

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



TRABAJO FINAL DE GRADO

**Diseño de un Sistema Radar Monopulso 2D basado en  
Antenas de Onda de Fugas para Asistencia en Aterrizaje  
Autónomo de Drones**



Autor: Eloy Andreu García

Directores: David Cañete Rebenaque

José Luis Gómez Tornero

9 de octubre de 2019



*Dedicado a,  
mis padres y mi hermana*



# Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis directores David Cañete Rebenaque y José Luis Gómez Tornero, por haberme mostrado esta rama de la ingeniería de telecomunicaciones y por su increíble labor docente. Incluyendo en estos agradecimientos a Miguel Poveda y Alex Gil.

En segundo lugar, agradecer a mis amigos, a los que surgieron en la carrera y a los de siempre. Además, agradecer a mi familia el apoyo y ánimo durante estos años de carrera, en especial a mi hermana y mis padres, por la educación y trabajo que me han enseñado, su apoyo incondicional y ser una referencia a seguir. Sin olvidar a mis padrinos (mis segundos padres) y mis abuelos.



# Resumen

Los sistemas de posicionamiento global basados en constelaciones de satélites (GNSS), como el GPS, presentan una precisión habitual de unos pocos metros, lo cual es suficiente en multitud de aplicaciones y ha permitido su desarrollo comercial. Sin embargo, presentan limitaciones en entornos donde no alcanza la señal de los satélites y en aplicaciones que se requiere mayor precisión.

En el caso de aterrizaje autónomo de drones donde la plataforma tiene unas dimensiones limitadas, un error de precisión supone la pérdida del dispositivo por lo que es necesario obtener una precisión mayor de la que ofrece un GPS convencional. Si bien los dispositivos GPS comerciales disponibles para drones anuncian precisiones de hasta 0,5 metros, en la realidad raramente se puede obtener esa precisión. Para solventar este problema existen algunas alternativas, como los sistemas RTK (Real Time Kinematic), que también se basan en la señal emitida por la constelación de los satélites. Este tipo de sistemas presentan dos inconvenientes, por un lado son bastante caros, y por otro lado, para que funcionen requieren unas condiciones de visibilidad de los satélites que no siempre se pueden conseguir.

Para abordar este problema, el presente trabajo fin de grado pretende desarrollar un sistema de localización y aterrizaje autónomo de drones diseñando una antena Leaky-wave [1] basado en la función monopolso [2][7]. Las "*Leaky-wave antennas*" (LWA) o antenas de onda de fuga generan diagramas de radiación muy directivos con una configuración simple. Además tienen una característica inherente que nos proporciona un escaneo en frecuencia al variar esta, lo que permite emplearlas en aplicaciones de radar. En este proyecto se ha diseñado una antena formada por un array de 4 *Half-width LWA* uniformes e iguales, que formarán parte del sistema monopolso. El sistema estimará la localización del objetivo a partir de la recepción del nivel de señal (RSSI) usando un algoritmo de posicionamiento basado en la dirección de llegada (Direction of Arrival, DoA) también denominado ángulo de llegada (AoA) [10] [14] [15] [16].

Para obtener un buen sistema de localización, las antenas estarán orientadas hacia arriba siendo estas la plataforma de aterrizaje, y dadas sus características inherentes dispondremos de un mismo diagrama de radiación en cada antena, con un escaneo para distintas direcciones de

apuntamiento según la frecuencia de trabajo. Para ello se propone operar en la banda Bluetooth Low Energy (BLE) de 2.4GHz para configurar un sistema monopulso.

El sistema estimará la localización del dron cuando se encuentre próximo a la plataforma de aterrizaje a partir de la recepción del nivel de señal RSSI y utilizando un algoritmo de posicionamiento basado en la dirección de llegada DoA [10] [11]. La lectura de la RSSI se llevará a cabo mediante receptores conectados a los puertos de las antenas monopulso, cuyo diseño y configuración es el primer objetivo del proyecto. Cada una estimará la Dirección de Llegada (DoA) del dispositivo en direcciones perpendiculares (para cada eje), mientras que el valor de un sonar incorporado en el dron nos indicará la coordenada en altura, consiguiendo junto con el uso de unas sencillas operaciones aritméticas de procesado digital monopulso, permitirían la obtención de una función de error de localización, a partir de la cual se estimará la dirección del terminal móvil a localizar y de ese modo establecer la ubicación exacta del dron.

Este trabajo parte de la técnica propuesta en este artículo [17], donde pasamos de hacer el estudio en 1D a 2D, aumentamos el FoV total de 40° a 90° obteniendo mayor resolución, además se usan 3 frecuencias BLE en antenas LWA. Y sigue la línea futura propuesta en este Trabajo Final de Máster [6], donde se proponía ampliar el FoV, usando antenas que escaneen en frecuencia con un protocolo BLE para conseguir dicho propósito, y por tanto aumentar el área cubierta mientras se asiste al dron, sin tener que comprometer la resolución angular usando antenas con haces muy anchos. En este proyecto se conseguirán mejorar estas características.

Por último, cabe mencionar que el resultado de este proyecto como Trabajo Fin de Grado es el segundo que se realiza después del TFM mencionado, con el objetivo de entender como usar sistemas digitales para obtener funciones monopulso en 2D para la aplicación de asistencia en el aterrizaje de un dron.



# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	1
1.1.1. Objetivo general . . . . .	1
1.1.2. Objetivos diferenciados . . . . .	1
1.2. Fases . . . . .	2
1.3. Estructura . . . . .	2
<b>2. Fundamentos y conceptos generales</b>	<b>5</b>
2.1. Guía de Onda . . . . .	5
2.1.1. Modos de propagación y frecuencias de corte . . . . .	6
2.2. Línea de Transmisión . . . . .	6
2.2.1. Stripline . . . . .	7
2.2.2. Microstrip . . . . .	8
2.3. Guía de Onda Integrada en Sustrato . . . . .	9
2.4. Leaky-Wave Antenna (LWA) . . . . .	11
2.5. Half-width Leaky-wave Antenna (HWLWA) . . . . .	14
2.6. Tecnología Bluetooth Low Energy (BLE) . . . . .	15
2.7. Sistema de Localización . . . . .	16
2.7.1. Introducción . . . . .	16
2.7.2. GPS . . . . .	17

2.7.3. Sistema Radar Monopulso . . . . .	17
2.8. Análisis de la función monopulso . . . . .	19
<b>3. Desarrollo del proyecto</b>	<b>23</b>
3.1. Diseño antena Half-width Leaky-wave individual en HFSS . . . . .	23
3.1.1. Resultados Half-width LWA . . . . .	25
3.2. Diseño sistema de antenas para el sistema monopulso 2D . . . . .	28
3.2.1. Estudio de los diagramas de radiación en campo lejano, región de Fresnel y campo cercano. . . . .	31
3.2.2. Procesado de señal del sistema monopulso. . . . .	33
<b>4. Estimación de la posición del dron</b>	<b>59</b>
4.1. Primera estimación. . . . .	62
4.1.1. Estimación respecto Eje Y . . . . .	62
4.1.2. Estimación respecto Eje X . . . . .	66
4.2. Segunda estimación. . . . .	71
4.2.1. Estimación respecto Eje Y . . . . .	71
4.2.2. Estimación respecto Eje X . . . . .	74
4.3. Tercera Estimación . . . . .	77
4.3.1. Estimación respecto Eje Y . . . . .	77
4.3.2. Estimación respecto Eje X . . . . .	79
4.4. Cuarta Estimación . . . . .	80
4.4.1. Estimación respecto Eje Y . . . . .	80
4.4.2. Estimación respecto Eje X . . . . .	82
<b>5. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>85</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	85
5.2. Líneas futuras . . . . .	86
<b>Bibliografía</b>	<b>87</b>

