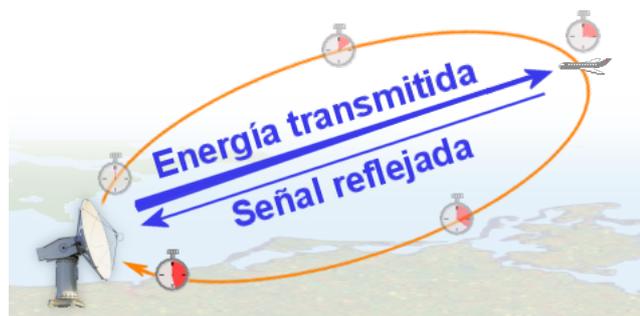


Figura 2.1: Principio del Radar.[1]

La antena del radar concentra la potencia de la fuente isotrópica en la región confinada por un ángulo sólido y por ello decimos que la antena tiene ganancia. La ganancia de la antena G_T es el ratio o razón de la potencia concentrada en la región confinada por un ángulo sólido a la potencia irradiada en forma isotrópica.

La densidad de potencia a una distancia R del radar entonces queda definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad de potencia radiada a una distancia } R = \frac{PG_T}{4\pi R^2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.2)$$

Donde:

P = Potencia pico en vatios.

G_T = Ganancia de la antena.

R = Distancia en metros desde el radar hasta el punto en donde se desea medir la densidad de potencia.

Hay que recordar que densidad es potencia dividida por área, y que el área de superficie de una esfera de radio R es $4\pi R^2$.

Asumiendo que a una distancia R del radar hay un blanco con una sección transversal de área efectiva σ metros cuadrados. Esto es, para efectos de la onda electromagnética, que el blanco representa un objeto de área σ metros cuadrados.

$$\text{Potencia retransmitida desde el blanco hacia el radar} = \frac{PG_T\sigma}{4\pi R^2} \text{ (W)} \quad (2.3)$$

La potencia retransmitida desde el blanco hacia el radar, al llegar al radar contará con una densidad de potencia igual a la potencia transmitida dividida por $4\pi R^2$.

$$\text{Densidad de potencia retransmitida medida en el radar} = \frac{PG_T\sigma}{(4\pi)^2 R^4} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.4)$$

Definiendo S , la potencia de la señal recibida por la antena del radar, esto es, la potencia del eco recibido, como la densidad de potencia retransmitida medida en el radar, multiplicada por el área efectiva que presenta la antena receptora del radar. Esto es:

$$S = \frac{PG_T\sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4} \text{ (W)} \quad (2.5)$$

Donde:

S = Potencia de la señal recibida.

A_e = área efectiva de la antena receptora del radar.

El área efectiva de la antena y su área física o real están relacionadas por una simple ecuación:

$$A_e = \eta A \text{ (m}^2\text{)} \quad (2.6)$$

Donde η es la eficiencia de la antena, parámetro con un valor entre 0 y 1.

El área efectiva y la ganancia de la antena están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$A_e = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} (m^2) \quad (2.7)$$

Para radares monoestáticos donde la antena hace el trabajo de recepción y transmisión se tiene que $G_T = G_R = G$. Ahora, sustituyendo la expresión para el área efectiva de la antena en la ecuación que define la potencia de la señal recibida por la antena receptora del radar:

$$S = \frac{PG^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} (W) \quad (2.8)$$

La ecuación anterior define la potencia de la señal recibida o la potencia del eco, esta ecuación es llamada “*Radar range equation*”, la misma puede ser usada para calcular la distancia de un blanco. El máximo rango de detección R_{max} es el rango al cual la potencia en el receptor es justamente igual a la mínima señal detectable S_{min} . Ahora se procede a calcular la potencia del ruido en el receptor para así poder obtener la relación señal a ruido.

Hay diversas fuentes que contribuyen a la potencia total del ruido en el receptor. Entre ellas podemos listar:

1. Ruido generado en el transmisor.
2. Ruido cósmico.
3. Ruido atmosférico.
4. Ruido producido por artefactos creados por el hombre (bujías de los carros, escobillas de motores, entre otros).
5. Ruido térmico producido por el primer amplificador y mezclador del receptor.

De todas las fuentes de ruido, la más importante es el ruido térmico.

Sea N la potencia del ruido térmico a la entrada del receptor.

$$N = kT_{eq}B \quad (2.9)$$

Donde:

k = La constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23} \left(\frac{W \cdot seg}{\circ K} \right)$.

T_{eq} = Temperatura equivalente de ruido del receptor en Kelvin.

B = Ancho de Banda del receptor en Hertz.

La fidelidad del radar es normalmente descrita por una figura de merito llamada “*Noise figure*”. El noise figure es definido como:

$$NF = 10 \text{Log} \left(\frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} \right) \text{ (dB)} \quad (2.10)$$

Donde $(S/N)_i$ y $(S/N)_o$ son, respectivamente, la relación señal a ruido a la entrada y salida del receptor.

La temperatura equivalente de ruido, T_{eq} , está dada por:

$$T_{eq} = T_0(NR-1) \quad (2.11)$$

Donde

T_0 = Es la temperatura del receptor, generalmente temperatura ambiente.

NR = Es la relación de ruido = $\frac{(S/N)_i}{(S/N)_o}$.

Por lo tanto,

$$N = kT_{eq}B = kT_0(NR-1)B \quad (2.12)$$

Finalmente se puede obtener la expresión que define la relación señal a ruido del radar.

$$\frac{S}{N} = \frac{PG^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3 R^4} / (kT_0(NR-1)B) \quad (2.13)$$

$$\frac{S}{N} = \frac{PG^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3 R^4 kT_0(NR-1)B} \quad (2.14)$$

En la práctica, la verdadera relación señal a ruido será un poco menor al definido por la última expresión pues el radar sufre de otras pérdidas que no se han contabilizado en este análisis. Si se contabilizan dichas pérdidas introduciendo un término L_s (sin dimensión), se obtiene una ecuación más realista para la relación señal a ruido.

$$\frac{S}{N} = \frac{PG^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3 R^4 kT_0(NR-1)BL_s} \quad (2.15)$$

Para poder identificar blancos que proyecten pequeña área al radar, se necesita una combinación de alta potencia, alta ganancia de la antena y poco ruido. Esto no es fácil de lograr, pero, por fortuna, el receptor puede integrar varios pulsos recibidos como eco, aumentando así la relación señal a ruido.

2.3. Esquema básico de un sistema de radar

Las partes básica de un sistema de radar son ilustradas en el simple diagrama de bloques de la figura 2.2. La señal del radar, usualmente un tren de pulsos, es generada por el transmisor y radiado al espacio por la antena. El duplexor permite usar una sola antena en tiempo compartido para transmisión y recepción. Los objetos reflectores (blancos) interceptan y re-irradian una porción de la señal del radar, una cantidad pequeña de esta es devuelta en dirección del radar. La señal de eco reflejada es tomada por la antena del radar y amplificada por el receptor. Si la salida del receptor del radar es lo suficientemente alta, se dice que ocurre la detección de un blanco. Un radar generalmente determina la ubicación del blanco en distancia y ángulo, pero la señal de eco también puede proveer la información sobre la naturaleza del blanco. La salida del receptor puede ser presentada en una pantalla a un operador que toma la decisión respecto a si un blanco está presente o no, o la salida del receptor puede ser procesada por medios electrónicos para reconocer la presencia de un blanco automáticamente y establecer un rastreo del blanco detectado durante un periodo de tiempo. Con la detección y rastreo automática (ADT) al operador usualmente se le presenta en pantalla, el blanco con rastreo ya procesado en lugar de la detección del blanco sin procesar. En algunas aplicaciones, el procesamiento de la salida del radar podría ser usado para controlar directamente un sistema (como un misil guiado) sin la intervención de algún operador [2].

2.4. Señales Básicas de Radar

Tres (3) señales básicas de radar son descritas en este apartado: Un pulso de frecuencia constante, un pulso con modulación lineal de frecuencia (LFM), y un tren de pulsos coherente con idéntica constate de frecuencia. La función ambigüedad será la herramienta principal en

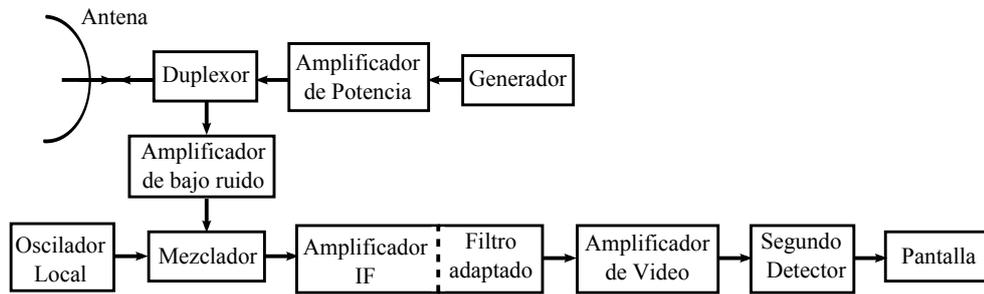


Figura 2.2: Diagrama de bloques simple de un radar que emplea un amplificador de potencia para transmitir y un receptor superheterodino.[2]

este estudio. Para estas tres señales se desarrollarán las expresiones reducidas de las funciones ambigüedad (AF).

2.4.1. Pulso de Frecuencia Constante

La envolvente compleja de un pulso de frecuencia constante (o no modulada) aparece en la figura 2.3 y viene dada por:

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (2.16)$$

La función ambigüedad es obtenida usando la ecuación 2.16 en

$$\chi(t, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) \mu^*(t + \tau) e^{j2\pi\nu t} dt \quad (2.17)$$

Produciendo

$$\chi(t, \nu) = \begin{cases} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}+\tau}^{\frac{T}{2}} e^{j2\pi\nu t} dt & 0 \leq \tau \leq T \\ \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}+\tau} e^{j2\pi\nu t} dt & -T \leq \tau \leq 0 \\ 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.18)$$

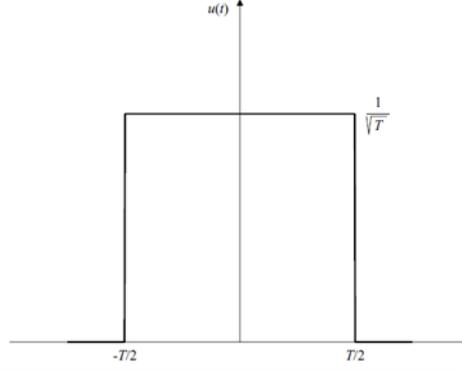


Figura 2.3: Envolvente compleja de un pulso de frecuencia constante.[3]

Resolviendo las integrales y tomando valor absoluto resulta

$$|\chi(t, \nu)| = \begin{cases} \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \frac{\sin[\pi T \nu (1 - \frac{|\tau|}{T})]}{\pi T \nu (1 - \frac{|\tau|}{T})} \right| & |\tau| \leq T \\ 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.19)$$

El corte a lo largo del eje de retardo se obtiene haciendo $\nu = 0$, resultando

$$|\chi(t, 0)| = \begin{cases} \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) & |\tau| \leq T \\ 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.20)$$

El corte a lo largo del eje de Doppler se obtiene haciendo $\tau = 0$, resultando

$$|\chi(t, 0)| = \begin{cases} \left| \frac{\sin[\pi T v (1 - \frac{|\tau|}{T})]}{\pi T v (1 - \frac{|\tau|}{T})} \right| & |\tau| \leq T \\ 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.21)$$

Hay que tener en cuenta que el corte $|\chi(t, 0)|$ se extiende desde $-\infty$ a ∞ .

Los dos primeros cuadrantes de la función ambigüedad se representan en la figura 2.4. Un gráfico de contorno de la AF, que abarca los cuatro cuadrantes, aparece en la figura 2.5. Se trazan dos contornos de nivel; la línea continua representa $|\chi(t, 0)| = 0,707$ y los contornos punteados representan $|\chi(t, 0)| = 0,1$. La figura 2.4 muestra claramente el corte triangular (cero-Doppler) de la función ambigüedad, que se describe en 2.20. La respuesta de retraso llega a cero en el ancho de pulso T . El corte (cero-retraso o zero-delay) es menos evidente en la figura 2.4 y se representa por separado en la figura 2.6. El primer nulo Doppler está en el inverso de la duración del pulso, esto es, $|\chi(0, \frac{1}{T}) = 0|$.

Por lo tanto se puede afirmar que aproximadamente la resolución del retraso (delay) es T y la resolución del Doppler es $1/T$ [3]. Un ejemplo numérico es útil aquí.

Considerando $T = 5\mu$ s y $f_c = 5GH$ z, lo cual produce $\Delta R = \frac{C_p T}{2} = 750$ m. Con una relación de compresión de pulso de 100, el rango de resolución sería reducido a un aceptable 7.5m. Con respecto a la resolución de velocidad, se obtiene

$$V_{null}(m/s) = \nu_{null} \frac{C_p}{2f_c} = \frac{1}{T} \frac{C_p}{2f_c} = \frac{3 \times 10^8}{(5 \times 10^{-6})(2 \times 5 \times 10^9)} = 6 \times 10^3 m/s = 6km/s \quad (2.22)$$

Como una velocidad de resolución de 6km/s, es claramente inaceptable. Esta velocidad abarca todas las velocidades terrestres posibles, alcanzando velocidades típicas de satélites. La conclusión es que un solo pulso sin comprimir por lo general no puede proporcionar suficiente

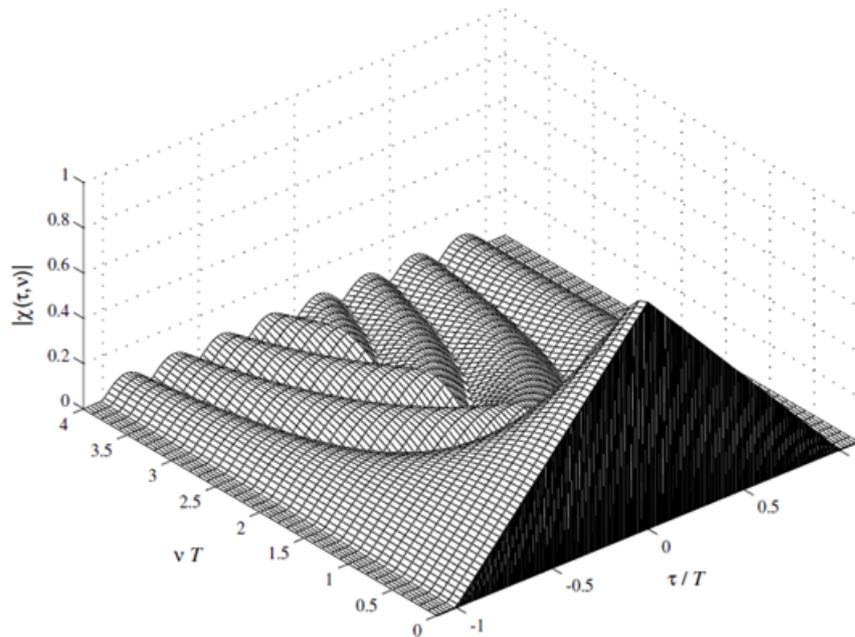


Figura 2.4: Función Ambigüedad parcial de un pulso de frecuencia constante de longitud T . [3]

resolución de alcance o resolución de velocidad (Doppler). Un rango de resolución satisfactoria se alcanzará usando la compresión del pulso y una resolución de velocidad aceptable usando un tren de pulso coherente. La resolución fue prácticamente definida por el primer nulo, pero más allá del primer nulo la respuesta se puede construir de nuevo (ver Fig. 2.6) y producir lóbulos laterales. Los lóbulos laterales de un retorno de un blanco fuerte pueden enmascarar un blanco pequeño. El primero (y mayor) lóbulo Doppler en la figura 2.6 o ecuación 2.21 se produce en $\nu T = 1,43$, donde $|\chi(0, 1,43/T)| = 0,2172$ o $-13,26\text{dB}$. Técnicas de ponderación de amplitud se utilizan generalmente para reducir tales lóbulos laterales alto. Para evitar la amplitud variable en el típico transmisor de alta potencia (clase C) del radar, la ponderación de amplitud es usualmente introducida solo en el receptor. Una función de más interés es el espectro de la envolvente compleja de la señal. La densidad espectral de la tensión es la transformada de Fourier de $\mu(t)$. Debido a que el pulso de frecuencia constante $\mu(t)$ es una constante real, la transformada de Fourier de $\mu(t)$ y $|\mu(t)|^2$ muestran el mismo resultado, y la

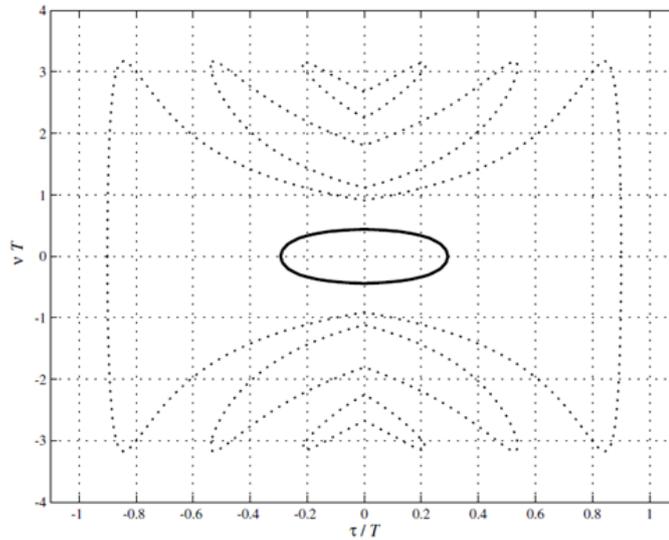


Figura 2.5: Contorno 0.1 (punteado) y 0.707 (continua) de la AF de un pulso.[3]

figura 2.6 también describe la magnitud de la densidad espectral de tensión de nuestra señal. Aquí se aprecia el pobre rendimiento. La señal ocupa su ancho de banda ineficientemente, con lóbulos laterales del espectro relativamente altos. En general el rendimiento de un pulso rectangular de frecuencia constante es pobre en muchos aspectos: resolución de alcance, resolución Doppler y altos lóbulos laterales Doppler, y un ineficiente uso del espectro [3]. Un pulso con modulación lineal en frecuencia (LFM), mejora en algunas de esas debilidades.

2.4.2. Pulso con Modulación Lineal en Frecuencia

La modulación lineal de frecuencia (LFM) es el primero y probablemente sigue siendo el método de compresión de pulso mas popular. Fue concebido durante la Segunda Guerra Mundial, de forma independiente en ambos lados del Atlántico, como puede deducirse de Alemania, Gran Bretaña, y patentes de EE.UU. (Cook y Bernfeld de 1967, Cook y Seibert,

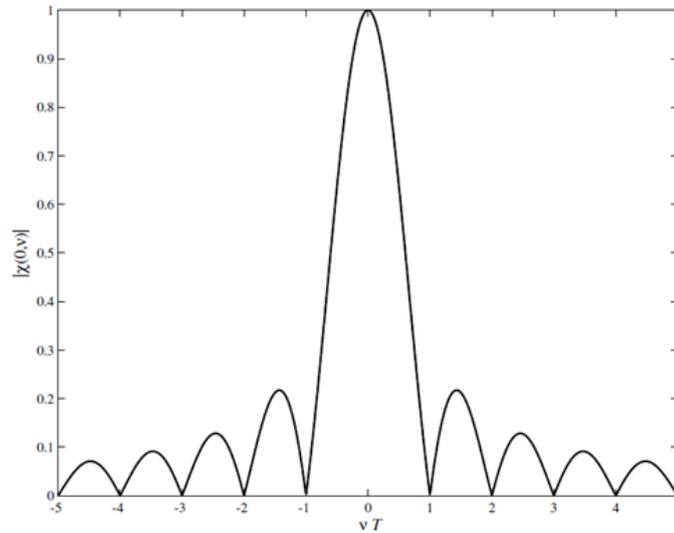


Figura 2.6: Corte cero-retraso (Zero-delay) de la AF de un pulso.[3]

1988) [3]. La idea básica es barrer la banda de frecuencia B linealmente durante la duración del pulso T (Fig. 2.7).

La envolvente compleja de un pulso con LFM viene dada por

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\pi kt^2}, \quad k = \pm \frac{B}{T} \quad (2.23)$$

La frecuencia instantánea $f(t)$ se obtiene derivando el argumento de la exponencial,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\pi kt^2)}{dt} = kt \quad (2.24)$$

La frecuencia instantánea es de hecho una función lineal del tiempo. La pendiente de la frecuencia k tiene dimensión s^2 .