# Índice de figuras

2.1. Representación de los campos electromagnéticos en una guía de onda. . . . .	5
2.2. Stripline Lineas de Campos . . . . .	7
2.3. Stripline Lineas de Campos . . . . .	8
2.4. Línea de Transmisión <i>Microstrip</i> . . . . .	8
2.5. <i>Microstrip</i> Lineas de Campos . . . . .	9
2.6. Estructura de una SIW . . . . .	10
2.7. Estructura de una SIW-LWA . . . . .	12
2.8. Lineas de Campo de una SIW-LWA . . . . .	13
2.9. Diagrama Fan Beam [8] . . . . .	13
2.10. Estructura de una Half-width Leaky-wave Antenna [4] . . . . .	14
2.11. Líneas de Campos en una Half-width Leaky-wave Antenna [4] . . . . .	14
2.12. Canales Bluetooth Low Energy (BLE) . . . . .	16
2.13. Patrón de radiación de dos antenas con direcciones del haz entrelazados con cierto $\theta$ . . . . .	19
3.1. Diseño antena HWLWA en HFSS. . . . .	23
3.2. Parámetros de diseño de la LWA. . . . .	24
3.3. Diagrama de Radiación Plano H. . . . .	25
3.4. Diagrama de Radiación normalizado. . . . .	25
3.5. Diagrama de Radiación normalizado entre $-90^\circ$ y $90^\circ$ . . . . .	26
3.6. Diagrama de radiación. . . . .	26
3.7. Diagrama de radiación. . . . .	27
3.8. Ganancia en Plano E canal 37. . . . .	27
3.9. Ganancia en Plano E canal 38. . . . .	28
3.10. Ganancia en Plano E canal 39. . . . .	28
3.11. Diseño antena en HFSS. . . . .	29
3.12. Estructura antena formada por 4 HW-LWA. . . . .	29

3.13. Campos de escaneo $\theta_x$ y $\theta_y$ . . . . .	30
3.14. Área de visión . . . . .	30
3.15. Patrón de Radiación FarField. . . . .	31
3.16. FoV en FarField. . . . .	32
3.17. Patrón de Radiación en función de la distancia para el canal 37 . . . . .	33
3.18. Patrón de Radiación para una altura de 30m. . . . .	34
3.19. Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 30m. . . . .	34
3.20. Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 z30m. . . . .	35
3.21. Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 z30m. . . . .	35
3.22. Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 z30m. . . . .	35
3.23. Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 z30m. . . . .	36
3.24. Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 z30m. . . . .	36
3.25. Funciones Monopulso z30m. . . . .	36
3.26. Patrón de Radiación para una altura de 12m. . . . .	37
3.27. Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 12m. . . . .	38
3.28. Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 z12m. . . . .	38
3.29. Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 z12m. . . . .	38
3.30. Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 z12m. . . . .	39
3.31. Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 z12m. . . . .	39
3.32. Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 z12m. . . . .	39
3.33. Funciones Monopulso z12m. . . . .	40
3.34. Patrón de Radiación para una altura de 10m. . . . .	41
3.35. Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 10m. . . . .	41
3.36. Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 a una altura de 10m. . . . .	41
3.37. Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 a una altura de 10m. . . . .	42
3.38. Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 a una altura de 10m. . . . .	42
3.39. Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 a una altura de 10m. . . . .	42
3.40. Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 a una altura de 10m. . . . .	43
3.41. Funciones Monopulso a una altura de 10m. . . . .	43
3.42. Patrón de Radiación para una altura de 4m. . . . .	44
3.43. Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 4m. . . . .	44
3.44. Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 a altura de 4m. . . . .	45
3.45. Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 a altura de 4m. . . . .	45
3.46. Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 a altura de 4m. . . . .	45
3.47. Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 a altura de 4m. . . . .	46

3.48. Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 a altura de 4m. . . . .	46
3.49. Funciones Monopulso a altura de 4m. . . . .	46
3.50. Patrón de Radiación para una altura de 2m. . . . .	47
3.51. Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 2m. . . . .	48
3.52. Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 para una altura de 2m. . . . .	48
3.53. Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 para una altura de 2m. . . . .	48
3.54. Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 para una altura de 2m. . . . .	49
3.55. Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 para una altura de 2m. . . . .	49
3.56. Diagrama Suma-Diferencia P239-P23 para una altura de 2m. . . . .	49
3.57. Funciones Monopulso para una altura de 2m. . . . .	50
3.58. Patrón de Radiación para una altura de 1m. . . . .	51
3.59. Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 1m. . . . .	51
3.60. Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 a una altura de 1m. . . . .	52
3.61. Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 a una altura de 1m. . . . .	52
3.62. Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 a una altura de 1m. . . . .	52
3.63. Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 a una altura de 1m. . . . .	53
3.64. Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 a una altura de 1m. . . . .	53
3.65. Funciones Monopulso a una altura de 1m. . . . .	53
3.66. Funciones Monopulso. . . . .	54
3.67. Patrón de Radiación para una altura de 50 cm. . . . .	55
3.68. Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 50 cm. . . . .	55
3.69. Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 a una altura de 50 cm. . . . .	55
3.70. Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 a una altura de 50 cm. . . . .	56
3.71. Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 a una altura de 50 cm. . . . .	56
3.72. Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 a una altura de 50 cm. . . . .	56
3.73. Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 a una altura de 50 cm. . . . .	57
3.74. Funciones Monopulso a una altura de 50 cm. . . . .	57
4.1. Coordenadas para protocolo de localización y asistencia al aterrizaje de drones.	60
4.2. Diagrama de Flujo. . . . .	61
4.3. Patrón Radiación Lineal EjeY. . . . .	63
4.4. Funciones Monopulso Lineales EjeY. . . . .	63
4.5. Función Monopulso m1 P1c37-P2c37 con Valor Monopulso EjeY. . . . .	64
4.6. Función Error m1 P1c37-P2c37 EjeY. . . . .	64
4.7. Funciones Monopulso Lineales con Valores Monopulso. . . . .	65

4.8. Funcion Error con OCE M5 EjeY. . . . .	65
4.9. Pseudoespectro EjeY. . . . .	66
4.10. Patrón Radiación Lineal z10m en el EjeX. . . . .	66
4.11. Funciones Monopulso Lineales EjeX. . . . .	67
4.12. Función Error con OCE M5 EjeX. . . . .	67
4.13. Pseudoespectros EjeX. . . . .	67
4.14. Estimación de la posición. . . . .	68
4.15. Pseudoespectros z10m EjeY. . . . .	69
4.16. Pseudoespectros z10m EjeX. . . . .	69
4.17. Estimación de la posición. . . . .	69
4.18. Patrón Radiación Lineal z=10m. . . . .	71
4.19. Funciones Monopulso Lineales Eje Y z=10m. . . . .	71
4.20. Funcion Monopulso m1 P1c37-P2c37 Eje Y z=10m. . . . .	72
4.21. Funcion Error m1 P1c37-P2c37 Eje Y z=10m. . . . .	72
4.22. Funciones Monopulso Lineales con Valores Monopulso Eje Y z=10m. . . . .	72
4.23. Funcion Error con OCE M=5 Eje Y z=10m. . . . .	73
4.24. Pseudoespectros Eje Y z=10m. . . . .	73
4.25. Ambigüedades APS Eje Y z=10m. . . . .	73
4.26. Patrón Radiación Lineal en el Eje X z=10m. . . . .	74
4.27. Funciones Monopulso Lineales en el Eje X z=10m. . . . .	74
4.28. Función Error con OCE M=5 EjeX z=10m. . . . .	75
4.29. Pseudoespectros Eje X z=10m. . . . .	75
4.30. Ambigüedades en el Pseudoespectro Eje X z=10m. . . . .	75
4.31. Ambigüedades en el Pseudoespectro Eje X z=10m. . . . .	76
4.32. Estimacion de la posición z=10m. . . . .	76
4.33. Patrón Radiación Lineal z=4m. . . . .	77
4.34. Funciones Monopulso Lineales Eje Y z=4m. . . . .	77
4.35. Función Error con OCE M5 Eje Y z=4m. . . . .	78
4.36. Pseudoespectros Eje Y z=4m. . . . .	78
4.37. Función Error con OCE M=5 Eje X z=4m. . . . .	79
4.38. Pseudoespectros Eje X z=4m. . . . .	79
4.39. Estimación de la posición z=4m. . . . .	80
4.40. Patrón Radiación Lineal z=1m. . . . .	80
4.41. Funciones Monopulso Lineales Eje Y z=1m. . . . .	81
4.42. Funcion Error con OCE M=5 Eje Y z=1m. . . . .	81

4.43. Pseudoespectros Eje Y $z=1\text{m}$ . . . . .	81
4.44. Ambigüedades APS Eje Y $z=1\text{m}$ . . . . .	82
4.45. Función Error con OCE $M=5$ Eje X $z=1\text{m}$ . . . . .	82
4.46. Pseudoespectros Eje X $z=1\text{m}$ . . . . .	83
4.47. Estimación de la posición $z=1\text{m}$ . . . . .	83





# Índice de tablas

3.1. Parámetros de diseño $L_A$ y $W_0$ . . . . .	24
3.2. Parámetros de diseño. . . . .	25
3.3. Ángulo de radiación y valor de ganancia para cada frecuencia. . . . .	26
3.4. Ángulo de radiación y valor de ganancia para cada frecuencia. . . . .	32
3.5. FoV Funciones Monopulso $z=30m$ . . . . .	37
3.6. FoV Funciones Monopulso $z=12m$ . . . . .	40
3.7. FoV Funciones Monopulso a una altura de 10m . . . . .	43
3.8. FoV Funciones Monopulso a una altura de 4m . . . . .	47
3.9. FoV Funciones Monopulso para una altura de 2m . . . . .	50
3.10. FoV Funciones Monopulso a una altura de 1m . . . . .	54



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Objetivos

#### 1.1.1. Objetivo general

El objetivo principal del Trabajo Fin de Grado es el diseño de un sistema radar monopulso para el seguimiento y asistencia al aterrizaje autónomo de drones en dos coordenadas espaciales (2D). El sistema está compuesto por una antena formada por un array de 4 antenas Half-width MLWA que constituyen el sistema de posicionamiento de bajo coste. El dron se colocará mediante tecnología GPS sobre el campo de acción del sistema, a una altitud mínima fijada por el campo de acción, donde comenzará su localización y asistencia al aterrizaje mediante técnicas monopulso. El sistema trabajará con tres canales Bluetooth Low Energy en la banda de 2.4GHz.