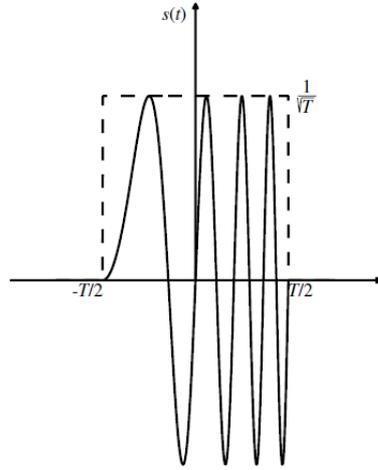


Figura 2.7: Señal lineal FM.[3]

La función ambigüedad (AF) se obtiene aplicando las propiedades de la AF de un pulso no modulado. Reemplazando ν en 2.19 con $\nu - kt$ produce la AF de un pulso con LFM:

$$|\chi(\tau, \nu)| = \begin{cases} |\chi(\tau, \nu)| = \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \frac{\sin[\pi T(\nu \mp B(\frac{\tau}{T}))(1 - \frac{|\tau|}{T})]}{\pi T(\nu \mp B(\frac{\tau}{T}))(1 - \frac{|\tau|}{T})} \right| & \text{para } |\tau| \leq T \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.25)$$

La figura 2.8 presenta un ejemplo de la AF de un pulso con LFM. La fase y la frecuencia de la envolvente compleja se muestran en la figura 2.8 El producto efectivo de tiempo-ancho de banda de la señal es $kT^2 = BT = 10$, donde B es la desviación de frecuencia total. Nótese que la desviación total de la frecuencia normalizada de la figura es BT , y la desviación de fase total es $BT\pi/4$. El corte cero-Doppler de la AF se obtiene estableciendo $\nu = 0$ en 2.25. Usando $kT = B$ produce

$$|\chi(\tau, 0)| = \begin{cases} |\chi(\tau, \nu)| = \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \frac{\sin[\pi BT(1 - \frac{|\tau|}{T})]}{\pi BT(1 - \frac{|\tau|}{T})} \right| & \text{para } |\tau| \leq T \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.26)$$

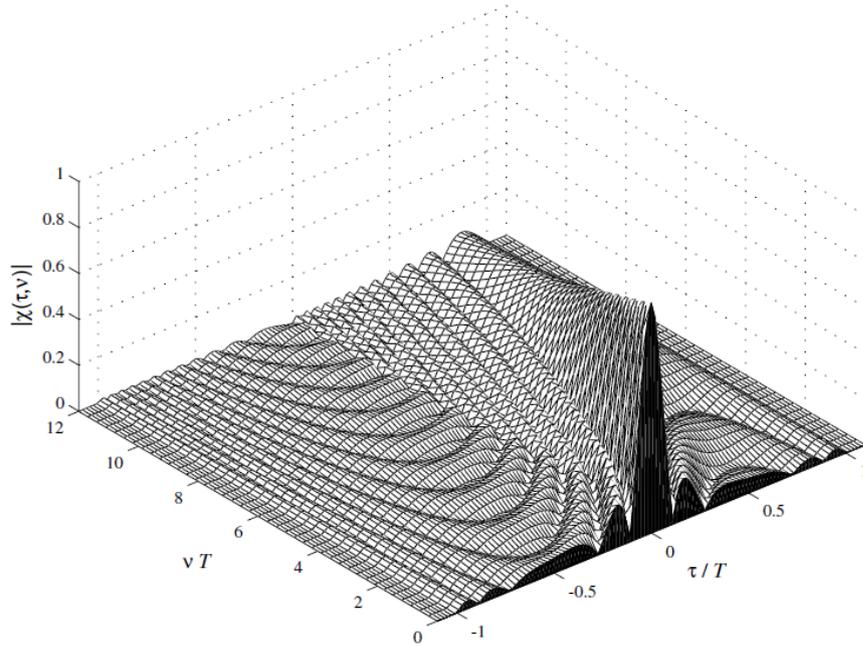


Figura 2.8: Función Ambigüedad parcial de un pulso lineal FM ($BT = 10$).[3]

Para un producto largo tiempo-ancho de banda ($kT^2 = BT \gg 4$) el primer nulo de $|\chi(\tau, 0)|$ ocurre en

$$\tau_{1st\ null} \approx \frac{1}{|k|T} = \frac{1}{B} \quad (2.27)$$

La relación de compresión es definida como $T/\tau_{1st\ null} \cong BT$, y es aproximadamente igual al producto tiempo-ancho de banda. Volviendo a la figura 2.8, ya que $BT=10$, el primer nulo debería ocurrir en $\tau/T = 0,1$. Un gráfico de $|\chi(\tau, 0)|$ para $BT = 10$ aparece en la figura 2.10

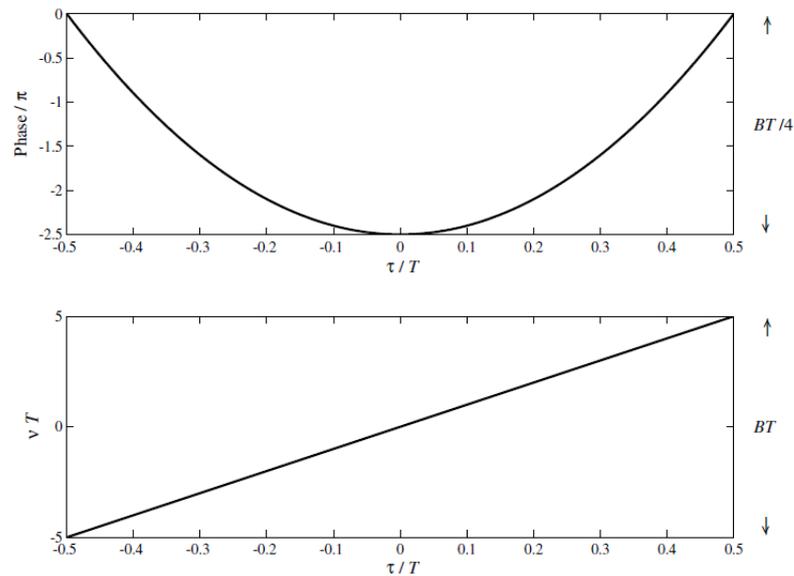


Figura 2.9: Fase y Frecuencia característica del pulso con LFM utilizado en la figura 2.8.[3]

El punto de la eficiencia espectral se muestra en la figura 2.11. la escala horizontal es la frecuencia normalizada con respecto a la anchura del pulso. La escala vertical es la densidad espectral en decibelios. Para obtener la resolución de alcance similar, el ancho del pulso no modulado fue una décima parte del ancho del pulso con LFM. Las escalas horizontales absolutas por lo tanto son idénticas en ambos gráficos. Comparando ambos gráficos, claramente se muestra un uso más eficiente del espectro en el caso del pulso LFM. La eficiencia espectral del pulso con LFM mejora a medida que el producto tiempo-ancho de banda incrementa, porque la densidad espectral entonces se acerca a una forma rectangular. Nótese que los espectros representados en la figura 2.11 son de las envolventes complejas de la señales y por lo tanto centrados alrededor del cero. Debido a la simetría, es suficiente trazar las frecuencias positivas solamente.

La mejora en la resolución del retraso del pulso con LFM viene con una consecuencia, el acoplamiento retraso-Doppler. Está expresado por la arista diagonal que se ve en el gráfico tridimensional de la AF (Fig. 2.8). Un gráfico de contorno (Fig. 2.12) enfatiza el problema

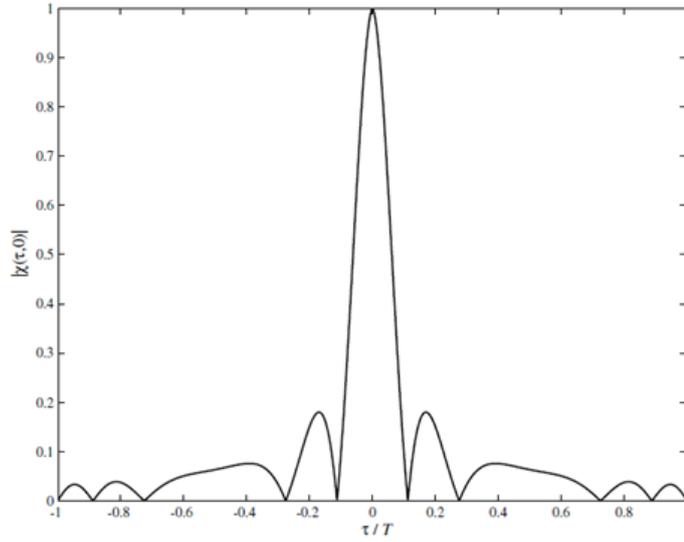


Figura 2.10: Corte cero-Doppler de la AF de un pulso con LFM con un producto tiempo-ancho de banda igual 10.[3]

del acoplamiento. De 2.25, se encuentra que para pequeños desplazamiento Doppler ν , la ubicación del retraso de la respuesta pico está desplazada de su verdadero retraso por:

$$\tau_{shift} = \nu/k \quad (2.28)$$

La interpretación física es que cuando $k > 0$, un objetivo con Doppler positivo se ve más cerca que su verdadero rango. En muchas aplicaciones el error de rango resultante es aceptable [3]. El error de retraso del pico desplazado de la respuesta se acompaña de una pequeña disminución en la altura del pico, como es evidente en la figura 2.8. Se puede demostrar que cerca del origen, la altura del pico disminuye de acuerdo con

$$|\chi(\tau_{pico}, \nu)| = 1 - \left| \frac{\nu}{kT} \right| = 1 - \left| \frac{\nu}{B} \right| \quad (2.29)$$

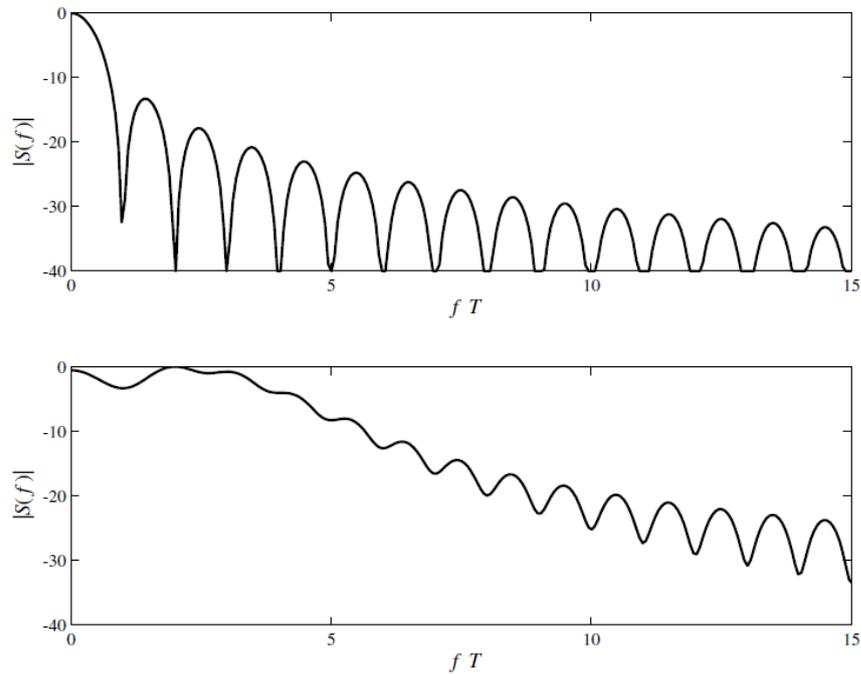


Figura 2.11: Densidad Espectral (en dB) de un pulso no modulado y un pulso con LFM, $BT = 10$. [3]

Donde el desplazamiento Doppler típico es usualmente mucho menor que la desviación de frecuencia de la señal B , la altura del pico de la AF se reduce muy ligeramente. Este comportamiento es responsable de la propiedad de tolerancia Doppler atribuida al LFM.

Amplia reducción de lóbulos laterales

La adición de la modulación de frecuencia lineal ha incrementado el ancho de banda y por lo tanto mejora el rango de resolución de la señal por un factor igual al producto tiempo-ancho de banda. Sin embargo, los lóbulos laterales relativamente fuertes continúan en la función de autocorrelación (ACF), como se ve, por ejemplo, en la figura 2.10. La ACF está relacionada con la densidad espectral de potencia de la señal a través de la transformada de Fourier. Los lóbulos laterales de la ACF se pueden reducir por la configuración del espectro. La formación

debe alterar el espectro de su forma de ventana casi rectangular a una de las bien conocidas ventanas de peso o ponderación (Von Hann, Hamming). La remodelación espectral del pulso con LFM se puede hacer usando 2 enfoques básicos diferentes: la ponderación de amplitud o ponderación de frecuencia.

La formación espectral a través de la ponderación de amplitud hace uso de la relación lineal entre la frecuencia instantánea y el tiempo a lo largo del pulso. En un momento dado, una determinada frecuencia se transmite. Si la amplitud de la señal en ese instante es mayor, la densidad espectral de potencia de la correspondiente frecuencia es también mayor. Por lo tanto, todo lo que se necesita es dar forma a la amplitud del pulso de acuerdo a la ventana de peso deseada.

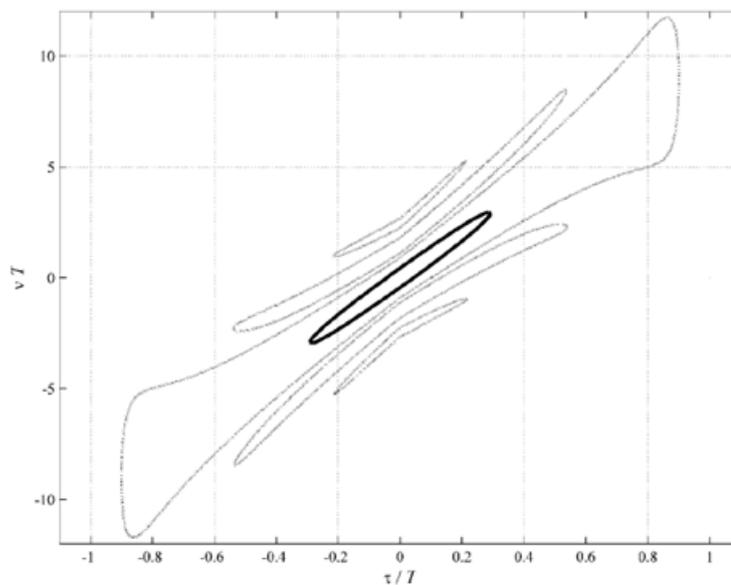


Figura 2.12: Contornos 0.1 y 0.707 de la AF de un pulso con LFM ($BT = 10$).[3]

Para mantener el filtrado adaptado, el peso debe ser dividido entre el transmisor y el receptor. Por lo tanto, la amplitud debería ser formada usando la raíz cuadrada de la ventana. Esto requiere un amplificador de potencia lineal en el transmisor, que es relativamente inefi-

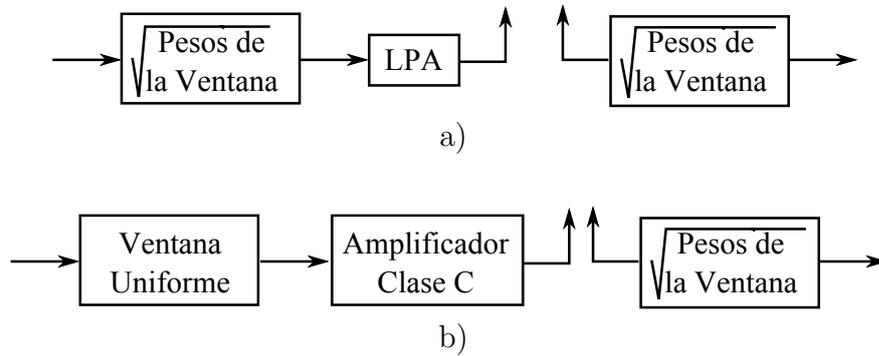


Figura 2.13: Implementación de las ventanas de peso: a) Ponderaciones iguales; b) Ponderaciones desiguales. [3]

ciente (Fig. 2.13.a). La otra alternativa es implementar la ventana de peso enteramente en el receptor, aceptando una pérdida debido al filtrado desadaptado.

Además de la pérdida de desajuste, la manera de actuar de los dos enfoques son similares pero no idénticos. Las contribuciones de la ponderación adaptada a la reducción de lóbulos laterales se muestran en la figuras 2.14 y 2.15. Las figuras presentan una comparación entre un pulso con LFM no ponderado y un pulso con LFM ponderado con la raíz cuadrada de la ventana de Hamming, ambos con $BT = 100$. Como la amplitud ponderada (gráficos arriba) afecta los lóbulos laterales picos de la ACF (gráficos medio), los cuales fueron reducidos de -13 dB en el pulso no ponderado (Fig. 2.14) a aproximadamente -40 dB en la amplitud del pulso con LFM ponderado (Fig. 2.15)

También es evidente en las dos figuras (gráficos inferiores) el efecto de la ponderación de amplitud en la forma de la densidad espectral. Según Levanon (2004), quien cita a Klauder (1960) la transformada de Fourier $U(f)$ de la envolvente compleja LFM $\mu(t)$ definida en 2.23 es

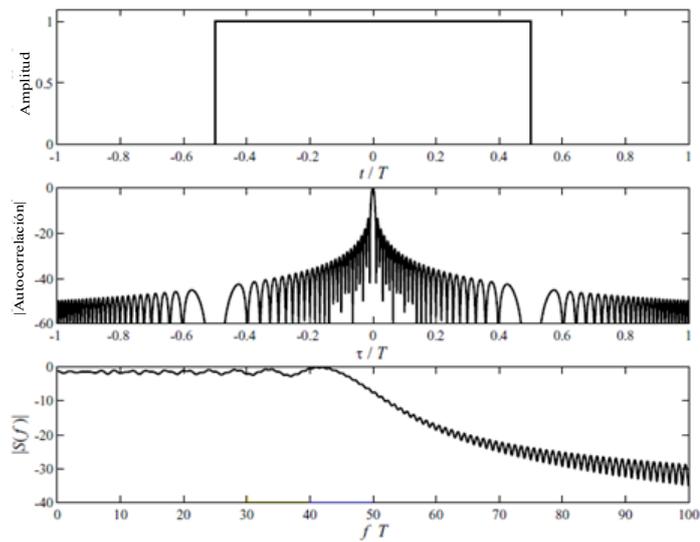


Figura 2.14: Amplitud, auto-correlación, y espectro de un pulso LFM no ponderado, $BT = 100$. [3]

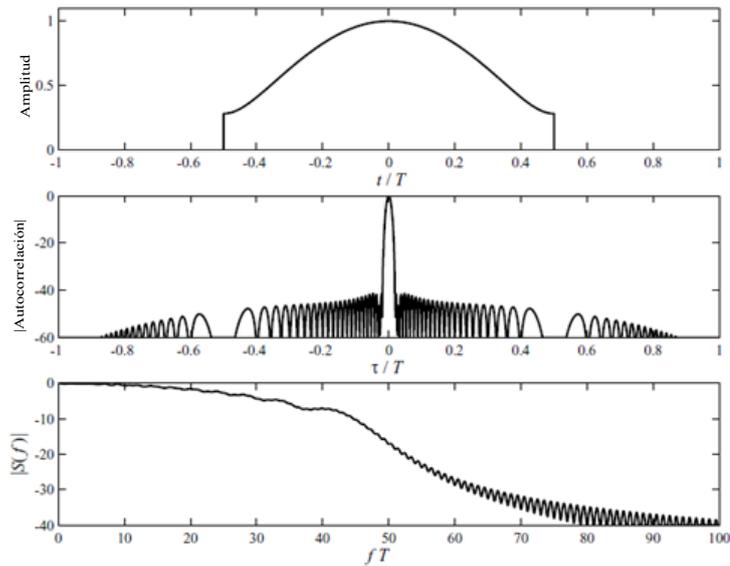


Figura 2.15: Amplitud, auto-correlación, y espectro de la raíz cuadrada un pulso LFM ponderado, $BT = 100$. [3]

$$U(f) = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{j\pi(kt^2 - 2ft)} dt = \frac{1}{2B} e^{-j\frac{\pi f^2}{k}} [Z(x_2) - Z(x_1)] \quad (2.30)$$

Donde $Z(x)$ es la integral compleja Fresnel

$$Z(x) = \int_0^x e^{j\frac{\pi\alpha^2}{2}} d\alpha = C(x) + jS(x) = \int_0^x \cos\left(j\frac{\pi\alpha^2}{2}\right) d\alpha + \int_0^x \sin\left(j\frac{\pi\alpha^2}{2}\right) d\alpha \quad (2.31)$$

Donde el argumento en 2.30 es

$$x_1 = -2f\sqrt{\frac{T}{2B}} - \sqrt{\frac{TB}{2}}, \quad x_2 = -2f\sqrt{\frac{T}{2B}} + \sqrt{\frac{TB}{2}} \quad (2.32)$$

Las funciones ambigüedades parciales (zoom en retraso y en Doppler) para un pulso con LFM no ponderado y para un pulso con LFM ponderado con la raíz cuadrada de la ventana de Hamming, ambos con $BT = 20$, se representan en las figuras 2.16 y 2.17. La ampliación del lóbulo principal y reducción de los lóbulos laterales es evidente. También es importante señalar que la reducción en el rango de los lóbulos laterales se debe a la ponderación que se mantiene incluso a altas frecuencias Doppler.

Finalmente, en la figura 2.18, se demuestra la diferencia entre la autocorrelación de la ponderación adaptada y la correlación cruzada de la ponderación no adaptada. Ambos casos se trata de un pulso con LFM con $BT = 20$ y ponderados con la ventana de Hamming. En la gráfica superior, tanto las señales de transmisión y referencia en el receptor incluyen una ponderación igual a la raíz cuadrada de la ventana de Hamming. En el grafico inferior, la señal transmitida tiene una amplitud uniforme, mientras que la amplitud de la señal de referencia se pondera de acuerdo a la ventana (completa) de Hamming. Ambos enfoques

de ponderación presentan una reducción considerable de lóbulos laterales comparada con el pulso con LFM no ponderado. Sin embargo, la correlación de la ponderación desadaptada es ligeramente peor que la ponderación adaptada [3].

2.4.3. Tren de Pulsos Coherentes

En los pulsos no modulados y LFM presentados, el volumen de la función ambigüedad (AF) se mantuvo concentrado en torno al origen. Además, la resolución Doppler se mantuvo $1/T$, donde T es la duración del pulso. En la tercera señal básica, la mayor parte del volumen de la AF se aleja del origen. Un pico estrecho de la unidad en el origen sigue siendo evidente. El título de esta sección hace hincapié en que el tren de pulsos coherente es construido a partir

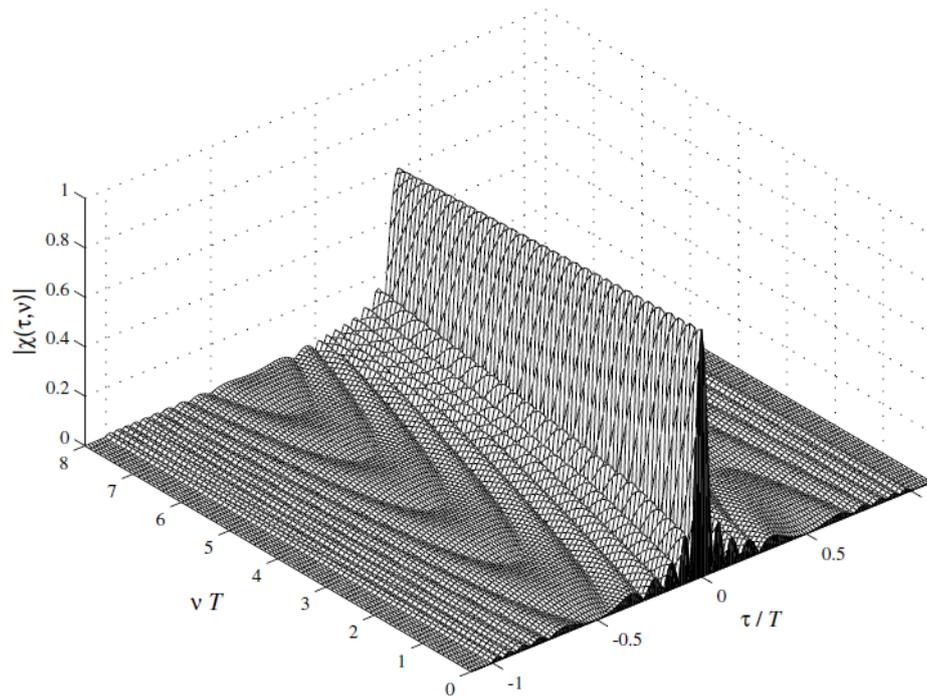


Figura 2.16: Función Ambigüedad Parcial de un pulso LFM con $BT = 20$. [3]

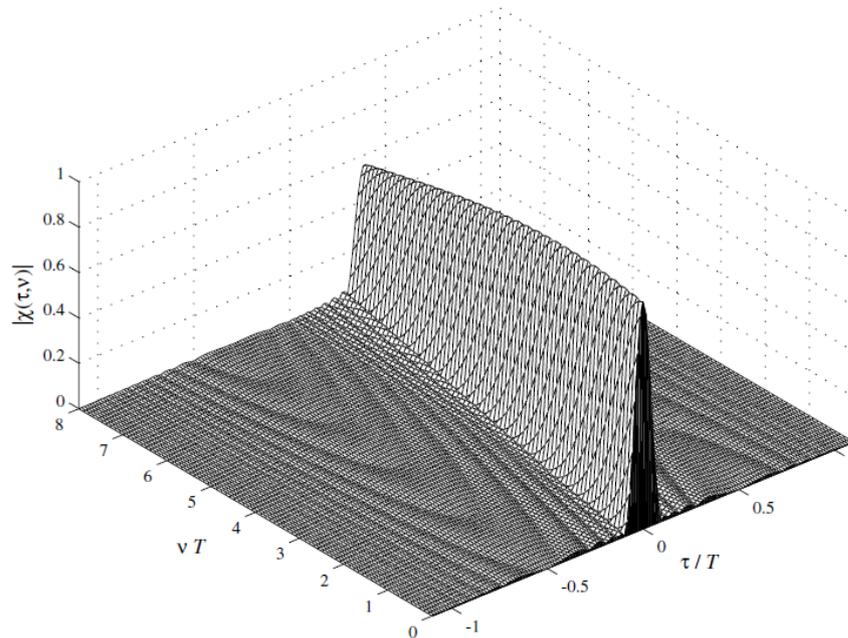


Figura 2.17: Función Ambigüedad Parcial de un pulso con LFM ponderado con la Ventana de Hamming con $BT = 20$. [3]

de pulsos idénticos. Este no es siempre el caso. En señales más sofisticadas cierta diversidad entre los pulsos se introduce, que tiene algunas ventajas [3]. El título también señala la naturaleza no modulada (o frecuencia constante, amplitud constante). Una vez más, hay más señales avanzadas en las cuales los pulsos en el tren están modulados (por ejemplo, LFM).

La coherencia de la señal (misma frecuencia portadora y fase inicial conocida de cada pulso) se explica por el hecho de que la señal está descrita por

$$s(t) = \text{Re} [u_N(t) e^{j2\pi f_c t}] \quad (2.33)$$

La envolvente compleja de un tren de N pulsos idénticos esta descrita por

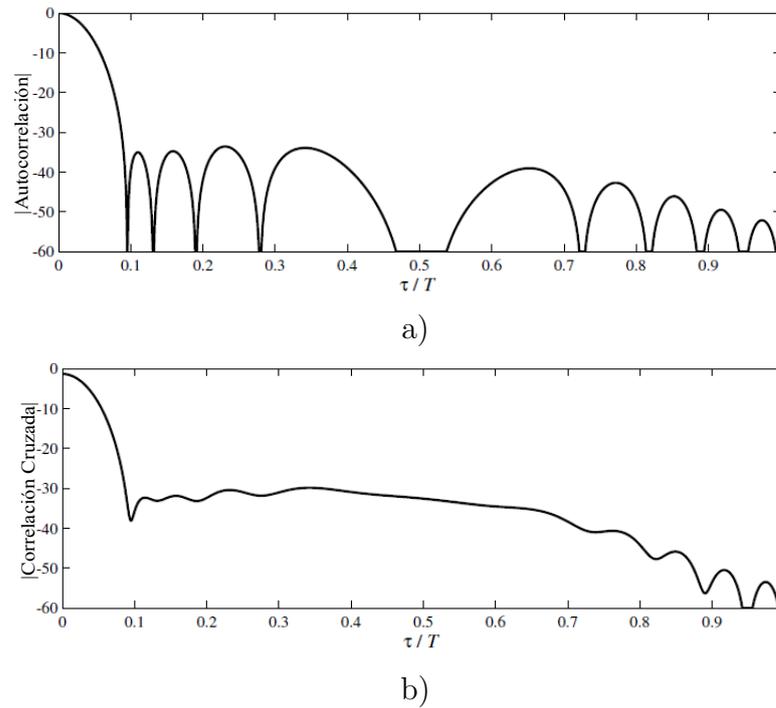


Figura 2.18: Respuesta Cero-Doppler de un pulso LFM ponderado con la ventana de Hamming ($BT = 20$): a) Ponderación adaptada; b) Ponderación en el receptor. [3]

$$u_N(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N u_1[t - (n-1)T_r] \quad (2.34)$$

Donde T_r es el intervalo de repetición del pulso. La naturaleza no modulada de cada pulso está implicada por

$$u_N = \frac{1}{T} \text{rect} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.35)$$

La función ambigüedad (AF) de un tren de pulsos para el caso práctico en el que $T < \frac{T_r}{2}$, tiene la siguiente expresión

$$|\chi(\tau, \nu)| = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{p=-(N-1)}^{N-1} |\chi_T(\tau - pT_r, \nu)| \left| \frac{\sin[N - |p|T_r]}{\sin(\pi\nu T_r)} \right| & \text{para } |\tau| \leq NT_r \\ 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.36)$$

Donde $|\chi_T(\tau, \nu)|$ es la AF de un pulso individual. Para un pulso no modulado $|\chi_T(\tau, \nu)|$ viene dado por

$$|\chi_T(\tau, \nu)| = \begin{cases} \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \frac{\sin[\pi T \nu (1 - \frac{|\tau|}{T})]}{\pi T \nu (1 - \frac{|\tau|}{T})} \right| & \text{para } |\tau| \leq T \\ 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.37)$$

Si se limita el retraso a la zona del lóbulo principal, es decir, $|\tau| \leq T$, entonces 2.36 se reduce a

$$|\chi(\tau, \nu)| = |\chi_T(\tau, \nu)| \left| \frac{\sin(N\pi\nu T_r)}{N \sin(\pi\nu T_r)} \right| \text{ para } |\tau| \leq T \quad (2.38)$$

Los dos (2) cortes de la AF se pueden obtener a partir de 2.36 y 2.37, resultando

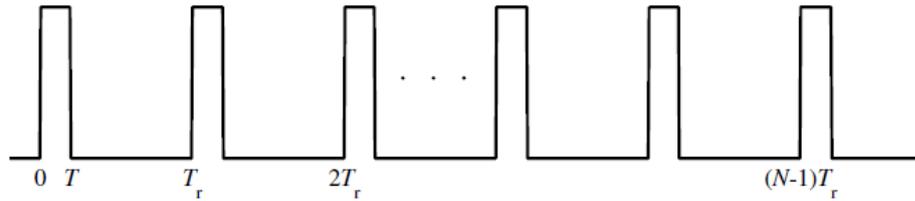


Figura 2.19: Envolvente de un tren de pulsos coherente. [3]

$$|\chi(\tau, 0)| = \begin{cases} \sum_{p=-(N-1)}^{N-1} \left(1 - \frac{|p|}{N}\right) \left(1 - \frac{|\tau - pT_r|}{T}\right) & \text{para } |\tau| \leq T \\ 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.39)$$

Y

$$|\chi(0, \nu)| = \left| \frac{\sin(\pi\nu T)}{\pi\nu T} \frac{\sin(N\pi\nu T)}{N \sin(\pi\nu T)} \right| \quad (2.40)$$

La función ambigüedad de un tren coherente de 6 pulsos con un ciclo de trabajo de 0.2 se grafica en la figura 2.20 y el correspondiente gráfico de contorno (desplazamientos Doppler positivos y negativos). La función ambigüedad de un tren de pulsos coherentes es frecuentemente llamada una cama de clavos. Los clavos se refieren a la malla de lóbulos recurrentes, en intervalos de T_r en el retraso (delay) y $1/T_r$ en el Doppler. Si se hubiese elegido N mucho mayor que 6 y un ciclo de trabajo mucho mas pequeño que 0.2, habría hecho que la figura 2.20 pareciera una cama de fakir.

El corte cero-Doppler, dado en 2.39 y mostrado claramente en la figura 2.20, es un conjunto de triángulos, todos con una base de $2T$, pero linealmente decreciente con la altura. Esto se puede explicar fácilmente. Alrededor de $\tau = 0$, todos los seis ($= N$) pulsos recibidos se superponen a los seis pulsos de referencia. Alrededor de $\tau = T_r$ solo cinco ($= N - 1$) pulsos se superponen, y así sucesivamente. Debido a que los pulsos son idénticos, la correlación entre los pulsos individuales mantiene la forma triangular. Sólo las alturas de los triángulos cambian para reflejar la disminución del número de pulsos que participan en la correlación cruzada entre las señales recibidas y las señales de referencia. El corte cero-retraso dado en 2.40 es un producto del corte cero-retraso (zero-delay) de un solo pulso, con la expresión $|\sin(N\pi\nu T_r) / N \sin(\pi\nu T_r)|$.

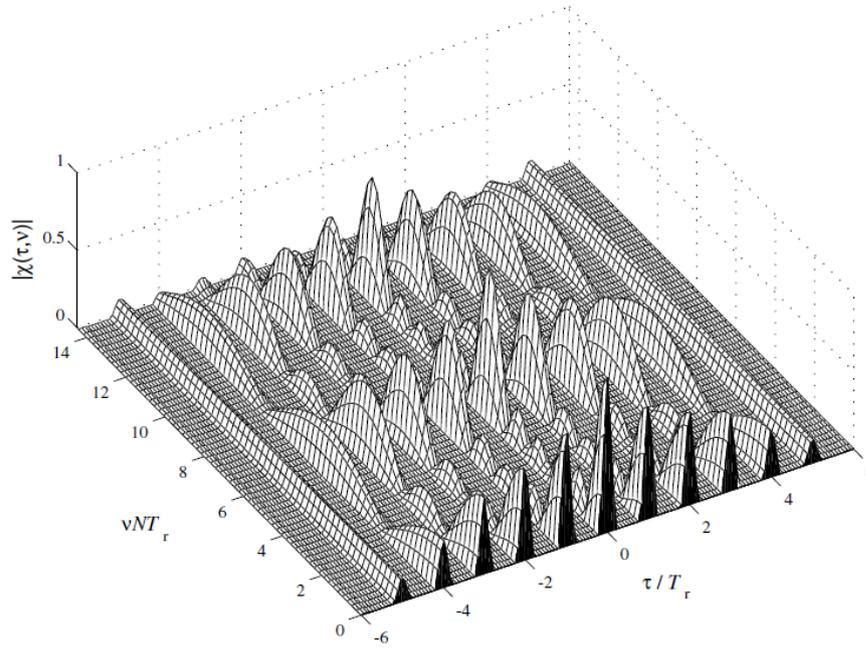


Figura 2.20: Función Ambigüedad parcial de un tren coherente de $N = 6$ pulsos. [3]

El corte aparece en la figura 2.22 (línea continua). La línea punteada es corte cero-retraso de la AF de un solo pulso. La figura 2.22 demuestra la gran mejora en la resolución Doppler, obtenida por el procesamiento coherente de N pulsos. También demuestra la ambigüedad Doppler causada por los recurrentes picos Doppler en intervalos de $1/T_r$. No marcado en la figura 4.19, pero notable, en la figura 2.23, el primer nulo Doppler se encuentra en $1/NT_r$ (es decir, en el inverso de la duración total de la señal coherente).

Como se puede observar en la figura 2.23, el tren de pulsos coherentes proporciona un control independiente de las resoluciones de retraso y Doppler que no eran posibles en el caso de un pulso individual. La resolución de retraso es controlada por la duración del pulso T , mientras que la resolución Doppler es controlada por la longitud de la señal total NT_r . Por otra parte, las ambigüedades doppler y retraso están vinculadas; ambas son funciones del intervalo de repetición T_r . Su producto, el cual es el área del rectángulo que conecta los cuatro lóbulos recurrentes, está dada por $T_r \cdot 1/T_r = 1$. Esta disyuntiva entre las ambigüedades

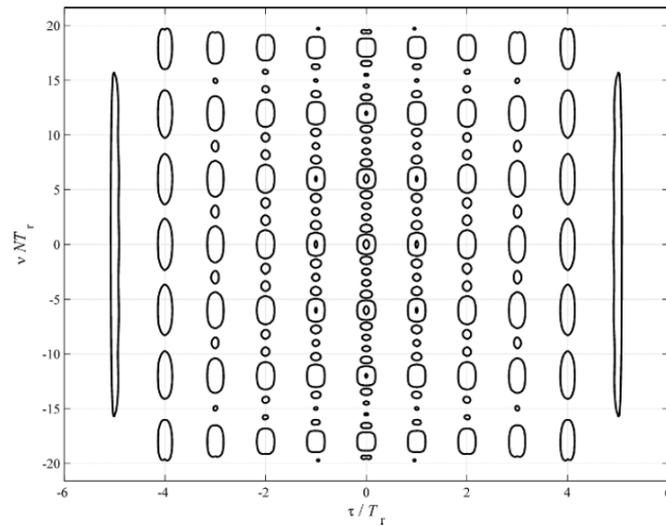


Figura 2.21: Los contornos 0.1 y 0.72 de la AF de un tren coherente de 6 pulsos. [3]

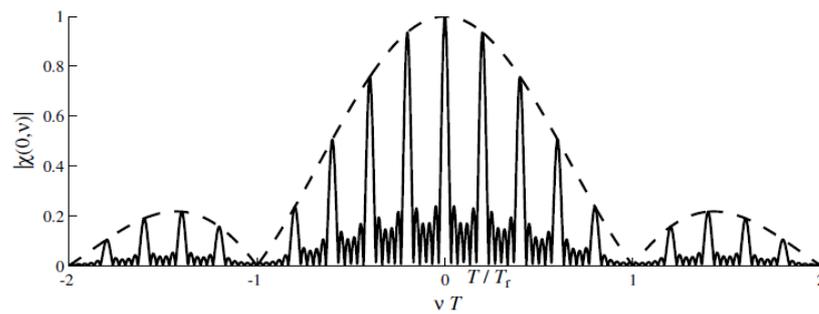


Figura 2.22: Corte CERO-Retraso de la función ambigüedad de 6 pulsos. [3]

Doppler (velocidad) y retraso (rango) es una dificultad inherente en el radar. Ésta es la causa para el parámetro de diseño que se refiere a la frecuencia de repetición (*PRF*) como baja, media o alta.

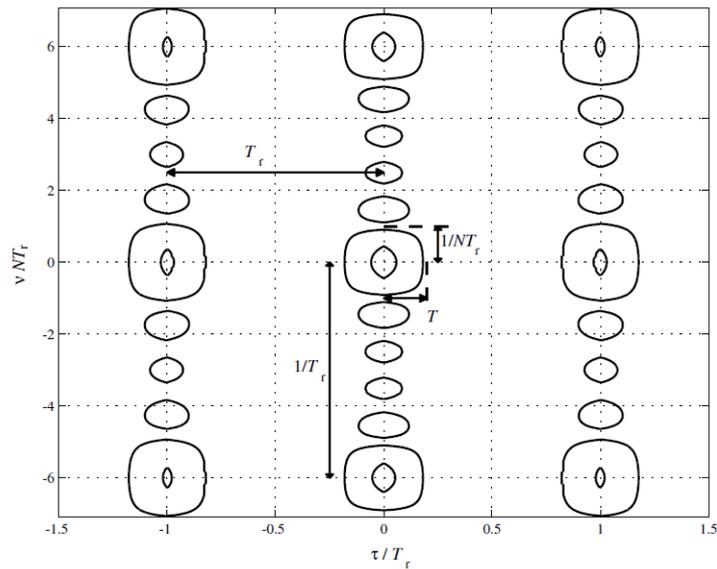


Figura 2.23: Resoluciones y Ambigüedades marcadas en un zoom de los contornos en la Fig. 2.21. [3]

2.5. Procesamiento de la señal

El procesamiento de la señal de radar puede ser definido como la manipulación de la señal recibida, representada en el formato digital, para extraer la información deseada mientras son rechazadas las señales no deseadas. En particular, un radar de vigilancia toma una decisión sobre la presencia o ausencia de blancos mientras anula los ecos causados por el terreno, señales de interferencia y fuentes de ruido. Un radar aerotransportado logra el mismo trabajo a pesar del fuerte ruido que retorna y su esparcimiento Doppler producto del movimiento de la plataforma. Un radar de seguimiento, además de la detección, se encarga de determinar con una estimación exacta de los parámetros cinemáticos del blanco. La lista podría extenderse a otros sistemas de radar como el de baja probabilidad de interceptación, el radar de apertura sintética, el radar multiestático y los radares para bases espaciales. Cualquiera que sea el sistema de radar, las operaciones básicas de desempeño para el procesamiento de la señal y datos son los siguientes: la detección de presencia de blanco, de haber uno; la extracción

de información de la forma de onda recibida para determinar los parámetros relevantes del blanco (como la posición, velocidad, forma y firma electromagnética). El primer paso para el diseño puede ser reconocer la formulación matemática de los modelos más coherentes con el entorno real en el cual opera el radar. Algunas áreas muy importantes de investigación y desarrollo son: teoría de optimización de detección, teoría de detección adaptativa, detección de señales con la función densidad de probabilidad no gaussiana (PDF por sus siglas en inglés Probability Density Function), procesamiento multidimensional y algoritmos de super-resolución. Algunas técnicas han sido implementadas en sistemas de radar reales con éxito [4].