#### 1.1.2. Objetivos diferenciados

Para que el objetivo principal pueda cumplirse, se deben diferenciar tareas más concretas cuya resolución ayude a cumplir el objetivo final. Por ello, existen varios objetivos diferenciados:

1. Manejo del software comercial HFSS.
2. Diseño y desarrollo del sistema de antenas monopulso 2D.
3. Estudio de la variación de diagrama de radiación del array de antenas con la distancia.
4. Procesado de señal del sistema monopulso.
5. Evaluación de prestaciones.

## 1.2. Fases

Este proyecto se han realizado en diferentes fases:

1. Manejo del software comercial HFSS.
2. Diseño de una Microstrip Leaky Wave Antenna.
3. Diseño del sistema monopulso 2D de antenas integrado en una plataforma de aterrizaje de 1x1m.
4. Propuesta y diseño del sistema de antenas monopulso 2D.
5. Estudio de los diagramas de radiación en campo lejano, región de Fresnel y campo cercano.
6. Procesado de señal del sistema monopulso.
7. Evaluación sobre las prestaciones del sistema y los parámetros que la determinan.

En los siguientes capítulos se desarrollarán detenidamente cada una de ellas.

## 1.3. Estructura

En el presente capítulo se indican los objetivos principales del proyecto para cumplir la tarea principal de conseguir un sistema de aterrizaje autónomo de un dron. Además se muestran unas fases diferenciadas que deben seguirse para conseguir este objetivo común.

En el segundo capítulo, llamado *Fundamentos y conceptos generales*, introducimos los conceptos teóricos que incluye el campo de acción de todo el proyecto. Se explica desde la tecnología a utilizar para el diseño de nuestro sistema hasta la teoría básica de sistemas radar monopulso que nos permitirán el aterrizaje autónomo del dron.

El tercer capítulo, denominado *Desarrollo del proyecto*, se muestra las caracterizaciones físicas de la antena individual y completa del sistema monopulso, sus resultados, el estudio de la influencia de la distancia, desarrollo del procesado de la señal con el estudio de las funciones monopulso para cada altura, que incluyen la evaluación de las prestaciones del sistema.

El cuarto capítulo, denominado *Estimación de la posición del dron*, se explica el protocolo de aterrizaje del dron y se presentan distintos casos de estudio que se podrían dar en la realidad y se comprueba si estos resultados son de utilidad y el error que se puede llegar a considerar.

El quinto capítulo, denominado *Conclusiones y líneas futuras*, se presentan las resoluciones del trabajo planteado y se efectúa un análisis de estos resultados si han sido de utilidad y si sirven para continuar en líneas futuras con el proyecto.



# Capítulo 2

## Fundamentos y conceptos generales

### 2.1. Guía de Onda

Estructura física que guía ondas electromagnéticas, con una pérdida mínima de energía al restringir la expansión a una o dos dimensiones. El significado más común podemos definirlo como un tubo metálico que transporta ondas de alta frecuencia, particularmente microondas, ya que para estas frecuencias las líneas de transmisión y otras tecnologías como los cables coaxiales presentan atenuaciones muy elevadas impidiendo que la transmisión sea adecuada. Las paredes conductoras del tubo confinan la onda en el interior por reflexión en la superficie de estas, de este modo no hay pérdidas por radiación. Una guía de onda puede estar hueca o rellena por un material dieléctrico. Podemos ver una representación de como se propagan los campos en el interior de la guía en la figura 2.1.

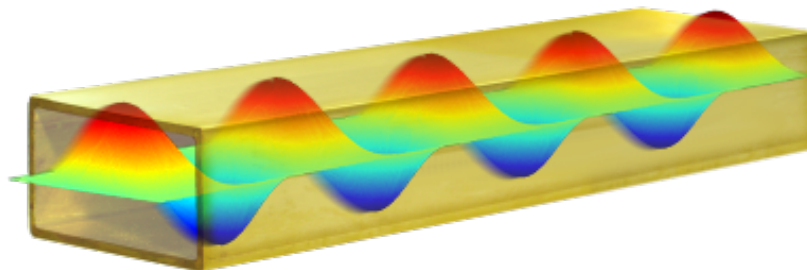


Figura 2.1: Representación de los campos electromagnéticos en una guía de onda.

### 2.1.1. Modos de propagación y frecuencias de corte

Las ondas electromagnéticas viajan a través de la guía por medio de diferentes configuraciones a las que llamamos modos de propagación, que representan cada una de las posibles soluciones de la ecuación de onda (2.1).

$$(\nabla^2 + k^2)A = 0 \quad (2.1)$$

donde  $\nabla^2$  es el laplaciano,  $k$  es el número de onda y  $A$  es la amplitud.

Un modo de propagación se caracteriza por satisfacer ciertas restricciones conocidas como condiciones de contorno. Además cada modo viene determinado por su frecuencia de corte, que se define como la frecuencia mínima a la que puede propagarse dicho modo, y como consecuencia de esto el modo con la frecuencia de corte más baja, es el modo fundamental de la guía de onda.

Los modos de propagación dependen de la longitud de onda ( $\lambda = c/f$ ) y de las dimensiones de la guía. Como cada modo tiene una frecuencia de corte asociada, la frecuencia deberá ser mayor que la frecuencia de corte, de esta manera la onda electromagnética se transmitirá a través de la guía. Tenemos tres tipos de modos:

1. TEM (Modo Transversal Electro-Magnético): Para este modo  $E_z = H_z = 0$ , tiene la característica de que solo puede propagarse en guías que tengan dos conductores con una diferencia de potencial entre ellos.
2. TE (Modo Transversal Eléctrico): las soluciones derivan de la componente  $H_z$  con la condición de que  $E_z = 0$
3. TM (Modo Transversal Magnético): las soluciones derivan de la componente  $E_z$  con la condición de que  $H_z = 0$ , la componente axial de campo magnético es 0, esto nos asegura la transmisión de potencia en la dirección  $z$ , suponiendo la dirección de propagación deseada.

## 2.2. Línea de Transmisión

Es una estructura física que guía ondas electromagnéticas de un punto a otro. Una línea de transmisión consta de dos o más conductores paralelos que conectan una fuente a una carga. Algunos ejemplos de tecnologías de líneas de transmisión son: cable coaxial, línea bifilar, placa paralela o línea de transmisión planas como stripline o microstrip.



Una línea de transmisión está definida por su impedancia característica  $Z_0$ , que se puede definir como la relación entre la onda de voltaje incidente y la onda de corriente en cualquier punto de la línea.

Las líneas planares, un tipo de líneas de transmisión, se utilizan mucho en aplicaciones electrónicas por su facilidad de construcción en circuitos integrados y para crear componentes de circuitos como filtros, acopladores, resonadores, antenas u otros. Hay diversas variantes de las líneas planas, las más usadas son la *stripline* y la línea de *microstrip*.

### 2.2.1. Stripline

Como ya se ha comentado anteriormente la *Stripline* es un tipo de línea de transmisión plana. Su geometría se muestra en la figura 2.2. Se compone de una tira conductora muy fina de ancho  $W$  que se encuentra centrada entre dos planos de tierra de separación  $b$ , la región interior entre los planos de tierra esta rellena de un material dieléctrico.

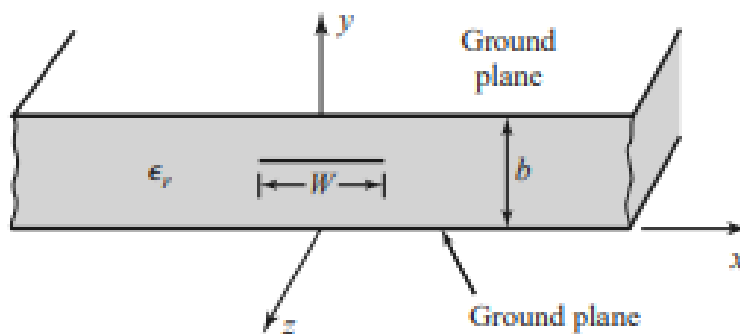


Figura 2.2: Stripline Líneas de Campos

Como la *stripline* consta de dos conductores y un dieléctrico homogéneo, admite la propagación de un modo TEM, y este es el modo habitual de operación, al igual que la guía de placa paralela y la línea coaxial, sin embargo, la *stripline* también admite modos de orden superior.

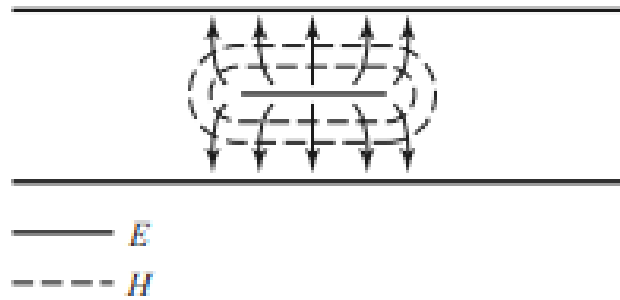
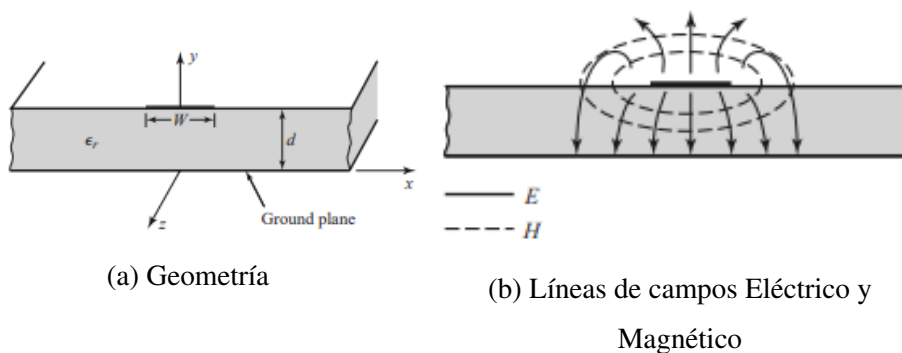


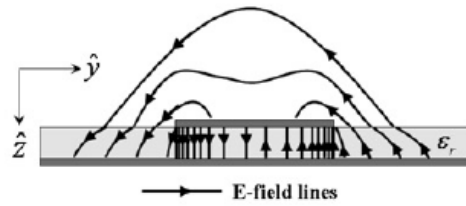
Figura 2.3: Stripline Líneas de Campos

### 2.2.2. Microstrip

La *microstrip*, evolución de la *stripline*, es una de las tecnologías más populares de líneas de transmisión planas, también conocida como línea de transmisión abierta debido a su estructura (Fig. 2.4a). A diferencia de la *stripline*, las líneas *microstrip* son estructuras abiertas, de forma que las líneas de campo no están confinadas en su interior. Debido a su carácter abierto, su construcción es más sencilla, por consiguiente se añade la desventaja de una radiación al exterior y una posible captación de interferencias (Fig. 2.4b).

Figura 2.4: Línea de Transmisión *Microstrip*

Un boceto de las líneas de campo es mostrado en Fig.2.5 en la cual, se aprecia a lo largo de la línea central aparece una inversión de fase que da como resultado campos E dirigidos opuestamente en los bordes, permitiendo que los campos se desacoplen e irradien [9].

Figura 2.5: *Microstrip* Líneas de Campos

La geometría de una *microstrip* (Fig. 2.4a) se compone de un conductor de ancho  $W$  impreso en un sustrato conectado a tierra, el sustrato es un dieléctrico de espesor  $d$  y permitividad relativa  $\epsilon_r$ .

Si el sustrato dieléctrico no estuviera presente ( $\epsilon_r = 1$ ), tendríamos una línea de dos hilos que consiste en un conductor plano sobre un plano de tierra, y un plano sobre un medio homogéneo (aire). Esto constituiría una línea de transmisión como la *stripline* anterior en la que se podría transmitir un modo TEM con velocidad de fase  $v_p = c$  y constante de propagación  $\beta = k_0$ .

En la *microstrip*, la presencia del dieléctrico, particularmente el hecho de que el dieléctrico no llena la región superior de la tira, complica el comportamiento y el análisis de la línea de *microstrip*. A diferencia de la *stripline*, donde todos los campos están contenidos dentro de una región dieléctrica homogénea, la *microstrip* tiene algunas (generalmente la mayoría) de sus líneas de campo en la región dieléctrica entre la tira conductor y el plano de tierra y alguna fracción en la región del aire sobre el sustrato. Por esta razón la línea de *microstrip* no puede soportar una onda TEM ya que la velocidad de fase de los campos TEM en la región dieléctrica serían  $c/\sqrt{\epsilon_r}$ , mientras que la velocidad de fase de los campos TEM en la región del aire sería  $c$ , por lo que una condición de coincidencia de fase en la interfaz dieléctrico-aire sería imposible de hacer cumplir [3].

## 2.3. Guía de Onda Integrada en Sustrato

En apartados anteriores se ha introducido tanto la tecnología de líneas de transmisiones planares como la no-planar. Además se han introducido anteriormente algunas de las desventajas más importantes de la tecnología *microstrip*: pérdidas por radiación, pérdidas por ondas superficiales, pérdidas dieléctrico y pérdidas por los conductores, estas desventajas dificultan el acople entre líneas de transmisión planas con no planas, haciendo esta tecnología poco eficiente. En cambio, esta tecnología tiene un bajo coste y al trabajar a frecuencias elevadas, los tamaños

son bastante reducidos, y pueden ser construidas mediante técnicas de circuitos impresos de tal forma que se eliminan las desventajas de las guías de onda convencionales, las cuales residen concretamente en su proceso de fabricación que es muy tedioso y caro, sin embargo es la mejor tecnología si se quiere un sistema de altas prestaciones. Sería de utilidad conseguir conjuntamente las ventajas tanto de una como de la otra. Por ello, aparece la solución de crear una estructura híbrida que se componga de estructuras planares y no-planares, unificando así un sistema con altas prestaciones y un bajo coste de fabricación [5]. Surgió un nuevo concepto: guía de onda integrada de sustrato (*Substrate Integrated Waveguide, SIW*) en el cual se integra una guía de onda con tecnología microstrip.

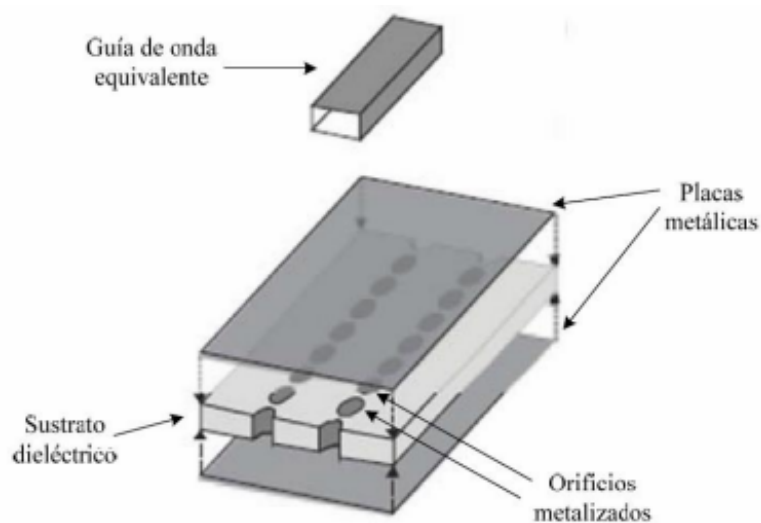


Figura 2.6: Estructura de una SIW

La estructura de una SIW consiste en dos placas metálicas, superior e inferior, que funcionan como las paredes de una guía de onda y los orificios metálicos que hacen de pared lateral. La diferencia con la guía de onda reside en esto, en las paredes laterales metálicas, ya que estas están formadas por filas de orificios o postes que atraviesan el dieléctrico. Debido a que hay orificios en las paredes laterales, los modos magnéticos transversales (TM) no existen, ya que estos necesitan un contorno formado por paredes metálicas (conductores ideales o con conductividad infinita), en este caso tendremos la condición de contorno de pared eléctrica (PEC) que impone que el campo eléctrico tangencial a ella sea nulo ( $E_z = 0$ ). Si la distancia entre postes es lo suficientemente pequeña, puede actuar como una pared metálica en una guía de onda convencional. El modo  $TE_{10}$  por lo tanto, es el modo dominante.