2.5.1. MTI, MTD, Pulso Doppler

El indicador de blanco en movimiento (MTI), Detector de blanco en movimiento (MTD) y el pulso Doppler son conceptos de radar muy utilizados en esquemas de procesamiento para eliminar el ruido de los ecos y blancos detectados. En la Fig. 2.25 se muestra el diagrama de bloques de un sistema MTI coherente. Un radar de pulsos que emplea el desplazamiento Doppler para detectar blancos en movimiento puede ser un radar MTI o un radar Doppler pulsado. También existen radares de onda continua, que hacen uso del desplazamiento Doppler. Un radar MTI tiene una PRF suficientemente baja para que no se presenten ambigüedades en alcance, pero que sin embargo tendrá muchas ambigüedades en el dominio Doppler. Por otra parte, el radar pulsado Doppler presenta numerosas ambigüedades en alcance, dada su alta PRF, pero evita, con este valor precisamente tan alto de la PRF, las ambigüedades en el dominio Doppler. Existen también radares que tienen una PRF intermedia que no puede evitar ninguno de los dos tipos de ambigüedades pero las presenta de una manera moderada en ambos casos. Además de permitir la detección de blancos en movimiento en medio de clutter, el fenómeno del desplazamiento Doppler permite obtener otros datos de interés, como medir la velocidad de un blanco, obtener imágenes radar de alta resolución o permitir que

los radares meteorológicos obtengan información sobre el vector de la velocidad del viento. En la Fig. 2.24 se presenta el diagrama de bloques de un detector de blancos en movimiento.

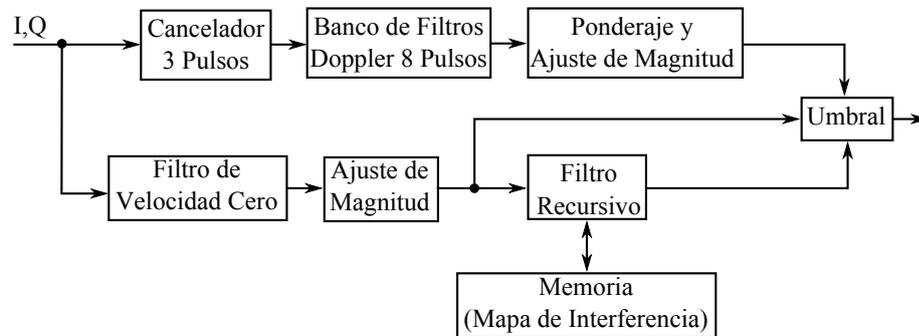


Figura 2.24: Diagrama de bloques de un Detector de Blanco en Movimiento (MTD).[4]

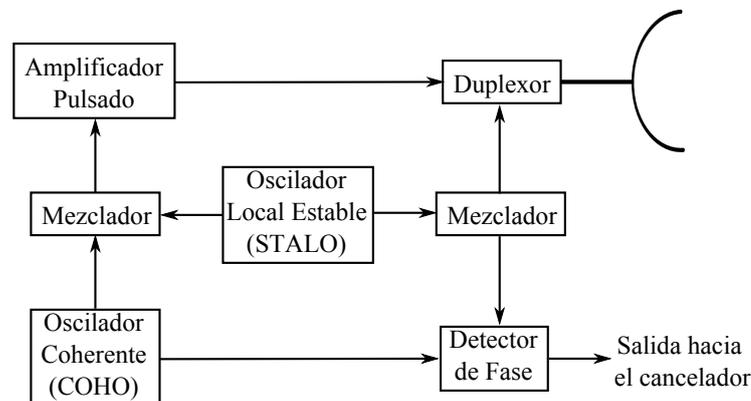


Figura 2.25: Sistema MTI coherente.[5]

2.5.2. Razón de Falsa Alarma Constante (CFAR)

La razón de falsa alarma constante (CFAR) es una propiedad de umbral o control de ganancia de los dispositivos que mantienen una aproximada razón constante de falsa detección de blanco cuando el ruido y/o las señales de interferencia que entran al detector son variables. Las técnicas de CFAR son usadas en recepción y procesamiento de la señal para evitar incremento en la razón de falsas alarmas en la presencia de inhibidores, ruido residual u otras fuentes de inferencia. Típicas técnicas de CFAR se muestran en la Fig. 2.26.

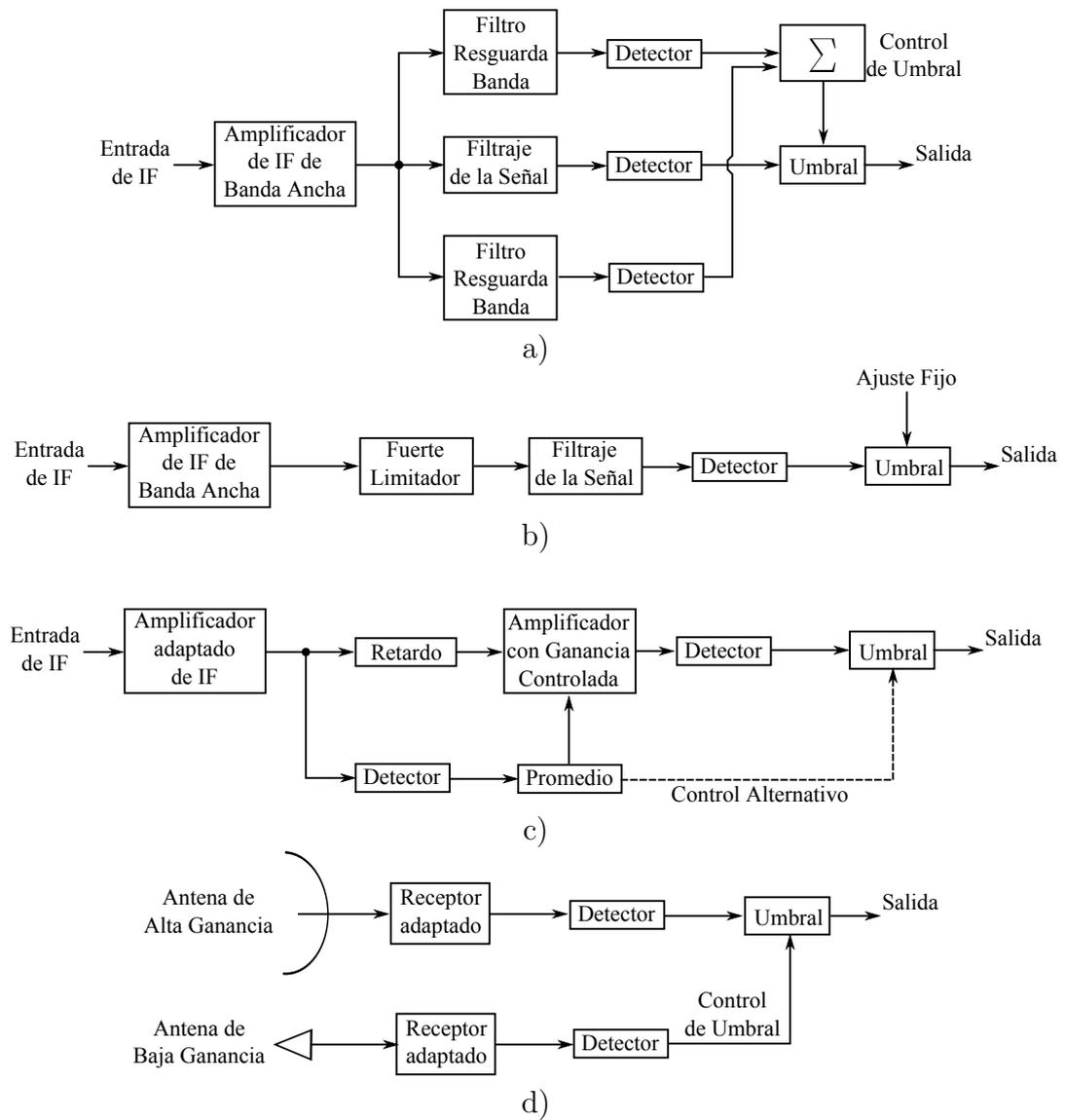


Figura 2.26: Técnicas de CFAR: a) Sistema resguarda banda; b) Sistema fijo; c) ACG de alcance promediado; d) Blanco de lóbulo lateral. [5]

El uso de circuitos CFAR protege para un exceso de alarmas falsas, pero con el costo de la eliminación de blancos situados en regiones de fuerte interferencia [4].

2.5.3. Procesamiento adaptativo

El procesamiento adaptativo de las señales aplica a tres diferentes tipos de radares, concretamente: 1. Con base terrena o en embarcaciones para cancelación de ruido, 2. Radares con base terrena o en embarcaciones con equipos de multicanal en arreglos de antenas para cancelación de interferencias, 3. Radares aerotransportados con alerta avanzada (AEW por sus siglas en inglés Airborne Early Warning) equipados con arreglos de antenas multicanal para cancelación de interferencia y ruido.

En cualquiera de los tres casos los ecos recibidos son convertidos a formato digital y el procesamiento adaptativo de la señal se realiza de forma digital. Lo común de las tres aplicaciones es el tipo de procesamiento adaptativo en el cual se toma una apropiada combinación lineal (asumiendo que los ecos son PDF gaussiana) de la señal recibida por el radar. La salida del filtro es detectada y comparada con el umbral de detección apropiado para maximizar la probabilidad de detección (P_d) y para obtener una probabilidad prescrita de falsa alarma (P_{fa}). Denotando N como el número de grados de libertad usados en el procesamiento adaptativo, por ejemplo, la dimensión del vector que contiene los datos instantáneos del radar a cierto instante de muestreo. En la primera área de aplicación N (separados un tiempo T , donde T es el tiempo de repetición de pulsos del radar) es el número de ecos capturados por el receptor del radar los cuales son comparados con un tren de N pulsos coherentes transmitidos por el radar. El clutter de interferencia es cancelado por el filtro adaptativo, el cual interfiere en el intervalo de frecuencia Doppler ocupado por el espectro del clutter. El filtro coloca un pico en la frecuencia Doppler esperando la presencia de un blanco para ser detectado. En la segunda área de aplicación, N es el número de sub-arreglos (en el cual se descomponen la antena del radar) y está asociado a los canales de recepción. Las señales de interferencia son canceladas ajustando el patrón de recepción de la antena colocando mínimos o nulos en la dirección de llegada de estas señales. En la tercera aplicación, N es el producto del número de ecos recibidos, separados T segundos, y el número de sub-arreglos en el cual la apertura del

arreglo es descompuesta. Ambos el clutter y las señales de interferencia son canceladas por la síntesis que realiza un filtro de dos dimensiones que opera en las cercanías de la frecuencia Doppler y en la dirección de arribo. Este tipo de filtrado es conocido como *procesamiento adaptativo espacio tiempo* (STAP por sus siglas en inglés). El problema común de las tres aplicaciones es el cálculo en tiempo real de los pesos que son usados en la combinación lineal para la obtención de la salida del filtro. Mientras la señal deseada puede ser asumida como conocida a priori, la señal de interferencia no lo es, adicionalmente es variante en el tiempo y espacio, esto significa que la característica de interferencia (representada por una matriz de covarianza) tiene que ser estimada en tiempo real [4].

2.6. Aplicaciones

Es sabido de la utilización del radar en el control del tráfico aéreo y en el control policial de la velocidad en el tráfico vehicular. Además, estos están siendo utilizados en sistemas especiales que permiten formar, mediante un elaborado procesamiento de la señal radar, imágenes de la superficie planetaria con resoluciones del orden de algunos metros. Las aplicaciones potenciales de estos sistemas son innumerables: cartografía de zonas de alta nubosidad (inaccesibles mediante sensores ópticos), obtención de modelos topográficos a escala mundial de alta precisión, exploración de otros planetas o satélites con atmósfera, determinación de recursos hídricos, vegetación, clasificación de cultivos, entre otros. En la tabla 2.2 se muestra en resumen las aplicaciones de un sistema de radar, con su respectiva banda de frecuencia.

2.6.1. Radares Meteorológicos (Radar Doppler)

Los radares meteorológicos son los únicos equipos capaces de seguir y predecir el comportamiento de eventos meteorológicos significativos como fuertes tormentas, tornados, lluvias,

Tipo de Aplicación	Aplicación Específica	Banda Usual
Vigilancia aérea	Advertencia temprana de largo alcance. Intercepción controlada por tierra, vigilancia de ruta aérea. Adquisición para sistemas de armas, localización de altura (radares tridimensionales), evitar colisiones aéreas.	UHF, L L S
Vigilancia de Espacio y Misiles	Advertencia temprana de proyectiles, adquisición de misiles, vigilancia satelital	VHF, UHF
Vigilancia del Campo de Batalla e Investigación de superficies	Búsqueda en el mar, navegación y evitar colisiones, y levantamientos topográficos. Localización de artillería y morteros. Control de tráfico aéreo, detección de intrusos, evitar colisiones de vehículos en tierra.	X, K _u , K _a S, C K _u , K _a
Radar Meteorológico	Observación y pronóstico del clima, indicadores de nubosidad y visibilidad.	S, C
Seguimiento y guiado	Control de fuego antiaéreo, control de fuego en tierra, guiado de misiles, calibración de instrumentos, precisión en acercamientos y aterrizajes. Armamento inteligente (proyectiles, bombas)	C, X, K _u K _a , V, W
Astronomía y Geodesia	Observación planetaria, visión general de la tierra, sondeo de la ionosfera	VHF, UHF, L

Tabla 2.2: Aplicaciones del Radar. [5]

entre otros [2]. Estos eventos se caracterizan por afectar áreas pequeñas pero con importantes daños y se desarrollan y evolucionan muy rápidamente por lo que debe contarse, para alertar sobre los mismos, con instrumentos de medición en tiempo real dentro de áreas relativamente pequeñas.

En la actualidad, es posible, incluso para empresas privadas, la instalación y operación de un radar doppler para prevenir inconvenientes de origen meteorológico en sus actividades.

Empresas de pesca, petroleras, centros de deportes invernales, entre otras, pueden reducir drásticamente los inconvenientes en sus actividades con la utilización de un radar doppler, evitando pérdidas, daños al medio ambiente y riesgos a la vida humana.

2.6.2. Radio Navegación

La radio navegación es la rama de la ciencia y técnica que proporciona los métodos de ingeniería de radio y ayudas para la navegación de embarcaciones, aeronaves, naves espaciales, y otros vehículos [6]. Típicamente, los sistemas de radio navegación son clasificados según las siguientes características:

1. **El modo de ubicación del objeto:** posicional (localización angular) o sistemas no posicionales.
2. **El tipo de parámetro medido:** sistemas de medición de amplitud, tiempo, frecuencia o fase.
3. **Banda de uso:** de decímetros a frecuencia ópticas.
4. **Rango de operación:** espacio, global, sistemas de navegación de corto o largo alcance.
5. **Ubicación de la estación de referencia:** sistemas con base terrena o base espacial.

La ayuda en la navegación moderna consiste en indicar la dirección de radio utilizada en una de las siguientes formas: un avión o barco toma la dirección a partir de transmisores instalados en tierra y fija su posición relativa a dos o más transmisores, o toma la dirección mediante estaciones terrestres en una transmisión que desde un avión o un barco se correlacionan a un centro, lo que establece la posición del aparato. En la tabla 2.3 se muestra un resumen de las técnicas y característica de los sistemas de navegación a nivel mundial.

Sistema	Frecuencia (MHz)	Número de Estaciones
Omega	0.01 -0.014	8
Loran-C/Chaika	0.1	50
Decca	0.07-0.13	150
Beacons	0.2-0.16	5000
VOR	108-118	2000
DME	960-1215	1000
Tacan	960-1215	1500
ILS	108-112 y 329-335	200
MLS	5000-5250	117
JTIDS-RelNav	960-1220	Variable
PLRS	960-1215	Variable
SSR/IFF	420-450	800
TCAS	1030 y 1090	
Transit	150 y 400	7 satélites
GPS	1575 y 1227	24 satélites
GLONASS	1602-1616 y 1246-1257	
Altimeter	4200-4400	
Mapping radar	Varias	
Map matching	Varias	
Doppler radar	13 y 325	
Inertial		
Celestial	Ópticas	

Tabla 2.3: Sistemas de radio navegación a nivel mundial.[5]

2.6.3. Control de Trafico Aéreo (ATC)

El servicio de control del tráfico aéreo, también conocido por sus siglas en inglés ATC (Air Traffic Control) es requerido en los aeropuertos por los siguientes factores: seguridad y eficiencia. Para esto un controlador de tránsito aéreo, se encarga profesionalmente de dirigir el tránsito de aeronaves en el espacio aéreo y en los aeropuertos, de modo seguro, ordenado y rápido, autorizando a los pilotos con instrucciones e información necesarias, dentro del espacio aéreo de su jurisdicción, con el objeto de prevenir colisiones, principalmente entre aeronaves y obstáculos en el área de maniobras.

Los controladores trabajan en los Centros de Control de Área, ACC, en la Torre de Control, TWR o la Oficina de Control de Aproximación, APP, donde disponen de varios sistemas electrónicos y de computación, que les ayudan en el control y gestión del tráfico, como el Radar, el cual detecta los objetos que vuelan dentro de su espacio aéreo y a través de programas computacionales, los presenta en las pantallas del radar, que les facilitan la gestión y progreso de los vuelos en sus posiciones de control.

Algunos de los sistemas de radar comúnmente usados en el ATC son los siguientes:

- **Radares “En Route”:** estos sistemas operan usualmente en banda L. Inicialmente detectan y determinan la posición, curso y velocidad de los blancos aéreos en un área relativamente amplia de hasta 250 millas náuticas (NM).
- **Radar de Vigilancia Aérea (ASR):** también conocidos por sus siglas en inglés ASR (Air Surveillance Radar), es un radar de control de acercamiento usado para detectar y exhibir la posición de aeronaves en el área del terminal. Generalmente operan en banda S, y son capaces de detectar y seguir fiablemente aeronaves a más de 7620 m de altura y a una distancia entre 75 a 110 Km de sus aeropuertos.
- **Radar de acercamiento de precisión (PAR):** también conocidos por sus siglas en inglés PAR (Precision Approach Radar), ubicado en una estación terrena por su modo de control en el cual una aeronave puede aterrizar en mal tiempo. El piloto es guiado por la estación de control usando un radar de acercamiento de precisión. La información de orientación es obtenida por el operador del radar y pasada a la aeronave por otros sistemas de radio comunicación o un enlace por computadora a la aeronave.
- **Radar de Movimiento en Superficie (SMR):** también conocidos por sus siglas en inglés SMR (Surface Movement Radar), explora la superficie del aeropuerto y localiza la posición de aeronaves y vehículos en tierra y los muestra a los controladores de tráfico aéreo en mal tiempo. Estos sistemas operan de banda K_u a X y usan un ancho de pulso

extremadamente corto para así obtener un rango de resolución aceptable. Los SMR son parte del equipo de detección en superficie del aeropuerto.

- **Radars Meteorológicos de Aplicaciones Especiales:** los radares meteorológicos son muy importantes para la gerencia de tráfico aérea. Estos radares meteorológicos son especialmente diseñados para la seguridad del tráfico aéreo.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se expondrán las metodologías escogidas y utilizadas para la realización, implementación y cumplimiento de los objetivos planteados para el presente proyecto.

La presente investigación propone el desarrollo de un algoritmo de simulación que permita diseñar los esquemas básicos de un sistema de radar de navegación civil y presenta una experiencia para ser aplicada en el laboratorio de comunicaciones, como material de apoyo didáctico para el aprendizaje de los fundamentos de los sistemas de radar.

3.1. Tipo de Investigación

Metodológicamente, la investigación se inicia como exploratoria y finalizará como proyecto factible, ya que pretende aumentar el grado de familiaridad con los sistemas de radar, se identificará y estudiará el proceso de implementación de un sistema de radar de navegación civil, analizando las diferentes etapas a través de las cuales se obtiene la imagen final del radar.

Según Hernández, Fernández y Baptista (1991) los estudios exploratorios se efectúan, normalmente, cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura reveló que únicamente hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio.

Por su parte un proyecto factible, según el Manual de Trabajos de Grado de Especialización, Maestría y Tesis Doctorales de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (1998): “consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos.”

3.2. Técnicas de Recopilación de Datos

3.2.1. Análisis Documental

En la recopilación de datos se efectuó un análisis bibliográfico, en donde se encontró la documentación necesaria de los distintos tipos de radar, de las formas de onda para radares, de los ámbitos de trabajo de los radares, entre otras aspectos de interés, consultando publicaciones, páginas de internet, libros y revistas técnicas especializadas en radares, que facilitaron la obtención de información.

3.3. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Para el manejo de datos y procesamiento de la información se trabajó una etapa de simulación y otra de implementación.

3.3.1. Etapa de Simulación

En esta fase se elaboró primero el modelo matemático del radar y, luego el diseño de las distintas etapas que componen el sistema, obteniendo así las diversas respuestas de cada una de ellas, dependiendo de la entrada al sistema.

3.3.2. Etapa de Implementación

Los análisis de datos se realizaron mediante pruebas al simulador, comparando los resultados obtenidos por cálculos teóricos, con los resultados arrojados por el mismo. De esta manera se analizó el software utilizado con el fin de diseñar la interfaz gráfica de usuario, a través de la cual el operador interactúe de una manera más amigable y pueda variar cualquier parámetro de entrada.

3.3.3. Procedimiento Metodológico

Se refiere al plan o estrategia concebida para responder a las preguntas de investigación (Christensen, citado en Hernández, 1991).

La metodología utilizada en esta investigación fue implementada en dos fases principales:

Fase 1: Estudio preliminar.