Para el modo  $TE_{10}$  la dimensión "b" no es importante ya que no afecta la frecuencia de corte

de la guía de ondas (2.2). Por lo tanto, el sustrato puede tener cualquier grosor, solo afecta la pérdida dieléctrica (más gruesa = menor pérdida).

$$f_{cm,n} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.2)$$

Ecuación frecuencia de corte de un modo TE en una guía [19].

## 2.4. Leaky-Wave Antenna (LWA)

Una antena de ondas con fugas es básicamente una estructura de guía de ondas que posee un mecanismo que le permite filtrar energía a lo largo de toda su longitud [1]. El primer ejemplo de una antena Leaky es una guía de onda rectangular con una hendidura a lo largo de su estructura, en nuestro caso de interés nos vamos a centrar en las SIW-LWA, Estas antenas pertenecen al grupo de antenas progresivas (TWA, Travelling Wave Antenas), se caracterizan por tener estructura simple, bajo coste de producción y fácil fabricación. Para conseguir este tipo de antenas se utiliza la tecnología de guía de onda integrada en sustrato (SIW) que hemos comentado anteriormente.

Dentro del conjunto de las SIW-LWA podemos encontrar las MLWA, Microstrip Leaky-wave Antenna. En este caso en vez de hacer una hendidura se consigue tener ondas de fuga separando los postes de una de las filas, de esta manera, parte de la energía se radia al exterior mientras la otra parte se sigue propagando por la cavidad, a este fenómeno se le conoce como Superficie Parcialmente Reflectante (PRS) [8].

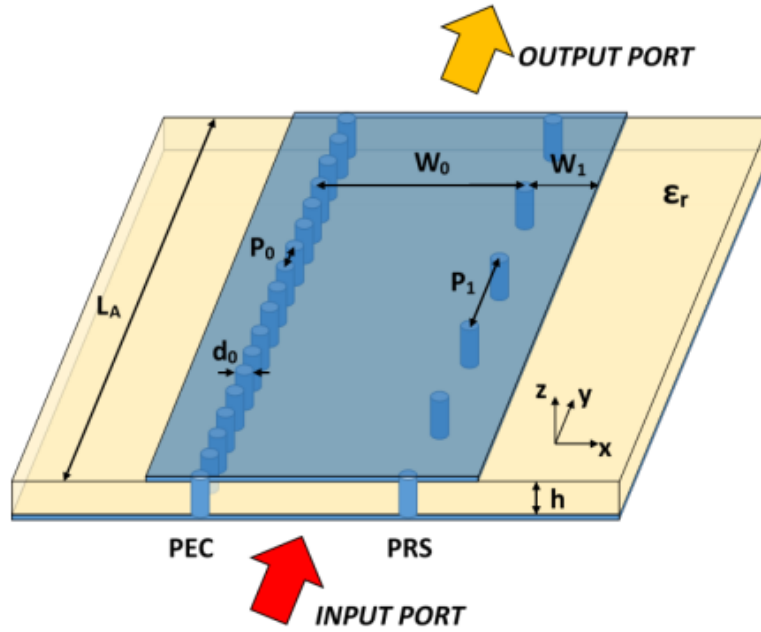


Figura 2.7: Estructura de una SIW-LWA

Normalmente la MLWA uniforme trabaja con el primer modo de orden superior, con una constante de propagación compleja ( $k$ )

$$k_y = \beta_y - j\alpha_y \quad (2.3)$$

donde  $\beta_y$  es la constante de fase y  $\alpha_y$  la constante de atenuación.

La constante de atenuación ( $\alpha$ ) está directamente relacionada con la anchura del haz del lóbulo principal. Esta constante también es conocida como tasa de radiación, ya que determina las pérdidas de radiación de un modo leaky.

En cuanto a la constante de fase ( $\beta$ ), esta está relacionada con el ángulo de radiación  $\theta_{RAD}$ :

$$\sin\theta_{RAD} = \frac{\beta_y}{k_0} \quad (2.4)$$

Siendo  $\beta_y$  constante de fase en la dirección de propagación y  $k_0$  número de onda en espacio libre [11].

El ángulo de radiación de estas antenas  $\theta_{RAD}$ , definido como la dirección de mayor directividad del diagrama de radiación, se puede obtener a partir de la ecuación 2.4.

El ángulo de radiación depende de la frecuencia, pero no solo por el cambio de  $k_0$ , que varía de forma lineal con la frecuencia, sino también por la variación de  $\beta_y$  con la frecuencia, debido a la propagación de la onda dentro de la antena.

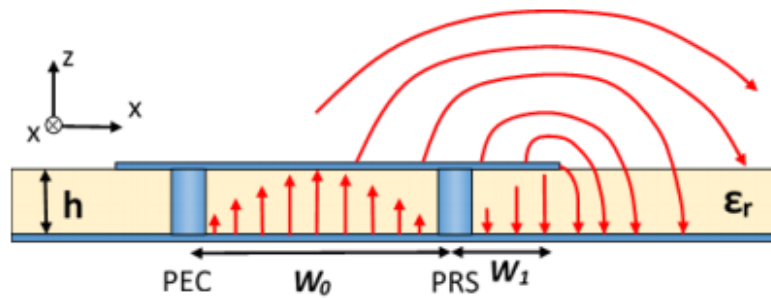


Figura 2.8: Líneas de Campo de una SIW-LWA

La complejidad al analizar y estudiar las SIW leaky-wave antenas es mayor que en el caso de guía de onda debido a su carácter inhomogéneo y dispersivo. En cambio algunas de las ventajas de las antenas Leaky-Wave es que nos permiten controlar:

- El ángulo de apuntamiento en frecuencia, es decir, nos permite controlar la dirección de máxima radiación.
- La directividad, y como consecuencia, el ancho de banda.

En diagrama de radiación de las LWA el lóbulo principal se eleva desde el plano horizontal de la antena con una inclinación respecto al eje Z determinada por el ángulo de escaneo  $\theta_R$ . El haz directivo del plano H lo hace adecuado para formar parte de un sistema de radar[11]. Y en el plano E casi omnidireccional, esta configuración se la conoce como diagrama de Haz de Abanico o Fan Beam [8].

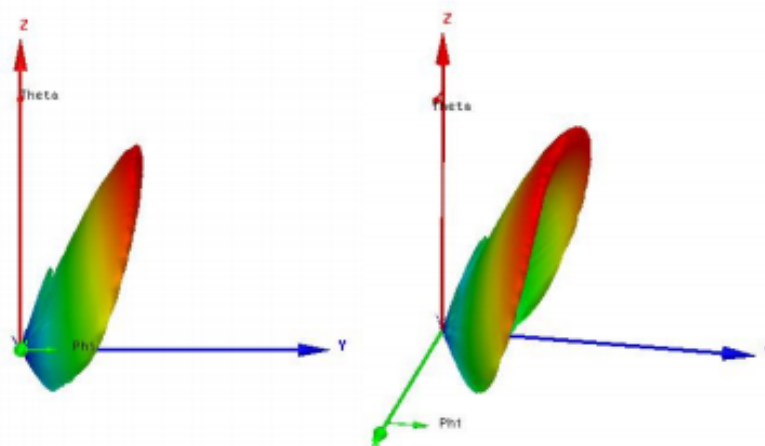


Figura 2.9: Diagrama Fan Beam [8]

## 2.5. Half-width Leaky-wave Antenna (HWLWA)

Centrandonos en el estudio de Half-mode Microstrip Leaky-Wave Antenna (HMLWA), que será la tecnología usada en el diseño de nuestras antenas, el ancho de la línea microstrip se reduce a la mitad ( $W/2$ ) utilizando una pared metálica en un lado de la línea, que actúa como un conductor eléctrico perfecto (PEC) como se muestra en la figura 2.10.

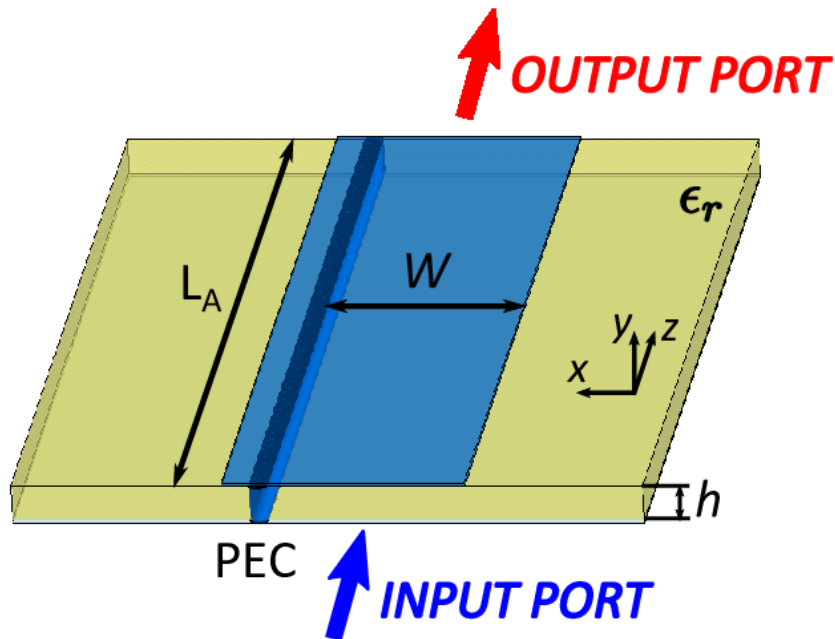


Figura 2.10: Estructura de una Half-width Leaky-wave Antenna [4]

Esta antena de onda de fugas de ancho medio tiene características de radiación similares a una antena Leaky-Wave completa, siendo el modo dominante el primer modo de orden superior, el modo EH<sub>0</sub> no coexiste debido a la pared PEC.

En la figura 2.11 se representa la distribución de campo eléctrico en la sección transversal de la antena. Estas líneas de campo cuando llegan al extremo opuesto de los postes se radian al exterior.

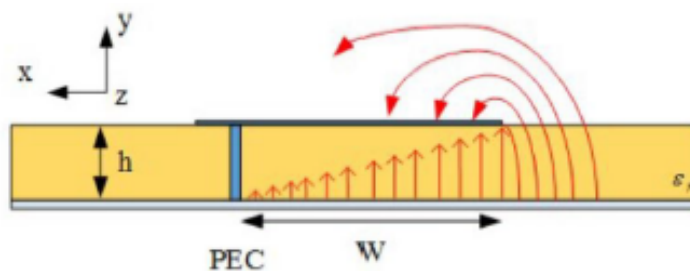


Figura 2.11: Líneas de Campos en una Half-width Leaky-wave Antenna [4]



Como es bien sabido, las propiedades de radiación de LWA son determinadas principalmente por la propagación compleja del modo de fuga constante 2.5. Concretamente, el ángulo de apuntamiento 2.6 medido desde el eje Y viene dado por la constante de fase  $\beta$  y el ancho del haz 2.7 por la tasa de fuga  $\alpha$ . Por otro lado, la cantidad de energía radiada depende directamente de la longitud LWA  $L_A$  y  $\alpha$ , y determina la eficiencia de radiación de antena 2.8 que para LWA es típicamente establecido en  $\eta_{RAD} = 90\%$  [4].

$$k = \beta - j\alpha \quad (2.5)$$

$$\sin\theta_{RAD} \approx \frac{\beta}{k_0} \quad (2.6)$$

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{\frac{L_A}{\lambda_0} \cos\theta_{RAD}} \quad (2.7)$$

$$\eta_{RAD} = 1 - e^{-2\alpha L_A} = 1 - e^{-4\pi \frac{\alpha}{k_0} \frac{L_A}{\lambda_0}} \quad (2.8)$$

En próximas secciones se presentarán las medidas como el ancho y longitud de la línea o el grosor del sustrato y diámetros del PEC, que determinará el diseño de la LWA que se utilizará como parte del sistema de posicionamiento.

## 2.6. Tecnología Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy es una mejora del Bluetooth simple, ya que este consume mucha menos energía y tiene bajo coste. Es una tecnología de corto alcance, hasta 150m, suficiente para nuestro caso de estudio.

Centrándonos en su capa física, tenemos 40 canales de 2MHz de los cuales:

- 3 canales de señalización para descubrimiento y establecimiento de la conexión.
- 37 canales de datos.

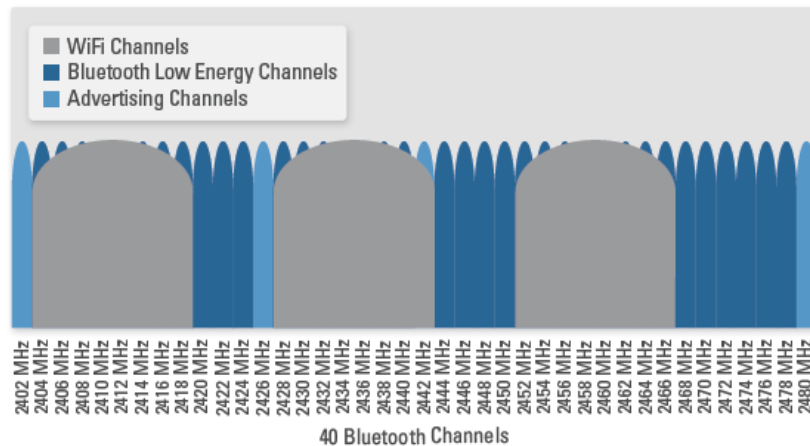


Figura 2.12: Canales Bluetooth Low Energy (BLE)

En este sistema solo nos serán útiles los 3 canales de señalización, es decir los canales 37 (2.402 GHz), 38 (2.426 GHz) y 39 (2.48 GHz) que están colocados estratégicamente para no interferir con otras frecuencias de su banda de trabajo (2.4GHz).

## 2.7. Sistema de Localización

### 2.7.1. Introducción

En este apartado se introducirán las diferentes tecnologías y sistemas de localización que se usan en este proyecto. Describiéndolas por orden de actuación en el proceso de localización y asistencia al aterrizaje. Primero se introducirá el concepto de GPS, gracias a este sistema el dron se coloca en un área determinada por las coordenadas terrestres de la localización de la antena, este área esta dentro del campo de visión de la antena que es bastante amplio para evitar los errores de posicionamiento GPS. Después se explicará el Sistema Radar Monopulso o Sistema Monopulso, el cual será el encargado del la siguiente fase: localización y aterrizaje del dron.

El sistema de localización implementado esta basado en en la detección de la localización a través de nodos localizados en posiciones fijas y conocidas. Estos tienen gran precision y son de corto alcance como WiFi, Bluetooth o RFID. Se pueden clasificar en función de la información de la señal que intercambian el objetivo y el nodo fijo. Se clasifican en: tiempo de llegada (ToA, Time of Arrival), ángulo de llegada (AoA, Angle of Arrival) o el nivel de potencia recibida de la señal del objetivo a un punto de referencia (RSS, Received Signal Strength).

En el caso de que la información a utilizar sea el nivel de potencia, como ocurre en este caso, los sistemas están basados en la diferencia de potencia de la señal recibida por cuatro

nodos fijos. Por tanto es necesario que el sistema conozca los patrones de radiación de los nodos, que en este caso serán antenas HWLWA, y la posición de estas. Finalmente, mediante un algoritmo de posicionamiento se podrá conocer la dirección de llegada de la señal del objetivo.

### 2.7.2. GPS

Global Position System (GPS) es un sistema de Posicionamiento Global de radionavegación que permite localizar una posición tridimensional con una cierta precisión (por ejemplo, latitud, longitud y altitud). Para determinar su posición, un usuario utiliza 4 o más satélites y utiliza la trilateración. Método matemático para determinar las posiciones relativas de objetos usando la geometría de triángulos de forma análoga a la triangulación. A diferencia de ésta, que usa medidas de ángulo (junto con al menos una distancia conocida para calcular la localización del sujeto), la trilateración usa las localizaciones conocidas de dos o más puntos de referencia, y la distancia medida entre el sujeto y cada punto de referencia. Para determinar de forma única y precisa la localización relativa de un punto en un plano bidimensional usando sólo trilateración, se necesitan generalmente al menos 3 puntos de referencia.

Esta formado por:

- Una constelación de 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales inclinados  $55^\circ$  desde el ecuador en órbita terrestre a unos 20.200 kilómetros y dando vueltas cada 12 horas.
- Estaciones terrestres monitoreando y manteniendo los satélites GPS.
- Receptores que procesan las señales de navegación de los satélites GPS y calculan la posición y el tiempo.