- **Revisión bibliográfica.** Se realizó una revisión de libros que abarcan temas de los principios de los radares, sistemas de radio-navegación en distintos ámbitos y procesamiento digital de señales. Asimismo, se realizaron visitas virtuales a las bibliotecas de Universidad Simón Bolívar, Universidad Central de Venezuela así como a universidades, tecnológicos y centros de investigación de otros países con el fin de revisar artículos

publicados acerca del uso de sistemas de radares. Varios de estos artículos se encuentran mencionados en las referencias bibliográficas y en los antecedentes.

- **Análisis de las características y principios básicos de los radares.** Se realizó un primer análisis de los principios básicos y funcionamiento del radar apoyado en estudios precedentes que pudieran aportar información, encontrados en los artículos revisados en el procedimiento anterior. Se revisó de forma general la base teórica disponible para conformar el modelo conceptual de un sistema de radio navegación civil.

Fase 2: Modelo Conceptual y Simulación.

- **Construcción del modelo conceptual.** A partir de los diversos elementos que conforman el modelo a simular y su interacción, y utilizando los métodos y herramientas matemáticas adecuados, se construyó el modelo conceptual de las etapas de interés a estudiar.
- **Verificación del modelo conceptual.** Se verificó el modelo conceptual introduciendo valores de las coordenadas de ubicación del objeto a identificar y analizando y contrastando las soluciones de las posiciones obtenidas con la información y datos recopilados de cálculos teóricos. Se presenta este análisis en el capítulo 4.
- **Definición de los objetivos específicos en la simulación.** Se determinó exactamente el funcionamiento que se desea lograr del sistema, los requerimientos o características que tendrá y las limitaciones que se impondrán al mismo.
- **Construcción del modelo computacional (simulador).** Se refiere a programar el modelo conceptual en el lenguaje elegido, compilar y depurar el programa simulador. Durante este proceso, se determinaron las características mínimas y recomendables del hardware, para lograr tiempos de simulación y resultados aceptables.

- **Verificación del modelo computacional.** La correspondencia entre el modelo computacional elaborado y el modelo conceptual se verifico, comparando las variables de salida que de él se obtienen con los cálculos teóricos. Se mostrará en el Análisis de resultados del capítulo 4.

3.4. Descripción del Algoritmo para Sistema de Radar

En este apartado se describe el algoritmo para los sistemas de radar básicos, empleando las tres señales estudiadas en el apartado 2.4. El algoritmo se divide en dos secciones: la primera sección determina la posición del objeto y la segunda determina su velocidad, siempre y cuando la señal transmitida sea un tren de pulsos, ya que no es posible resolver corrimientos Doppler en un único pulso debido a que un intervalo de tiempo de observación corto da una pobre resolución de frecuencia. Cuando la señal transmitida es un pulso (de frecuencia constante o LFM) el algoritmo solo determina la posición del blanco, en la Figura 3.1 se muestra el esquema general del algoritmo.

3.4.1. Entrada de datos

A partir de la ejecución de **Radarsim.m** se deben proporcionar, a través de una interfaz gráfica, al programa los siguientes parámetros:

- Señal a transmitir.
- Tiempo de Estudio.
- Ancho de Pulso.
- Frecuencia de Repetición de Pulsos / Ancho de Banda del Pulso.

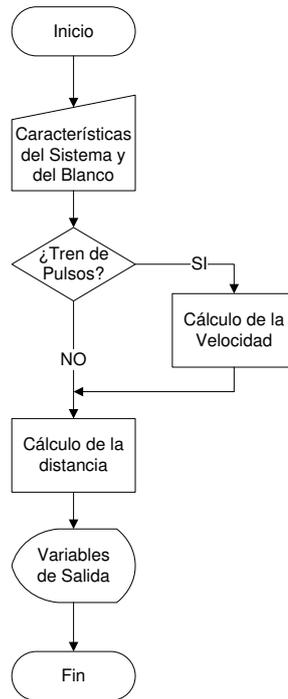


Figura 3.1: Esquema general del algoritmo empleado para determinar la posición y velocidad de un objeto.

- Tensión Pico.
- Ganancia de la Antena.
- Ganancia Máxima del Amplificador.
- Frecuencia Intermedia.
- Orden de Muestreo.
- Ancho de Banda del Sistema.
- Frecuencia de Operación.
- Sección Recta de Radar.
- Distancia del Blanco.

- Velocidad del Blanco.
- Visualizar PPI.
- Tipo de Filtro: Pasa Bajas o Pasa Banda.
- Tipo de Filtro 2: Butterworth, Chebyshev Tipo 1, Chebyshev Tipo 2 o Elíptico.
- Representación: Señal Transmitida, Señal Recibida, Señal Procesada o Respuesta en Frecuencia del Filtro.

3.4.2. Cálculo de la distancia

Una vez se han cargado los datos de entrada al sistema, se procede a realizar los cálculos necesarios para conocer la distancia estimada del blanco, a la señal transmitida se le adiciona ruido y se simula el efecto de atenuación y retardo debido a la distancia, luego se multiplica por la sección recta del radar referente al blanco, esta señal alterada se toma como la señal recibida y se procesa para lograr determinar la distancia. Este procedimiento se ilustra en la Figura 3.2.

3.4.3. Cálculo de la velocidad

En caso de la señal transmitida sea un tren de pulsos el sistema de radar puede determinar la velocidad. En la Figura 3.3 se ilustra el procedimiento de cálculo. La señal reflejada sufre un corrimiento en frecuencia debido a la velocidad radial del blanco, tanto la señal recibida como la transmitida son procesadas en el dominio de la frecuencia con la finalidad de determinar el corrimiento Doppler entre ambas y así obtener la velocidad del blanco.

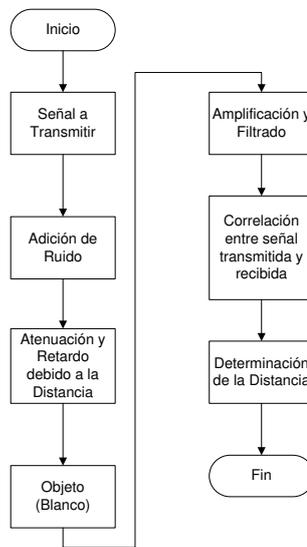


Figura 3.2: Diagrama para el Análisis de la Distancia.

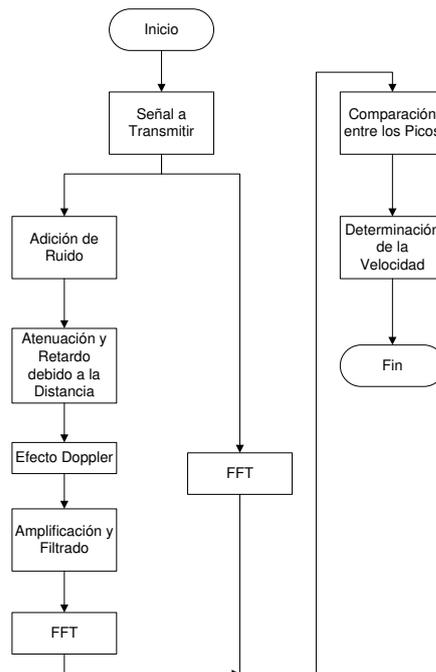


Figura 3.3: Diagrama para el Análisis de la Velocidad.

3.5. Descripción del Algoritmo para CTA

Este algoritmo se esquematiza de manera general en la Figura 3.4 y posteriormente se explica con un mayor grado de detalle haciendo mención a una gran cantidad de rutinas y subrutinas desarrolladas en MATLAB/SIMULINK® cuyos diagramas de flujos se muestran en secciones posteriores.

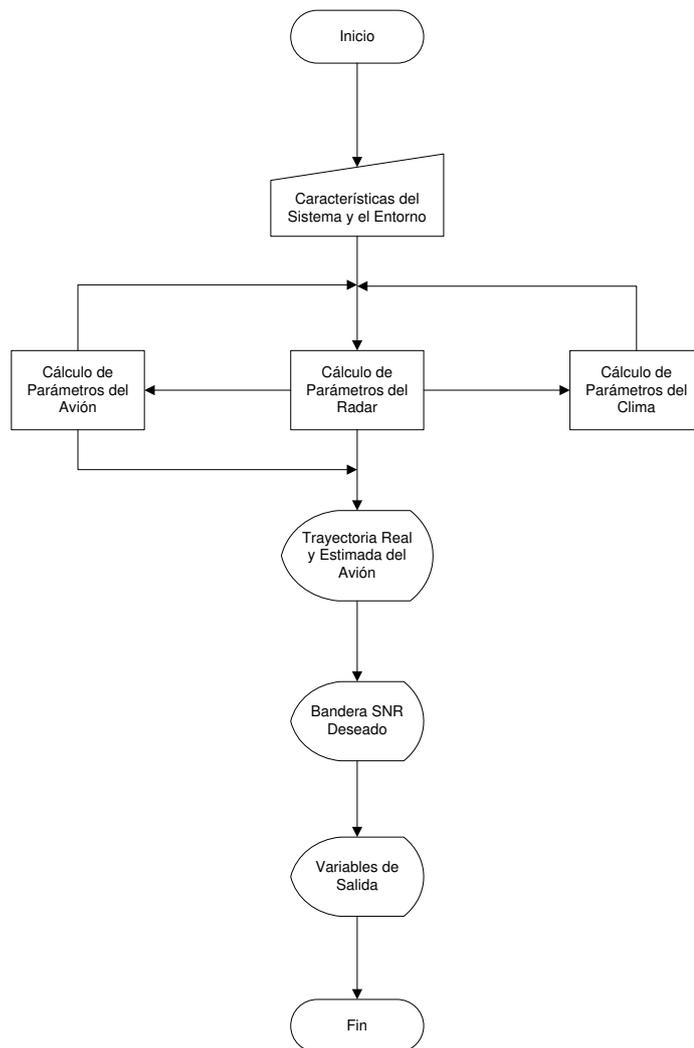


Figura 3.4: Esquema general del algoritmo empleado para el control de tráfico aéreo.

3.5.1. Entrada de datos

Primeramente a partir de la ejecución de **CTA_final.m** se deben proporcionar, a través de una interfaz gráfica, al programa los parámetros descritos en la tabla 3.1.

Parámetros de entrada	Descripción
Banda de operación	Define la banda de frecuencias sobre la cual trabajara el radar.
Frecuencia de operación / Longitud de onda	Define la frecuencia de operación del radar y automáticamente la longitud de onda correspondiente.
Potencia del transmisor	Define la potencia (en kilovatios) del transmisor del radar.
Pérdidas	Define las pérdidas adicionales en el sistema de radar.
Factor de ruido	Define la relación en decibelios entre la SNR de entrada y la SNR de salida al receptor
Eficiencia de la antena	Representa la eficiencia de la antena de transmisión/recepción.
Alcance del radar	Define el alcance máximo del radar en millas náuticas.
Ancho del haz de media potencia en elevación	Define la longitud del arco a cubrir en elevación en millas náuticas.
Ancho del haz de media potencia azimutal	Define la longitud del arco a cubrir latitudinalmente en millas náuticas.
Resolución en distancia	Define la distancia mínima, en metros, existente entre dos blancos para poder ser reconocidos.
Producto tiempo-ancho de banda	Representa la compresión de pulsos de la señal transmitida.
SNR deseado	Define la relación señal a ruido deseada en el sistema de radar.
Temperatura de trabajo	Define la temperatura de trabajo de la antena de transmisión/recepción.
Condiciones meteorológicas	Define las condiciones meteorológicas existentes en el entorno alrededor del radar.
Tasa de precipitación	Define la tasa de precipitación según las condiciones meteorológicas en mm/h.
Trayectoria del avión y Distancia Máxima	Define la trayectoria que describe el avión.

Tabla 3.1: Parámetros de entrada del programa principal del sistema de control de tráfico aéreo.

3.5.2. Cálculo de parámetros del avión

Básicamente este subsistema determina la potencia reflejada por el avión a partir de los parámetros de entrada, de la ganancia de la antena (calculada en el subsistema del radar), el algoritmo de este subsistema se muestra en la Figura 3.5.

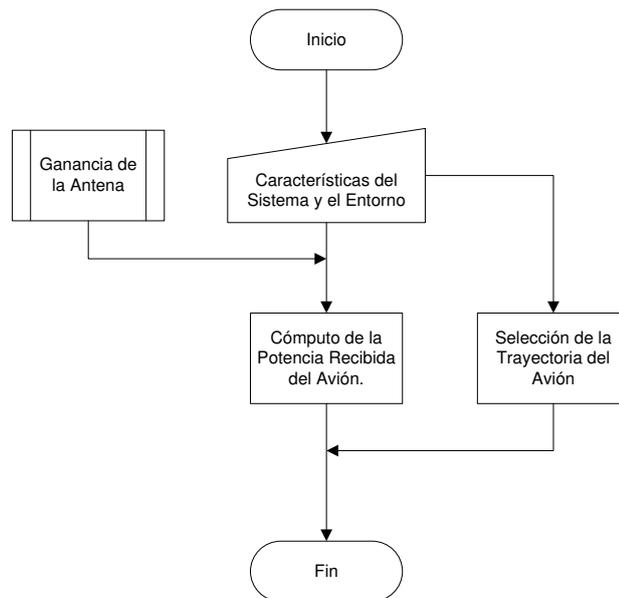


Figura 3.5: Esquema general del algoritmo empleado para calcular la potencia reflejada por el avión y su trayectoria.

3.5.3. Cálculo de parámetros del clima

Este subsistema es empleado para determinar la potencia reflejada por las condiciones meteorológicas en el entorno en el cual trabaja el radar, básicamente el subsistema determina la reflectividad total por causa de precipitación en el volumen efectivo de dispersión en el cual las condiciones meteorológicas son definidas por la tasa de precipitación, mediante la siguiente expresión

$$\sigma_{TC} = V_{ED} \times \frac{5,7 \times 10^{-14} r^{1,6}}{\lambda^4} \quad (3.1)$$

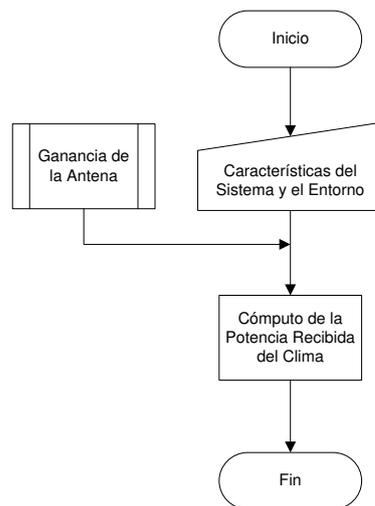


Figura 3.6: Esquema general del algoritmo empleado para calcular la potencia reflejada según las condiciones meteorológicas.

3.5.4. Cálculo de parámetros del radar

Una vez cargado los parámetros de entrada del modelo de MATLAB/SIMULINK® en el subsistema del radar, se procede a realizar los cálculos referentes al rango estimado, las características de la antena (ganancia, ángulos de media potencia y área de la misma), ruido del sistema, pérdidas y relación señal a ruido.

Para estimar el rango del avión el subsistema realiza dos comparaciones: la primera compara la relación señal a ruido estimada con una señal a ruido mínima de 2 dB predefinida para el subsistema, por su parte la segunda compara la distancia a la cual se encuentra el avión con el alcance del radar, de cumplirse que la señal a ruido estimada sea mayor a 2 dB y la distancia del avión sea menor o igual que el alcance del radar, entonces el sistema

está en capacidad de determinar la distancia a la cual se encuentra el avión. En la figura 3.7 se muestra el algoritmo que aplica este subsistema.

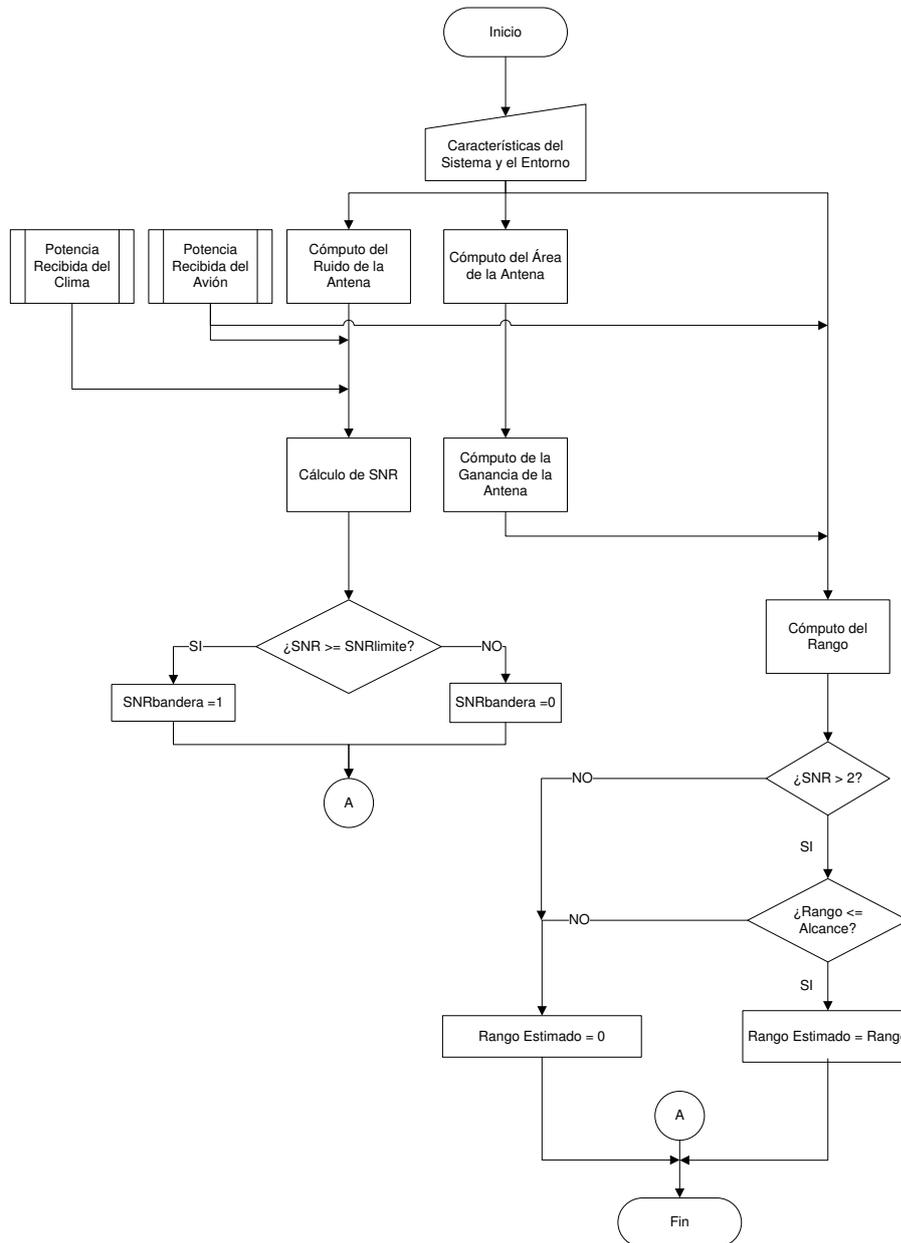


Figura 3.7: Esquema general del algoritmo empleado para el subsistema del radar de control de tráfico aéreo.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describen brevemente las simulaciones desarrolladas para concretar la validación del trabajo. Debido a que el simulador de radar RADARSIM UC es un software de tipo académico sólo será necesario hacer dos tipos de pruebas, entre las tantas que hay para un software de esta naturaleza. Estas pruebas son:

1. **Pruebas de estabilidad:** Las cuales permiten verificar si el programa colapsa en algún punto de su operación, cuando el usuario intente ejecutar alguna de sus funciones.
2. **Pruebas de desempeño:** Las cuales permiten comparar las funciones de un software con los cálculos teóricos, a fin de comprobar el funcionamiento óptimo del mismo.

4.1. Pruebas de Estabilidad

Aquí se presentan varios posibles escenarios de inestabilidad, por ejemplo que el usuario introduzca valores alfabéticos o alfanuméricos; en este caso, el programa enviará un mensaje de error que indica la necesidad de introducir un valor numérico, y no permite la ejecución del programa hasta tanto no se introduzca dicho dato. Por otra parte, para la aplicación del sistema de radar, si se introducen parámetros que no cumplan con las limitaciones en distancia o que sean muy exigentes para el cálculo de los coeficientes del filtro, se enviará un mensaje

de advertencia que informará al usuario que debe modificar los parámetros del sistema. En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran las pruebas de estabilidad mencionadas anteriormente.

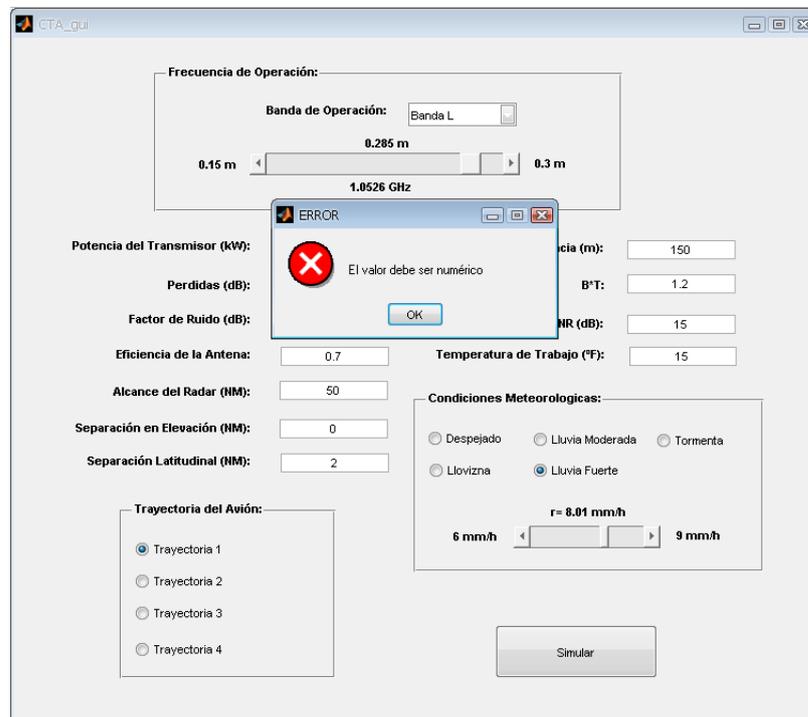


Figura 4.1: Prueba de estabilidad para el CTA.

Todos estos mensajes y control de errores permiten mantener estable al programa y evitan la posibilidad de colapso en algún punto de su funcionamiento.

4.2. Pruebas de Desempeño

Estas pruebas se refieren al funcionamiento del programa comparándolo con cálculos teóricos del sistema de radar. Esto se hace con la finalidad de verificar el funcionamiento óptimo del “Simulador de Radar RADARSIM UC”, dando la oportunidad de verificar la calidad y versatilidad del programa elaborado.

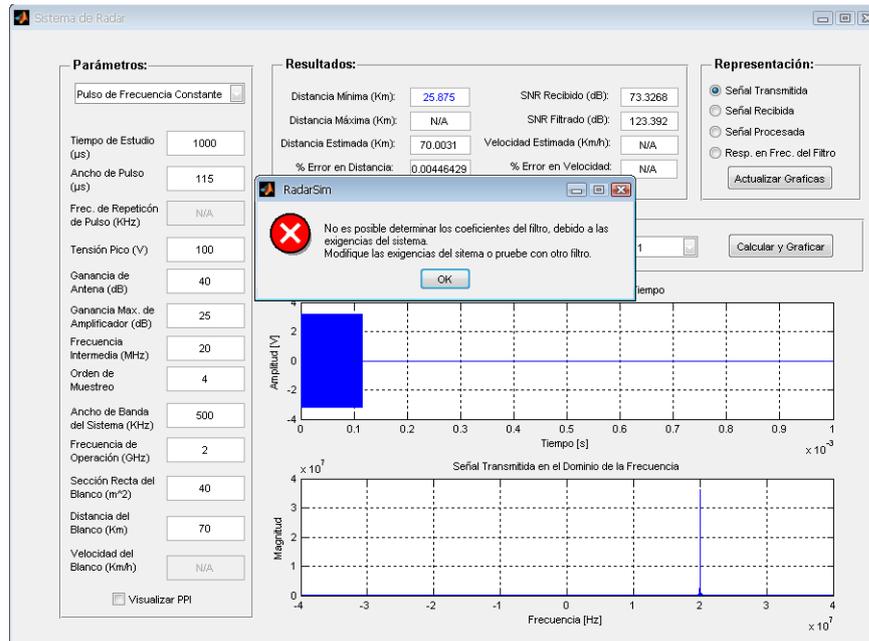


Figura 4.2: Prueba de estabilidad para el Sistema de Radar (Error en el cálculo de los coeficientes del filtro).

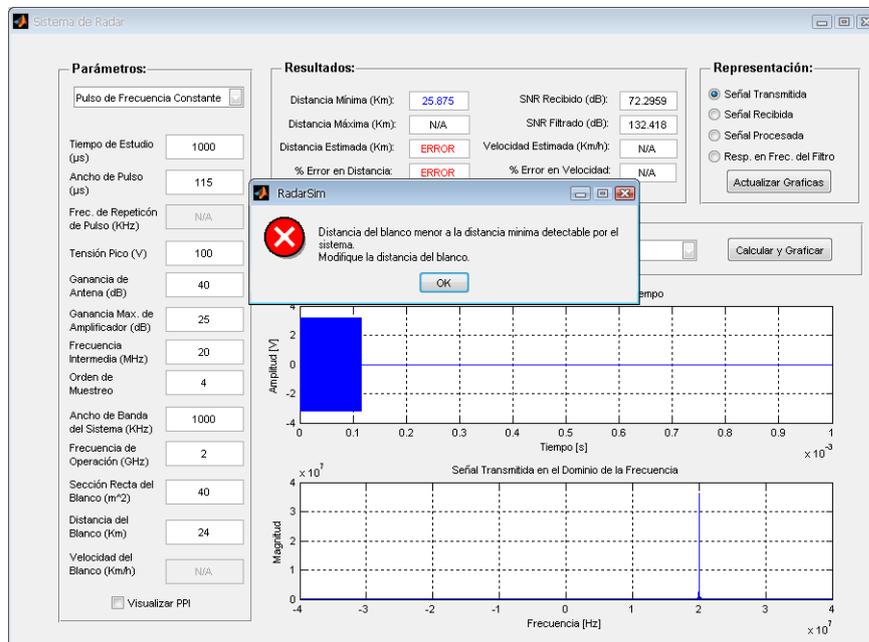


Figura 4.3: Prueba de estabilidad para el Sistema de Radar (Error en Distancia).

La evaluación del simulador se realizará bajo condiciones específicas con algunas variantes entre una prueba y otra, para así observar el comportamiento del sistema y de los subsistemas que lo conforman.

Esencialmente se realizaron cuatro pruebas de rigor: comprobar la ejecución del sistema de radar y el error arrojado por éste con diversas señales de transmisión y dos para verificar el funcionamiento del sistema de control de tráfico aéreo con distintas condiciones meteorológicas.

En la Tabla 4.1 se muestran brevemente las características y la finalidad de cada una de las pruebas llevadas a cabo.

Prueba	Finalidad
Pulso de Frecuencia Constante	Funcionamiento del Sistema de Radar
Tren de Pulsos	Funcionamiento del Sistema de Radar
CTA con condiciones meteorológicas leves	Funcionamiento del Sistema de Control de Tráfico Aéreo
CTA con condiciones meteorológicas fuertes	Funcionamiento del Sistema de Control de Tráfico Aéreo

Tabla 4.1: Pruebas realizadas.

4.2.1. Sistema de Radar

Para verificar el correcto funcionamiento de la aplicación “Sistema de Radar”, se realizaron dos pruebas de desempeño descritas a continuación.

Pulso de Frecuencia Constante

Para la realización de esta simulación se fijaron los parámetros de entrada descritos en el apartado 3.4.1 como sigue:

- Señal a transmitir: Pulso de Frecuencia Constante.
- Tiempo de Estudio: 1000 μs .
- Ancho de Pulso: 115 μs .
- Tensión Pico: 100 V.
- Ganancia de la Antena: 27 dB.
- Ganancia Máxima del Amplificador: 25dB.
- Frecuencia Intermedia: 20 MHz.
- Orden de Muestreo: 4.
- Ancho de Banda del Sistema: 1000 KHz.
- Frecuencia de Operación: 2 GHz.
- Sección Recta de Radar: 40 m^2 .
- Distancia del Blanco: 50 Km.
- Tipo de Filtro: Pasa Banda.
- Tipo de Filtro 2: Chebyshev Tipo 1.

Los resultados obtenidos luego de realizar la simulación se muestran en la figura , donde se puede observar que el algoritmo desarrollado tiene una alta precisión en el cálculo de la

distancia del blanco, presentando en este caso un error cercano al 0%. Asimismo con un fin didáctico, el sistema grafica las señales de interés en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia de acuerdo a los parámetros establecidos por el usuario, dichas gráficas se aprecian en las figuras 4.5, 4.6, 4.8 y 4.7.

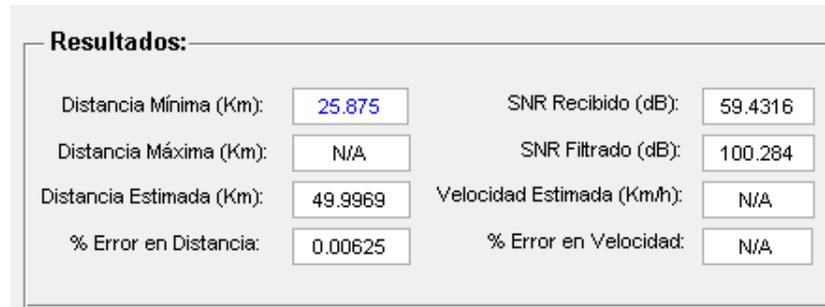


Figura 4.4: Resultados de la Simulación (Pulso de Frecuencia Constante).

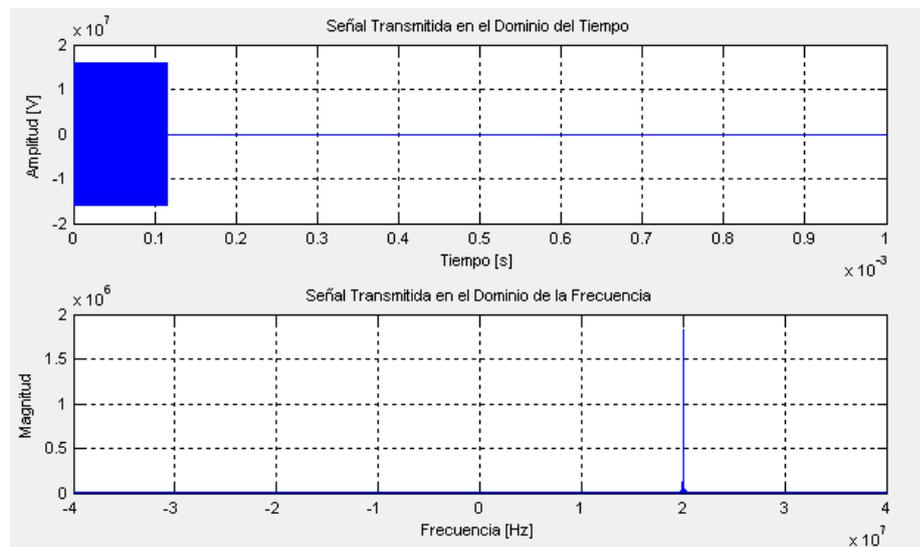


Figura 4.5: Señal Transmitida (Pulso de Frecuencia Constante).

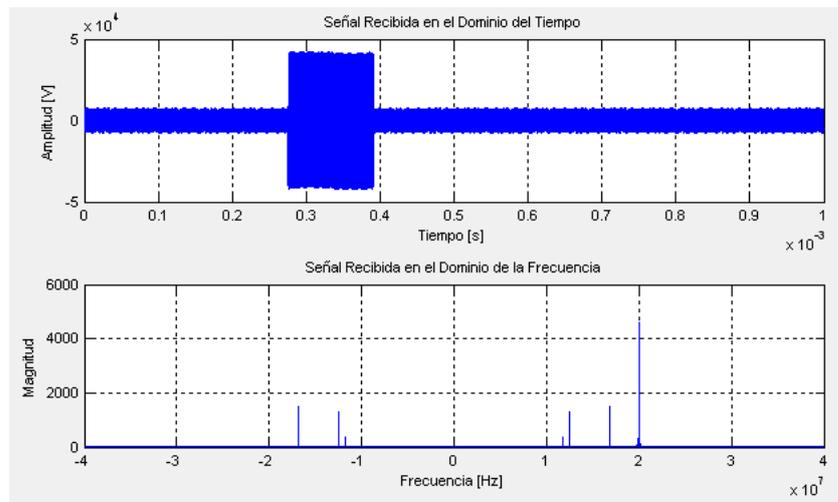


Figura 4.6: Señal Recibida (Pulso de Frecuencia Constante).

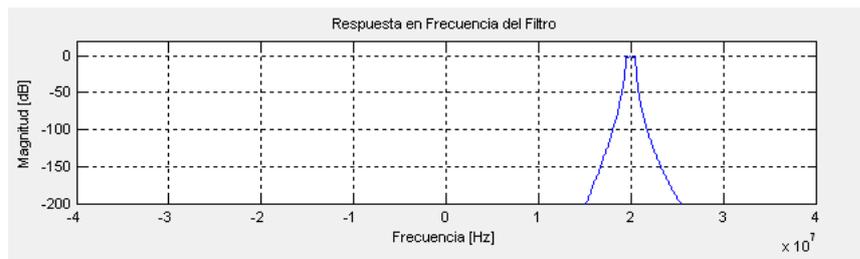


Figura 4.7: Respuesta en Frecuencia del Filtro (Pulso de Frecuencia Constante).

Tren de Pulsos Coherente

Para este caso los parámetros de entrada al simulador se fijaron igual que la prueba desarrollada anteriormente, exceptuando el tipo de señal transmitida y los nuevos parámetros relacionados con esta señal, los cuales se establecieron de la siguiente manera:

- Señal a transmitir: Tren de Pulsos Coherente.
- Frecuencia de Repetición de Pulsos: 3 KHz.
- Velocidad del Blanco: 600 Km/h.

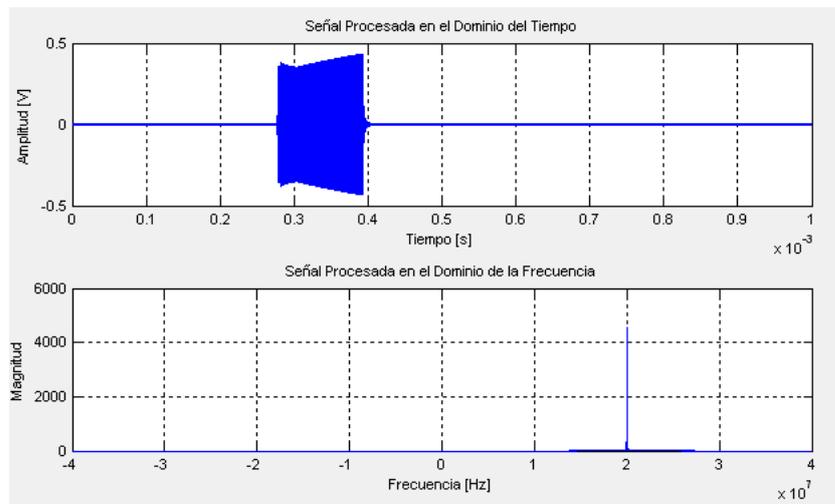


Figura 4.8: Señal Procesada (Pulso de Frecuencia Constante).

La figura 4.9 muestra los resultados obtenidos tras la simulación del sistema. Como se puede observar el algoritmo desarrollado continuo con la alta precisión en el cálculo de la distancia del blanco, logrando nuevamente un error en distancia cercano al 0%. Por otro lado, el error en velocidad alcanza un 10%, error aceptable. Es importante mencionar que el error en velocidad se ve afectado por la resolución en frecuencia que ofrece el sistema, motivo por el cual el algoritmo arroja errores altos para velocidades bajas y errores bajos para velocidades altas, una manera de disminuir este error y mejorar la resolución podría ser aumentando la frecuencia intermedia o el orden de muestreo, con lo cual la precisión en distancia mejoraría,

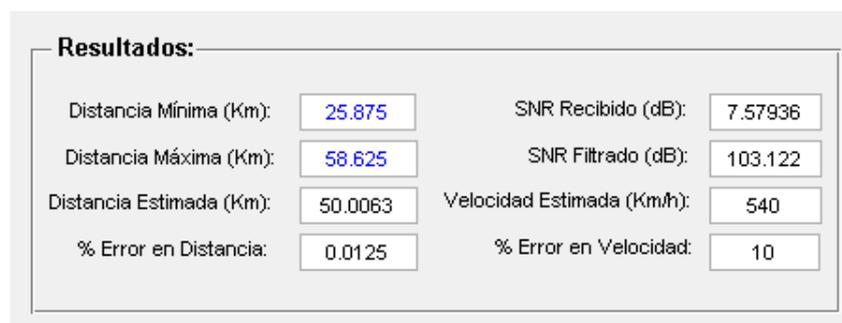


Figura 4.9: Resultados de la Simulación (Tren de Pulsos Coherente).

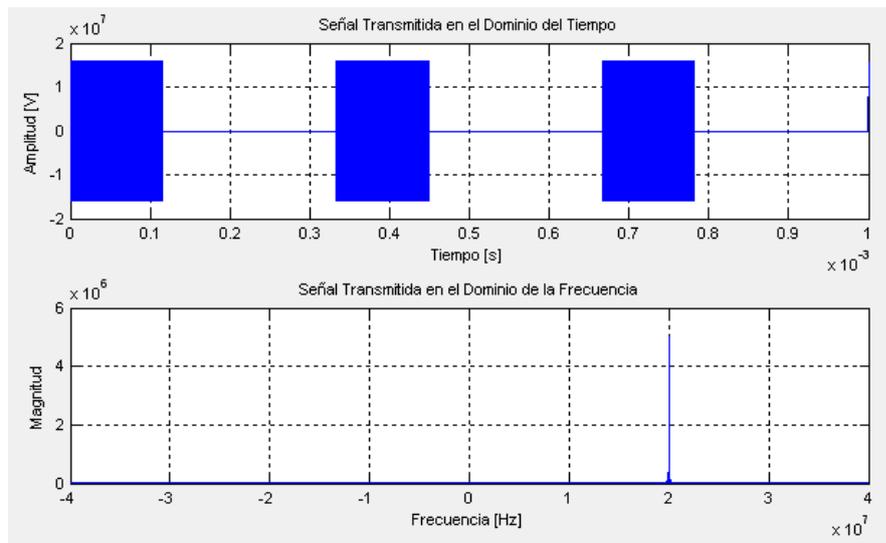


Figura 4.10: Señal Transmitida (Tren de Pulsos Coherente).

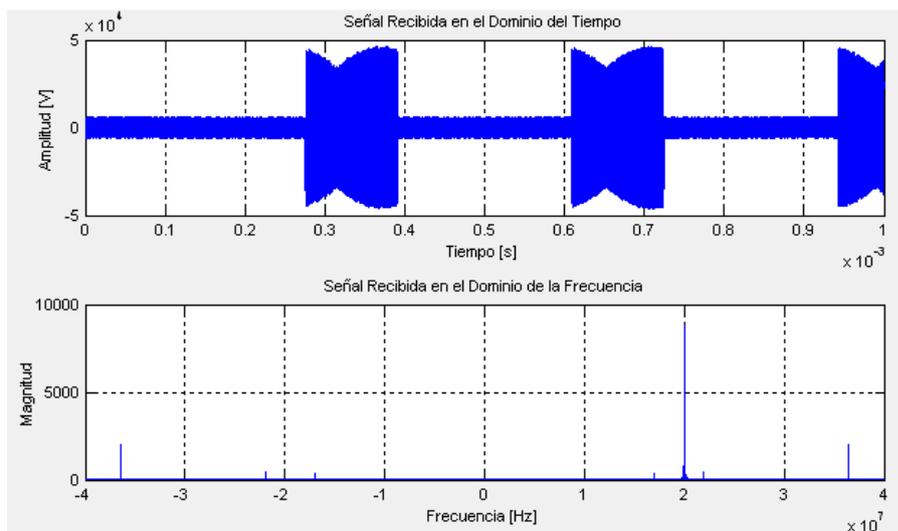


Figura 4.11: Señal Recibida (Tren de Pulsos Coherente).

pero esto requiere de un hardware con una memoria de mayor capacidad para poder manejar los cálculos realizados por el algoritmo.

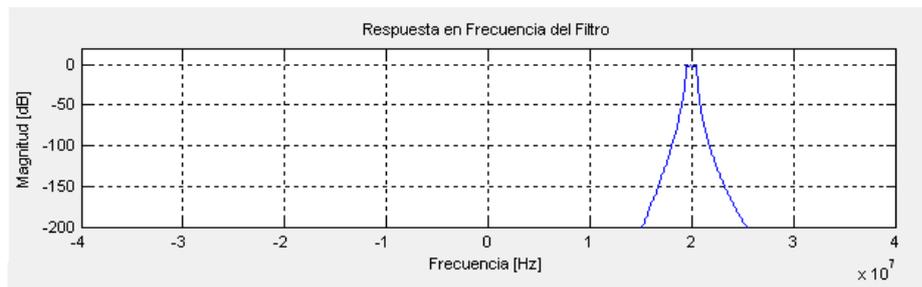


Figura 4.12: Respuesta en Frecuencia del Filtro (Tren de Pulsos Coherente).