Aunque el GPS está dando excelentes resultados en términos de localización tiene un error de precisión de 1-2m, aunque existen mejoras del GPS simple como el DGPS o GPS diferencial que consigue reducir el error de posicionamiento a centímetros. Por eso en este proyecto se propone una solución para evitar dicho error de localización en el aterrizaje del dron, para que este aterrice justo en la posición indicada sin error, esta solución es usar un sistema radar monopulso que se introduce a continuación.

### 2.7.3. Sistema Radar Monopulso

Los sistemas de radar monopulso son ampliamente utilizados en muchas áreas desde el control civil de tránsito aéreo hasta en varias aplicaciones militares.



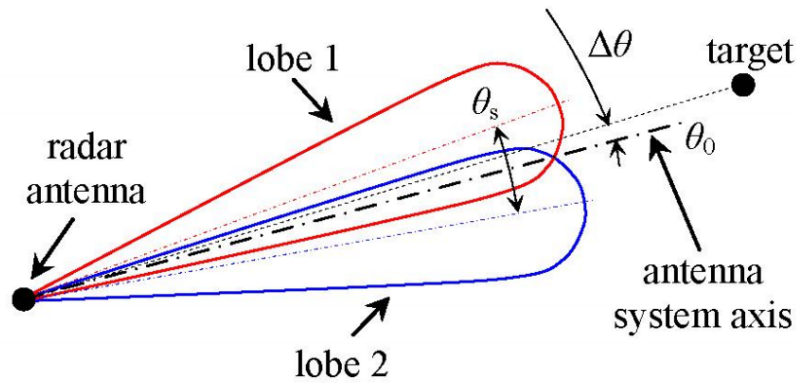


Figura 2.13: Patrón de radiación de dos antenas con direcciones del haz entrelazados con cierto  $\theta$ .

Los sistemas monopulso explicados han sido diseñados para localizar objetivos en un plano. En nuestro caso, el objetivo es diseñar un sistema monopulso para encontrar objetivos en dos planos (2D). Los sistemas de búsqueda de dirección para dos planos son más complejos. Para encontrar objetivos en dos planos lo que haremos será una combinación de dos sistemas de monopulso, uno de los cuales está diseñado para operar en el plano de acimut y el segundo en el plano de elevación, estos planos son los usados normalmente debido a la distribución mas habitual de las antenas, pero no serán concretamente los mismos en nuestro sistema ya que tendremos la antena orientada diferente, en apartados posteriores se comentará dicha diferencia. Tal diseño requiere el uso de una antena con cuatro patrones de radiación y varios canales. Es decir, el sistema de antena descrito inicialmente de dos antenas debe existir para cada coordenada angular en la que el sistema de radar/localización está escaneando para la medición simultánea en acimut y elevación o los planos respectivos según el diseño [20].

## 2.8. Análisis de la función monopulso

Para el análisis de la función monopulso partimos de los patrones de ganancia de cada antena en dBs.

El primer paso es pasar a lineal dichos patrones y calibrar cada patrón de ganancia lineal con los factores de potencia correspondientes dependientes de la frecuencia  $PF_x(f_i)$ .

$$\overline{G_x(\theta, f_i)} = G_x(\theta, f_i)PF_x(f_i) \quad (2.9)$$

$$PF_x(f_i) = G_{MAX}/maxG_x(\theta, f_i) \quad (2.10)$$

$x = A, B, A', B' \ i = 1, 2, 3.$

Una vez tenemos las ganancias normalizadas calculamos las funciones monopolso (Monopulse Functions, MF). En nuestro sistema final tendremos 4 puertos, 2 para cada eje, uno para cada antena, que generan 2 patrones de radiación con 3 haces para cada canal (37, 38, 39). Por tanto tendremos 6 haces, es decir 5 funciones monopolso en cada eje, en total el sistema esta compuesto por 10 funciones monopolso.

$$MF(\theta, f_i) = \frac{\Delta(\theta, f_i)}{\Sigma(\theta, f_i)} = \frac{\overline{G_B}(\theta, f_i) - \overline{G_A}(\theta, f_i)}{\overline{G_B}(\theta, f_i) + \overline{G_A}(\theta, f_i)} \quad (2.11)$$

Esta ecuación es una extensión de la definición convencional de funciones de amplitud-monopulso [21], para el caso de nuestro array con escaneo en frecuencia.

Donde  $\Delta$  es la función diferencia y  $\Sigma$  función suma. Se les llama patrón suma y diferencia porque Se obtienen mediante la suma y resta de los patrones de haz individuales producidos por los cuatro puertos [21].

El campo de visión de cada MF viene dado por el rango angular sin ambigüedad, donde la función monopolso varía linealmente entre -1 y +1 [21].

Una vez obtenidas las funciones monopolso y con los factores de corrección de cada patrón de ganancia, obtenemos los valores monopolso, uno para cada función monopolso.

$$MV_m = \frac{P(x, f_i)PF_x(f_i) - P(y, f_i)PF_x(f_i)}{P(x, f_i)PF_x(f_i) + P(y, f_i)PF_x(f_i)} \quad (2.12)$$

El siguiente paso es calcular la función de error ( $Error_m(\theta)$ ), se calcula a partir de la diferencia entre la función monopolso y el valor monopolso medido para cada función (en cada coordenada). Esta función de Error representa la diferencia entre la dirección del objetivo y la dirección de puntería de la antena. Cuando las dos direcciones coinciden, la señal de error es cero. Es decir, la señal de error de monopolso se utiliza como una medida de la dirección del objetivo (DoA) en relación con la dirección del eje conocida. [21].

$$Error_m(\theta) = abs(FSPMF_m(\theta, f_i) - MV_m(f_i)) \quad (2.13)$$

Debido a pequeñas fluctuaciones de las funciones monopolso pueden aparecer ambigüedades angulares, para ello se calcula el error acumulativo total que no es más que el error cuadráti-

co medio de todos los errores cuando se considera un numero dado  $M$  de patrones monopulso.

$$OCE_M(\theta) = \sqrt{\sum_{m=1}^M \frac{1}{M} Error_m(\theta)^2} \quad (2.14)$$

De esta manera, se eliminan ambigüedades creadas y así podemos definir el pseudoespectro angular ( $APS(\theta)$ ) como el inverso de la  $OCE_M(\theta)$  en escala logarítmica.

$$APS(\theta) = -20\log\left(\frac{1}{OCE_M(\theta)}\right) \quad (2.15)$$





# Capítulo 3

## Desarrollo del proyecto

### 3.1. Diseño antena Half-width Leaky-wave individual en HFSS

En este apartado se va a mostrar el diseño de la antena HWLWA sobre un sustrato AD1000 usando el software HFSS. Se ha escogido como sustrato el material AD1000 debido a compromiso coste-prestaciones, consta de una permitividad relativa  $\epsilon_r=10.068$ , y tangente de pérdidas  $\tan(\delta) = 0,0009$ .

Como se ha introducido anteriormente, el diseño se compone de una microstrip sobre el sustrato AD1000, la cual tiene una fila de postes metálicos en uno de sus lados a lo largo de la línea, separados uniformemente formando un conductor eléctrico perfecto (PEC). Este diseño se ha creado en HFSS como se puede ver en la figura 3.2.

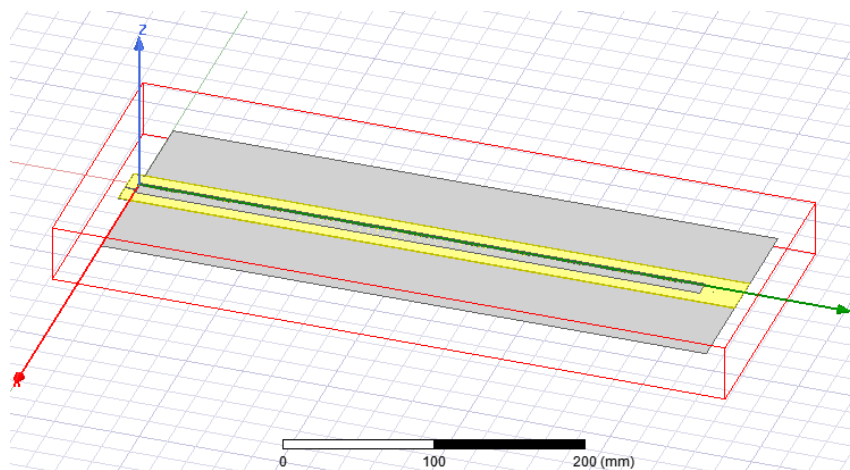


Figura 3.1: Diseño antena HWLWA en HFSS.