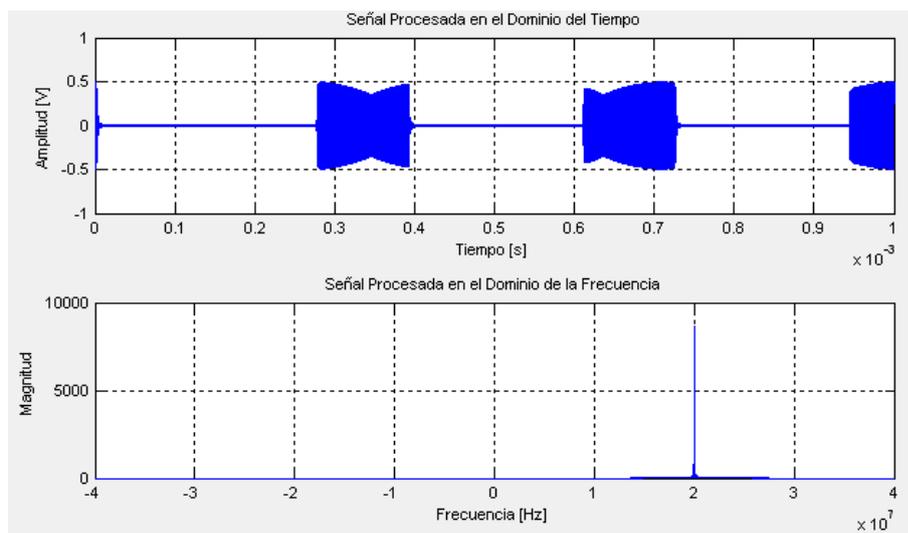


Figura 4.13: Señal Procesada (Tren de Pulsos Coherente).

4.2.2. Control de Tráfico Aéreo

Como estas pruebas tienen como finalidad verificar el funcionamiento del sistema de control de tráfico aéreo, se emplearon las ecuaciones descritas en el capítulo 2 para el cómputo de todos los cálculos teóricos (ecuación del radar, potencia retransmitida desde el blanco hacia el radar, área efectiva de la antena, ruido térmico, densidad de potencia retransmitida medida en el radar, la relación señal a ruido, entre otros); con los cuales se compararán los resultados de la simulación.

Para la realización de esta simulación fue necesario fijar los parámetros de entrada descritos en la tabla 3.1.

CTA con condiciones meteorológicas leves ($r = 0.2$ mm/h)

Los parámetros de entrada al software para esta simulación se fijaron como sigue:

- Banda de Operación: Banda L.
- Frecuencia de Operación/Longitud de Onda: 1.0526Ghz/ 0.285 m.
- Potencia del Transmisor: 50 KW.
- Pérdidas: 5 dB.
- Factor de Ruido: 5 dB.
- Eficiencia de la antena: 0.7.
- Alcance del Radar: 50 NM.
- Separación en Elevación: 2 NM.
- Separación Latitudinal: 2 NM.
- Resolución en distancia: 150 m.
- B*T: 1.2.
- SNR deseado: 15 dB.
- Temperatura de Trabajo: 15 ° F.
- Condiciones Meteorológicas: Llovizna.

- Tasa de Precipitación: 0.2 mm/h.
- Trayectoria del Avión: Trayectoria 1 (Sinusoidal).
- Distancia Máxima: 45 NM.

En la Figura 4.14 se observa que al encontrarse el avión dentro del espacio aéreo controlado, el sistema radar sigue fehacientemente la trayectoria descrita por el mismo, al igual que lo hacen los sistemas radar empleados en el control de tráfico aéreo, que operan en condiciones meteorológicas favorables para la propagación de la señal transmitida y recibida por el radar.

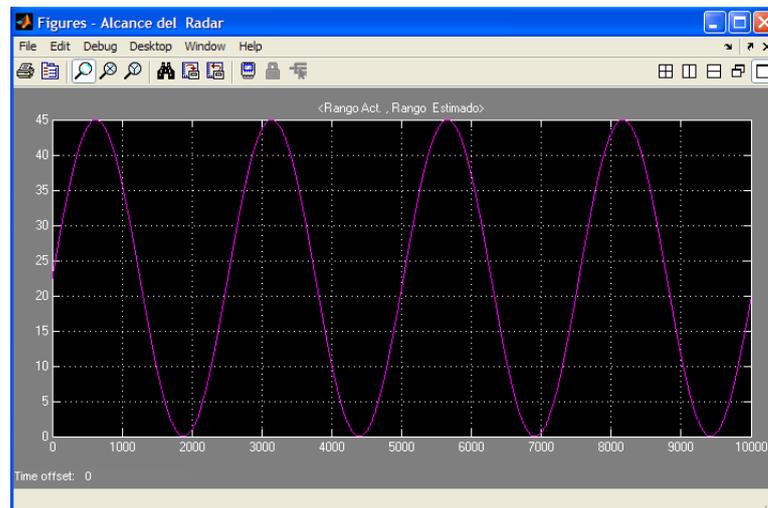


Figura 4.14: Rango actual del avión (amarillo) y rango estimado (magenta) por el sistema de control de tráfico aéreo.

CTA con condiciones meteorológicas fuertes ($r= 8.01$ mm/h)

Los parámetros de entrada al software para esta simulación se fijaron igual que en el caso anterior, salvo aquellos relacionados con las condiciones meteorológicas, los cuales se establecieron de la siguiente manera:

- Condiciones Meteorológicas: Lluvia Fuerte.
- Tasa de Precipitación: 8.01 mm/h.

Los resultados de la simulación se observan en la figura 4.15, donde se aprecia que el desempeño del mismo sistema empleado en la prueba anterior, se ve afectado al variar las condiciones meteorológicas de su entorno, imposibilitando, para este caso, seguir al avión mas allá de 10 NM. Tal como sucede en los sistemas radar reales empleados para el CTA ante condiciones atmosféricas desfavorables. Por lo general, la torre de control de los aeropuertos limita el tráfico aéreo bajo estas circunstancias.

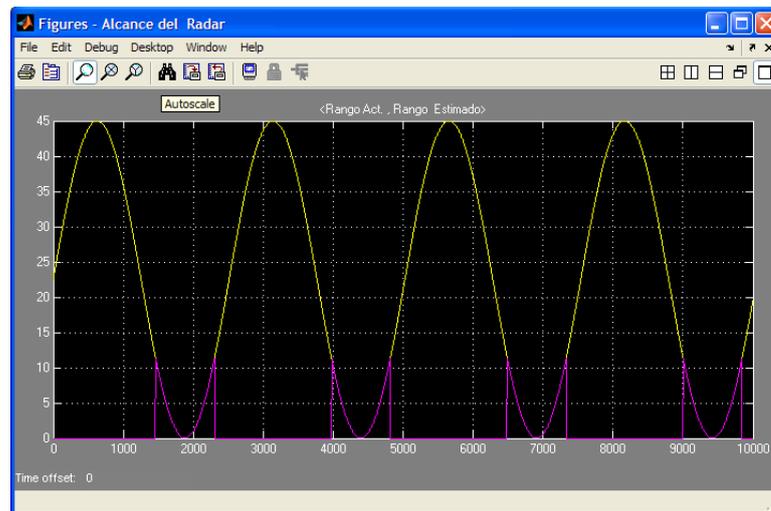


Figura 4.15: Rango actual del avión (amarillo) y rango estimado (magenta) por el sistema de control de tráfico aéreo.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones, finalizando de esta manera el estudio y análisis de sistemas de radar aplicados a la radionavegación civil.

5.1. Conclusiones

Con la finalización de este trabajo se ha logrado desarrollar dos algoritmos que permiten simular un sistema de radar para radionavegación civil general y en particular un sistema para control de tráfico aéreo. Todo esto con un margen de error aceptable.

Para lograr esto, se realizó una amplia revisión de la bibliografía referente a los principios básicos de los sistemas de radares, sistemas de radionavegación y procesamiento digital de señales con la finalidad de adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

Posteriormente, se procedió a realizar los esquemas y diagramas de flujos correspondiente a cada algoritmo planteado, en base a los conocimientos adquiridos, y con los cuales se desarrollaron los códigos bajo ambiente MATLAB/SIMULINK® y las ayudas correspondientes, en archivos adjuntos a cada interfaz de usuario, donde se puede encontrar los comando, sus entradas y salidas correspondientes.

Ahora bien, una vez desarrolladas las pruebas de validación que se describieron en el capítulo anterior se pueden presentar las siguientes conclusiones a partir de los resultados obtenidos:

Los sistemas de radares son sistemas complejos que a partir de la transmisión de ondas electromagnéticas son capaces de determinar la ubicación y velocidad de un objeto, siendo de vital importancia en aplicaciones de control de tráfico aéreo.

A partir de los resultados de las pruebas de desempeño referidas al funcionamiento del sistema de radar, se concluye que el grado de error numérico introducido por el algoritmo es muy pequeño, tanto para el cálculo de la distancia y de la velocidad del blanco, incluso en algunos casos podría considerarse despreciable. Es importante mencionar que los tiempos de cómputos no son constantes ya que dependen de la dimensión de los datos de entrada, variable que a su vez esta ligada a las características de cada sistema, específicamente la frecuencia.

Por otra parte, los resultados de las pruebas de desempeño relacionadas al CTA permiten validar el funcionamiento del algoritmo ya que concuerda con el comportamiento real de un sistema radar sometido a diversas condiciones meteorológicas. Estas condiciones juegan un papel importante en el desempeño del sistema ya que interfieren con la propagación de la onda emitida dificultando el seguimiento del avión dentro del espacio aéreo controlado.

Finalmente se ha desarrollado una herramienta de gran valor didáctico para el aprendizaje y enseñanza de los principales sistemas radar, con un interfaz de usuario muy sencilla y con grandes posibilidades de ampliación de sus características.

5.2. Recomendaciones

A fin de dar mejora y continuidad al trabajo expuesto a lo largo de esta monografía se recomienda realizar las siguientes actividades:

- Implementar un conjunto más amplio de señales a transmitir, tales como: Señales para sistemas radar de onda continua y señales con codificación digital (por ejemplo: código Baker o código Costas). con la finalidad de ampliar el potencial del programa y así profundizar en las ventajas y desventajas que ofrecen estos tipos de señales según el análisis de su función ambigüedad.
- Desarrollar un *Toolbox* con un compilado de las funcionalidades más comunes encontradas en los algoritmos de seguimiento de blancos basado en MATLAB/SIMULINK® el cual proveerá a los ingenieros e investigadores del área componentes básicos y fáciles de usar para implementar, comparar, modificar y analizar los algoritmos de estimación de distancia y seguimiento de blancos minimizando significativamente los esfuerzos de programación innecesarios y reduciendo los ciclos de rutinas repetitivas.

APÉNDICE A

FUNCIÓN AMBIGÜEDAD

La función ambigüedad (AF) representa el tiempo de respuesta de un filtro adaptado para una señal de energía finita cuando la señal es recibida con un retardo τ y un desplazamiento Doppler ν relativo a los valores nominales esperados por el filtro. La definición de la función ambigüedad es la siguiente:

$$|\chi(\tau, \nu)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t - \tau) e^{j2\pi\nu t} dt \right| \quad (\text{A.1})$$

Donde u es le envolvente compleja de la señal. Un valor positivo de ν implica un blanco moviéndose hacia el radar. Un valor positivo de τ implica que el blanco es mas lejos del radar que la posición de referencia ($\tau = 0$). La función ambigüedad es la mejor herramienta para el estudio y análisis de las señales radar.

A.1. Algunas Propiedades de la Función Ambigüedad

A continuación se describen cuatro (4) propiedades de la función ambigüedad. En las primeras dos (2) propiedades se asume que la energía E de $u(t)$ es normalizada para la unidad.

A.1.1. Primera Propiedad: Máxima en (0,0)

$$|\chi(\tau, \nu)| \leq |\chi(0, 0)| = 1 \quad (\text{A.2})$$

Esta propiedad dice que la función ambigüedad no puede ser mayor, en ningún otro punto, que el valor que toma en el origen (donde es normalizado a la unidad por la señal de energía normalizada).

A.1.2. Segunda Propiedad: Volumen Constante

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\chi(\tau, \nu)|^2 d\tau d\nu = 1 \quad (\text{A.3})$$

La propiedad 2 establece que el volumen total debajo de la superficie ambigua normalizada al cuadrado es igual a la unidad, independientemente de la forma de onda de la señal.

Las propiedades 1 y 2 implican que si se intenta reducir la función ambigüedad a un pico angosto en el origen, ese pico no puede exceder el valor de 1, y el volumen encerrado fuera del pico debe aparecer en algún lugar. Las próximas dos propiedades son aplicables a todas las señales, normalizadas o no.

A.1.3. Tercera Propiedad: Simetría con respecto al origen

$$|\chi(-\tau, -\nu)| = |\chi(\tau, \nu)| \quad (\text{A.4})$$

La propiedad 3 indica que es suficiente con estudiar y graficar solo 2 cuadrantes adyacentes de la AF.

A.1.4. Cuarta Propiedad: Efecto de LFM

Dada una envolvente compleja $u(t)$ con función ambigüedad $|\chi(\tau, \nu)|$, entonces adicionar modulación lineal en frecuencia (LFM), lo cual es equivalente a modulación cuadrática de la fase, implica que

$$u(t) e^{j\pi kt^2} \iff |\chi(\tau, \nu - kt)| \quad (\text{A.5})$$

La propiedad 4 dice que adicionar LFM corta el resultado del función ambigüedad. Esta importante propiedad es la base para una técnica de compresión de pulso.

APÉNDICE B

**MANUAL DE USUARIO PARA EL SOFTWARE
RADARSIM U.C.**

A continuación se presenta el manual de usuario para la utilización del programa RADARSIM U.C

B.1. ¿Qué es RADARSIM U.C.?

RADARSIM U.C. es una herramienta computacional, didáctica a través de la cual es posible diseñar y/o definir, los distintos subsistemas que permitan “construir” un sistema de radar para aplicaciones en un ámbito civil.

B.2. Ayuda

El sistema de ayuda de RADARSIM U.C. consta de diversas secciones, dedicadas a explicar con claridad las diversas interfaces que posee el programa.

B.2.1. Interfaz Gráfica de Usuario de la Ecuación del Radar.

Ecuación de Rango del Radar
(Radar Range Equation)

Ingrese los Datos:

Ganancia [dB]:

Potencia [W]:

Frecuencia [Hz]:

R.C.S [m²]:

Rango [m]:

Ancho de Banda [Hz]:

Relación de Ruido [Adim]:

Pérdidas [dB]:

Calcular y Graficar

1

2

1. Menú de Control de los Parámetros del Sistema. (Ver más adelante).
2. Representación Gráfica de la ecuación del radar. (Ver más adelante).

Menú de Control de los Parámetros del Sistema.

Ingrese los Datos:

Ganancia [dB]:

Potencia [W]:

Frecuencia [Hz]:

R.C.S [m²]:

Rango [m]:

Ancho de Banda [Hz]:

Relación de Ruido [Adim]:

Pérdidas [dB]:

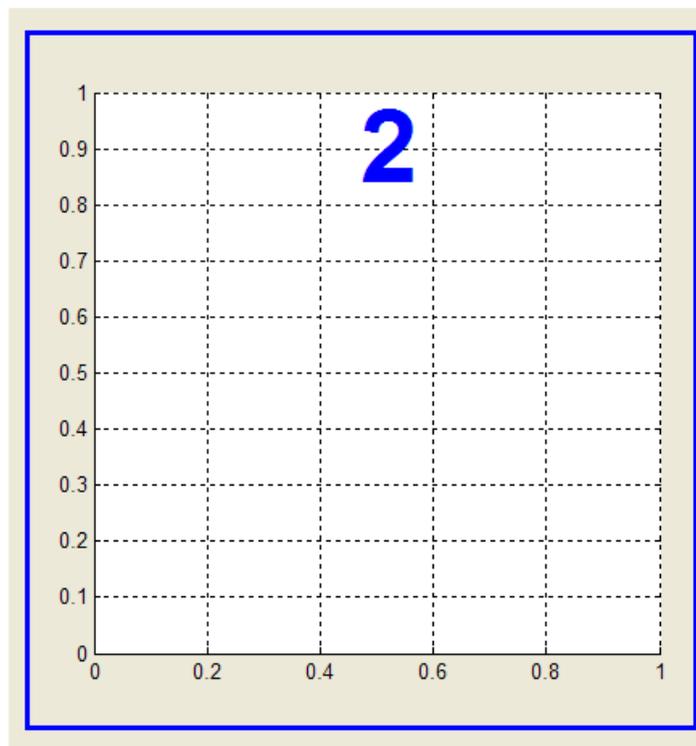
i

1

- a) Define la ganancia de la antena (en decibelios).
- b) Define la potencia del radar (en watos).
- c) Define la frecuencia de operación del radar (en hertz).
- d) Define la sección recta del radar (en metros cuadrados).
- e) Define el rango de estudio del alcance del radar (en metros).
- f) Define el ancho de banda del radar.
- g) Define la relación entre el nivel máximo de la señal y el nivel del ruido (en veces).
- h) Define las pérdidas adicionales en el radar.
- i) Ejecuta la simulación de la ecuación del radar en MATLAB.

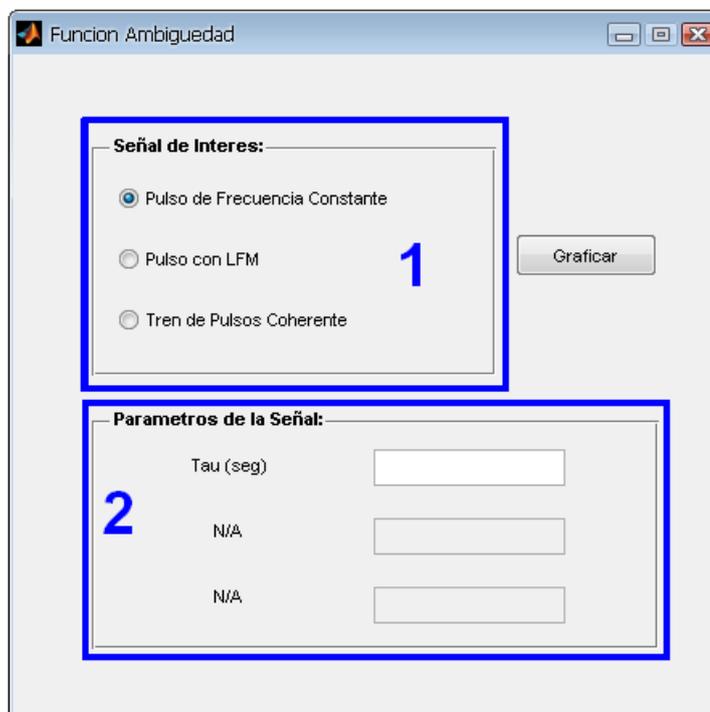
NOTA: El parámetro “Rango” debe introducirse como un vector de la siguiente manera valor mínimo:paso: valor máximo. Por ejemplo: $20e3 : 100 : 50e3$, genera un vector de 20Km a 50Km en pasos de 100 metros. Otra forma de introducir el vector es haciendo uso del comando linspace de MATLAB de la siguiente manera `linspace(valor mínimo,valor máximo,longitud del vector)`, por ejemplo `linspace(20e3,50e3,100)` genera un vector de 100 elementos espaciados linealmente desde 20Km hasta 50Km.

Representación Gráfica de la ecuación del radar.



Muestra la gráfica de la relación señal a ruido (SNR [dB]) vs Rango [m].

B.2.2. Interfaz Gráfica de Usuario de la Función Ambigüedad.



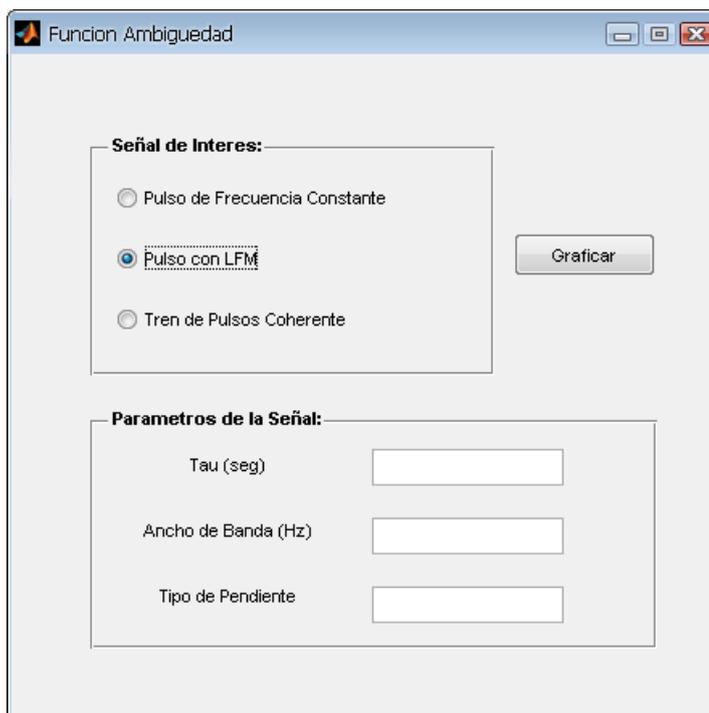
1. Menú para la elección de la señal.
2. Menú de control de los parámetros de la señal.

Función Ambigüedad: Pulso de Frecuencia Constante.

Al seleccionar “Pulso de Frecuencia Constante” el único parámetro de la señal configurable es “Tau”, este parámetro representa el ancho de pulso, el mismo debe ser introducido en segundos.

Función Ambigüedad: Pulso con LFM.

Al seleccionar “Pulso con LFM” los parámetros de la señal configurables son:



1. Ancho de Pulso en segundos.
2. Ancho de Banda en Hz.
3. Tipo de Pendiente.

NOTA: El parámetro “Tipo de Pendiente” solo toma como valores de entrada 1 y -1, los cuales indican si la pendiente de variación de frecuencia es positiva o negativa, respectivamente.

Función Ambigüedad: Tren de Pulsos Coherente.

Al seleccionar “Tren de Pulsos Coherente” los parámetros de la señal configurables son:

1. Ancho de Pulso en segundos.

Funcion Ambigüedad

Señal de Interes:

Pulso de Frecuencia Constante

Pulso con LFM

Tren de Pulsos Coherente

Graficar

Parametros de la Señal:

Tau (seg)

Nº de Pulsos

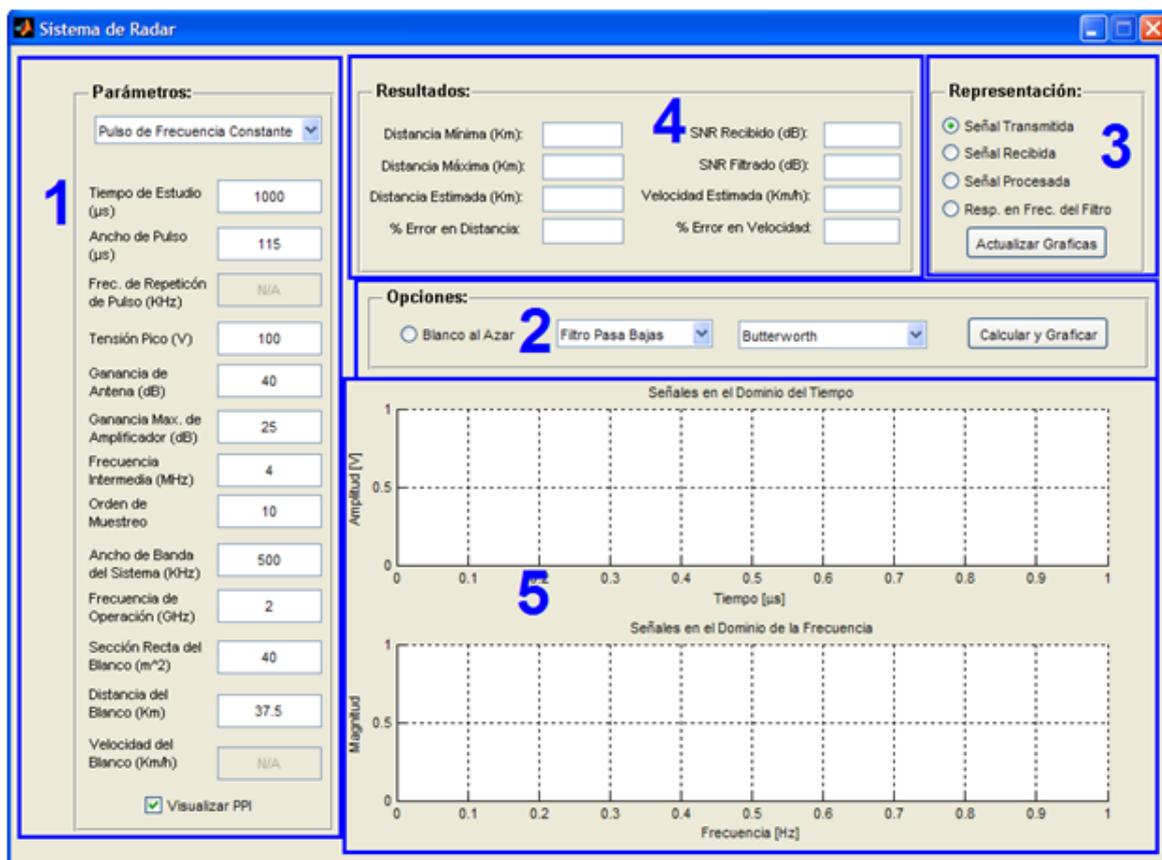
PRI (seg)

2. Numero de Pulsos.

3. Intervalo de Repetición de Pulsos en segundos.

NOTA: El parámetro “Ancho de Pulso” debe ser menor a la mitad del intervalo de repetición de pulsos para que el sistema pueda realizar los cálculos correspondientes.

B.2.3. Interfaz Gráfica de Usuario del Sistema de Radar.



1. Menú de control de los parámetros del sistema (Ver más adelante).
2. Menú de opciones (Ver más adelante).
3. Menú de control de representación de las señales (Ver más adelante).
4. Menú de representación de resultados de la simulación (Ver más adelante).
5. Representación gráfica de las señales del sistema. (Ver más adelante).

Menú de control de los parámetros del sistema.

a) Selecciona el tipo de señal a transmitir:

- Pulso de Frecuencia Constante.
- Pulso LFM.
- Tren de pulsos coherentes.

b) Define el tiempo de estudio del sistema de radar (en microsegundos).

1

Parámetros:

a Pulso de Frecuencia Constante

b Tiempo de Estudio (µs) 1000

c Ancho de Pulso (µs) 115

d Frec. de Repetición de Pulso (KHz) N/A

e Tensión Pico (V) 100

f Ganancia de Antena (dB) 40

g Ganancia Max. de Amplificador (dB) 25

h Frecuencia Intermedia (MHz) 4

i Orden de Muestreo 10

j Ancho de Banda del Sistema (KHz) 500

k Frecuencia de Operación (GHz) 2

l Sección Recta del Blanco (m²) 40

m Distancia del Blanco (Km) 37.5

n Velocidad del Blanco (Km/h) N/A

Visualizar PPI

- c) Define el ancho de pulso de la señal a transmitir (en microsegundos).
- d) Define el ancho de banda del pulso (Para un pulso LFM -en kilohertz-). Define la frecuencia de repetición de pulso (Para un tren de pulsos coherentes -en kilohertz-). Inhabilitado para un pulso de frecuencia constante.
- e) Define la tensión pico del pulso de la señal a transmitir en voltios.
- d) Define la ganancia de la antena del sistema de radar (en decibelios).
- g) Define la ganancia del amplificador del sistema de radar (en decibelios).
- h) Define la frecuencia intermedia del sistema de radar (en Megahertz).
- i) Define el orden de muestreo de la señal.
- j) Define el ancho de banda del sistema (en kilohertz).
- k) Define la frecuencia de operación del sistema de radar (en Gigahertz).
- l) Define la sección recta del blanco a identificar (en metros cuadrados).
- m) Define la distancia en la que se encuentra el blanco a identificar (en kilometros).
- n) Define la velocidad con la que se desplaza el blanco a identificar (en kilómetros por hora, para un tren de pulsos coherentes) Inhabilitado para un pulso de frecuencia constante y un pulso LFM.
- o) Habilita la visualización de la PPI (Para un tren de pulsos coherentes) Inhabilitado para un pulso de frecuencia constante y un pulso LFM.

Menú de Opciones.

- a) Habilita la selección de un blanco al azar.



Opciones:

a Blanco al Azar 2 Filtro Pasa Bajas b Butterworth c Calcular y Graficar d

b) Selecciona el tipo de filtro a utilizar en el sistema de radar

- Filtro Pasabajas.
- Filtro Pasabanda.

c) Selecciona el filtro particular a utilizar según el tipo seleccionado:

- Filtro Pasabajas Butterworth.
- Filtro Pasabanda Butterworth.
- Filtro Pasabajas Chebyshev Tipo 1.
- Filtro Pasabanda Chebyshev Tipo 1.
- Filtro Pasabajas Chebyshev Tipo 2.
- Filtro Pasabanda Chebyshev Tipo 2.
- Filtro Pasabajas Elíptico.
- Filtro Pasabanda Elíptico.

d) Ejecuta la simulación del sistema de radar en MATLAB.

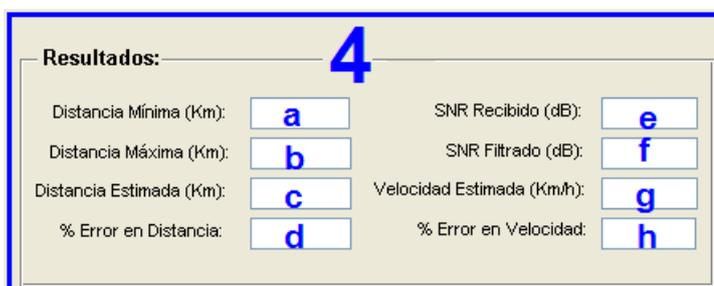


Menú de control de representación de las señales.

Permite seleccionar el tipo de señal a representar en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

- a) Permite actualizar (cambiar) la señal representada en las gráficas en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

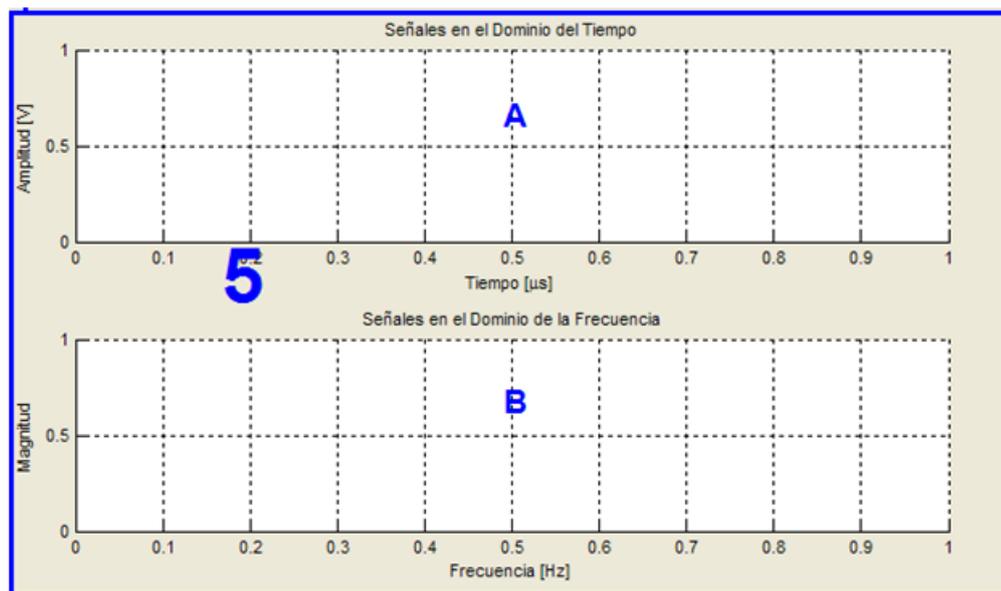
Menú de representación de resultados de la simulación.



- a) Muestra la distancia mínima detectable por el sistema de radar (en kilómetros).
- b) Muestra la distancia máxima detectable por el sistema de radar (Para un tren de pulsos coherentes –en kilómetros-). Inhabilitado para un pulso de frecuencia constante y un pulso LFM.
- c) Muestra la distancia del blanco estimada por el simulador (en kilómetros).

- d) Muestra el error en el cálculo de la distancia del blanco (entre la distancia real introducida por el usuario y la distancia estimada por el simulador).
- e) Muestra la SNR de la señal recibida (en decibelios).
- f) Muestra la SNR de la señal filtrada (en decibelios).
- g) Muestra la velocidad del blanco estimada por el simulador (en kilómetros por hora).
- h) Muestra el error en el cálculo de la velocidad del blanco (entre la velocidad real introducida por el usuario y la velocidad estimada por el simulador), para un tren de pulsos coherente. Inhabilitado para un pulso de frecuencia constante y un pulso LFM.

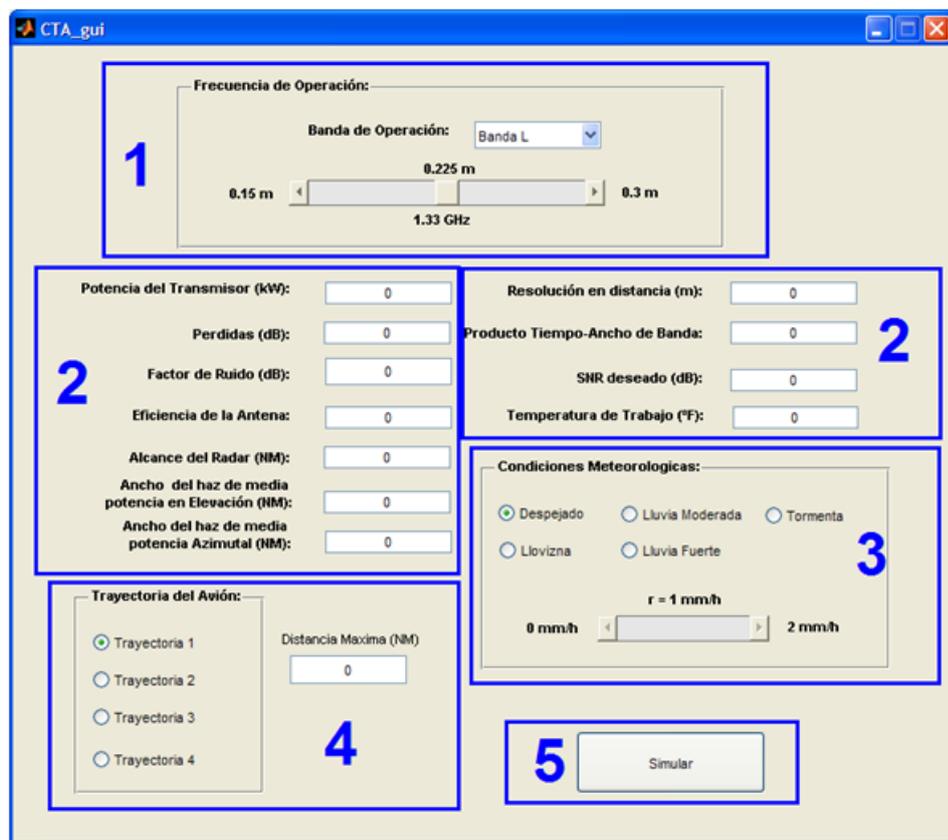
Representación gráfica de las señales del sistema.



- a) Muestra la señal seleccionada en el “Menú de control de representación de señales” en el dominio del tiempo definida por los parámetros definidos en el “Menú de control de los parámetros del sistema”.

- b) Muestra la señal seleccionada en el “Menú de control de representación de señales” en el dominio del tiempo definida por los parámetros definidos en el “Menú de control de los parámetros del sistema”.

B.2.4. Interfaz Gráfica de Usuario del Sistema de Control de Tráfico Aéreo.



1. Menú de control de frecuencia (Ver más adelante).
2. Menú de control de los parámetros del sistema (Ver más adelante).
3. Menú de control de las condiciones meteorológicas (Ver más adelante).

4. Menú de control de la trayectoria del avión (Ver más adelante).
5. Botón de simulación (Ver más adelante).

Menú de Control de Frecuencia.



- a) Selecciona la banda de operación del sistema.
- b) Selecciona la frecuencia de operación del sistema y su respectiva longitud de onda.

Menú de control de los parámetros del sistema.

a Potencia del Transmisor (kW):	<input type="text" value="0"/>
b Pérdidas (dB):	<input type="text" value="0"/>
c Factor de Ruido (dB):	<input type="text" value="0"/>
d Eficiencia de la Antena:	<input type="text" value="0"/>
e Alcance del Radar (NM):	<input type="text" value="0"/>
f Ancho del haz de media potencia en Elevación (NM):	<input type="text" value="0"/>
g Ancho del haz de media potencia Azimutal (NM):	<input type="text" value="0"/>

- a) Define la potencia (en kilovatios) del transmisor del radar.
- b) Define las pérdidas adicionales en el sistema de radar.

Resolución en distancia (m):	<input type="text" value="0"/>	h
B*T:	<input type="text" value="0"/>	i
Umbral de detección, SNR (dB):	<input type="text" value="0"/>	j
Temperatura de Trabajo (°F):	<input type="text" value="0"/>	k

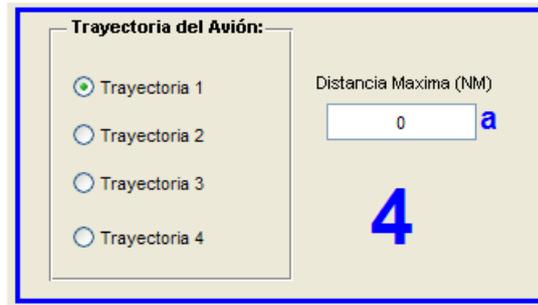
- c) Define la relación en decibelios entre la SNR de entrada y la SNR de salida del receptor.
- d) Define la eficiencia de la antena de transmisión/recepción.
- e) Define el alcance máximo del radar en millas náuticas.
- f) Define la longitud del arco a cubrir en elevación en millas náuticas.
- g) Define la longitud del arco a cubrir latitudinalmente en millas náuticas.
- h) Define la distancia mínima, en metros, existente entre dos blancos para poder ser reconocidos.
- i) Representa la compresión de pulsos de la señal transmitida.
- j) Define la relación señal a ruido deseada en el sistema de radar.
- k) Define la temperatura de trabajo de la antena de transmisión/recepción.

Menú de control de las condiciones meteorológicas.

Condiciones Meteorológicas:		
<input checked="" type="radio"/> Despejado	<input type="radio"/> Lluvia Moderada	<input type="radio"/> Tormenta
<input type="radio"/> Llovizna	<input type="radio"/> Lluvia Fuerte	
r = 1 mm/h		
0 mm/h	<input type="text" value="1"/>	2 mm/h

Permite modificar las condiciones meteorológicas del entorno en el que opera el sistema de radar seleccionando la tasa de precipitación en mm/h.

Menú de control de la trayectoria del avión.

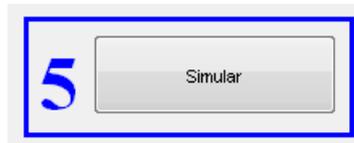


Permite modificar la trayectoria que describe el avión de la siguiente manera:

- Trayectoria 1: Sinusoidal.
- Trayectoria 2: Rampa.
- Trayectoria 3: Diente de Sierra.
- Trayectoria 4: Pulso.

a) Determina la distancia máxima de la trayectoria del avión.

Botón de simulación.



Ejecuta la simulación del sistema de control de tráfico aéreo en MATLAB/SIMULINK.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Wolff, “Principio básico de funcionamiento”. Página Web. <http://www.radartutorial.eu/01.basics/rb04.es.html>. Tomado el 20 de enero del 2011.
- [2] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*. McGraw-Hill, second edition ed., 1990.
- [3] N. Levanon & E. Mozeson, *Radar Signals*. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [4] A. Farina, “Introduction to radar signal & data processing: The opportunity”, in *Knowledge-Based Radar Signal and Data Processing*, 2003-2004.
- [5] D. Christiansen & C. Alexander, *Standar Handbook of Electronic Engineering*. McGraw-Hill, fifth edition ed., 2004.
- [6] D. Barton & S. Leonov, *Radar Technology Encyclopedia*. Artech House, 1998.
- [7] Álvaro Blanco, A. López, D. Ramírez, J. Menoyo & S. C. González, “Formas de onda para radares de alta resolución”, *Universidad Politécnica de Madrid*, 2002.
- [8] C. Burrus, J. McClellan & A. Oppenheim, *Ejercicios de Tratamiento de la Señal Utilizando MATLAB V.4*. Prentice-Hall, 1997.
- [9] R. Dorf, *The Electrical Engineering Handbook*. CRC Press LLC, 2000.

-
- [10] D. Garmatyuk, “High-resolution radar system modeling with matlab/simulink”, *RF Design*, pp. 12–19, August 2006.
- [11] J. González, C. Castillo & M. Burgos, “Modelado de blancos extensos para la simulación de escenarios en radares de apertura sintética”, in *XX Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, Gandía 2005.
- [12] D. Held & A. McGrew, “Globalización/antiglobalización. sobre la reconstrucción del orden mundial”, *REVISTA DE CIENCIA POLÍTICA*, vol. Volumen XXIV, no. 1, pp. 237–239, 2004.
- [13] R. Hernández, C. Fernández & P. Baptista, *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill, 1991.
- [14] J. Li & P. Stoica, *MIMO Radar Signal Processing*. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [15] B. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. Chapman & Hall/CRC, 2000.
- [16] B. Mahafza & A. Elsherbeni, *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*. Chapman & Hall/CRC, 2004.
- [17] H. Meikie, *Modern Radar Systems*. Artech House, 2001.
- [18] M. Pamies, “Estudio y desarrollo de un sistema radar para el seguimiento de blancos”, *Universidad Politécnica de Cartagena*, 2008.
- [19] P. Z. Peebles, *Radar Principles*. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [20] B.-C. Wang, *Digital Signal Processing Techniques and Applications in Radar Image Processing*. John Wiley & Sons, Inc., 2008.

-
- [21] *IEEE Std 686-1997 Standard Radar Definitions*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Inc., 1998.
- [22] *Manual de trabajos de grado de especialización, maestría y tesis doctorales*, (Caracas, Venezuela), Univesidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL), 1998.
- [23] Sajint K. Mitra, *Digital Signal Processing Laboratory using MATLAB*. McGraw-Hill, 1998.