Los parámetros del diseño de la antena están basados en las características para las frecuencias de trabajo que se requieren. Estas frecuencias son las de los canales 37 (2.402GHz), 38

(2.426GHz) y 39 (2.48GHz) BLE.

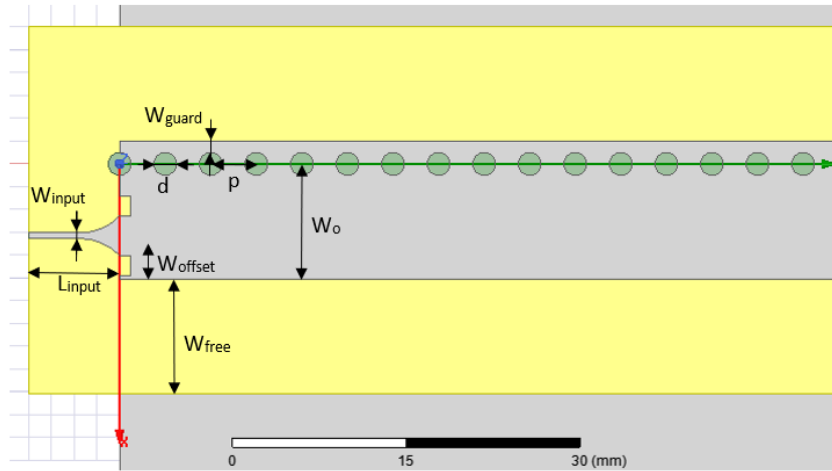


Figura 3.2: Parámetros de diseño de la LWA.

En cuanto a la longitud ( $L_A$ ) y anchura de la antena ( $W_0$ ), son los parámetros más determinantes en referencia a su influencia en los patrones de radiación.

- $L_A$ , nos determina la directividad ( $D$ ) y por tanto anchura del haz ( $\Delta\theta$ ), manteniéndose la siguiente relación:

$$\uparrow L_A \Rightarrow \uparrow D \Rightarrow \downarrow \Delta\theta$$

- $W_0$  controla el ángulo de máxima radiación del haz principal  $\theta_0$ , manteniendo la siguiente relación:

$$\uparrow W_0 \Rightarrow \uparrow \theta_0$$

De esta manera se han calculado ambos parámetros para obtener el patrón de radiación necesario para el sistema monopulso.

$L_A$	$W_0$
400 mm = $3.2\lambda$	10.1 mm

Tabla 3.1: Parámetros de diseño  $L_A$  y  $W_0$ .

Los postes metálicos tienen la misma longitud que el grosor del sustrato ( $h$ ) y un diámetro determinado por:

$$d < \frac{\lambda}{5} \quad (3.1)$$

Siendo su separación entre centros ( $p$ ):

$$p < 2d \quad (3.2)$$

Algunos de los valores de los parámetros son:

Parámetros	h	p	d	$W_{guard}$	$W_{free}$	$L_{input}$	$W_{input}$
Valor (mm)	0.508	4	2	2	10.1	8	0.5

Tabla 3.2: Parámetros de diseño.

### 3.1.1. Resultados Half-width LWA

Una vez tenemos los diferentes parámetros del diseño de la antena, obtenemos su patrón de radiación en campo lejano para cada frecuencia BLE.

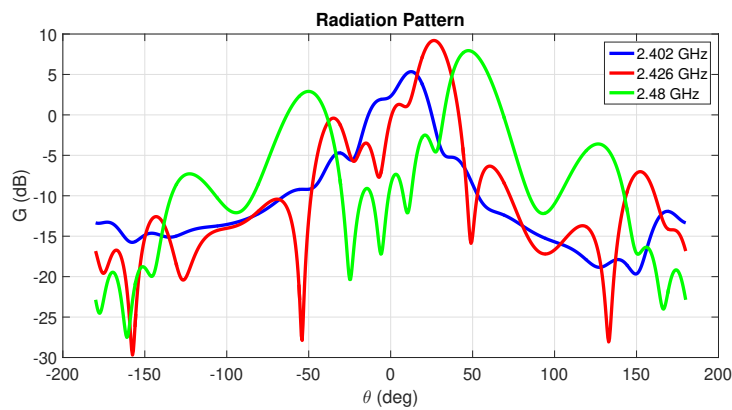


Figura 3.3: Diagrama de Radiación Plano H.

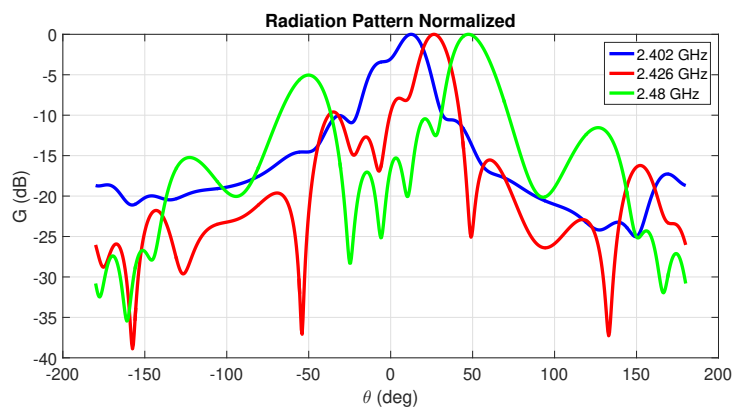


Figura 3.4: Diagrama de Radiación normalizado.

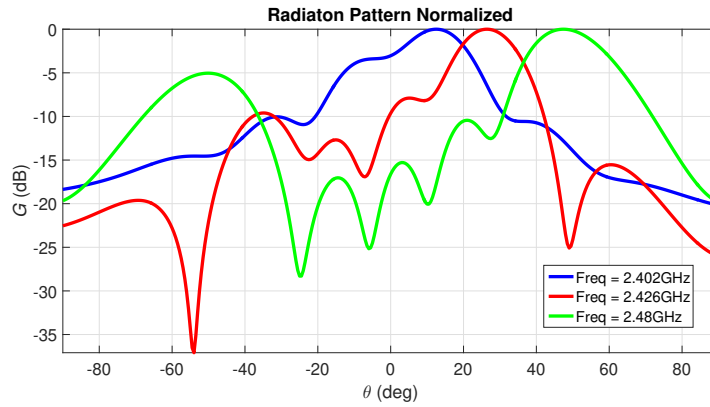


Figura 3.5: Diagrama de Radiación normalizado entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ .

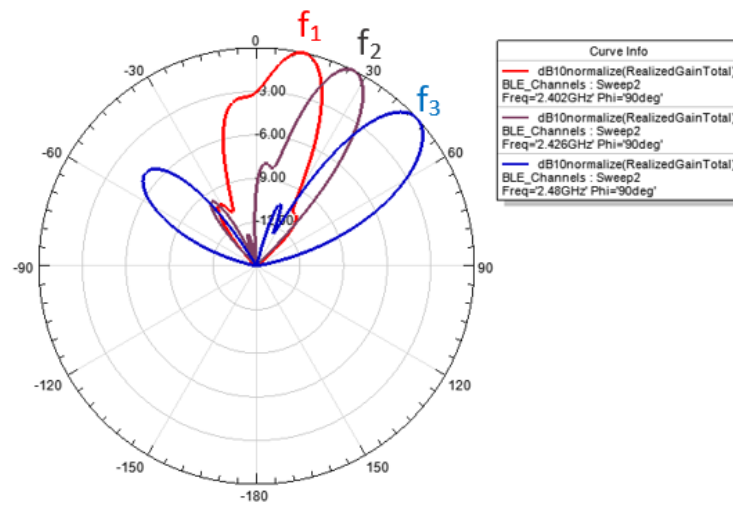


Figura 3.6: Diagrama de radiación.

Podemos ver en las distintas figuras la característica importante para el sistema monopulso que debe cumplirse, el escaneo frecuencial, la variación del ángulo máximo de radiación a medida que varia la frecuencia. Los ángulos de apuntamiento de cada frecuencia son:

	$\theta_{RAD}(deg)$	$G(dB)$
$f_1$	$12.5^\circ$	5.34
$f_2$	$26.5^\circ$	9.2
$f_3$	$47^\circ$	7.94

Tabla 3.3: Ángulo de radiación y valor de ganancia para cada frecuencia.

También se observa en la figura 3.7 el valor de Field Of View (FoV), que se corresponde con el rango del ángulo  $\theta_R$  que corte a  $-3dB$  . El valor de FoV se relaciona con el campo de

visión o detección que tendrá el sistema monopulso que comentaremos mas adelante. En este caso, es de  $+60^\circ$  respecto a la perpendicular (eje Z), dirección broadside de la antenna.

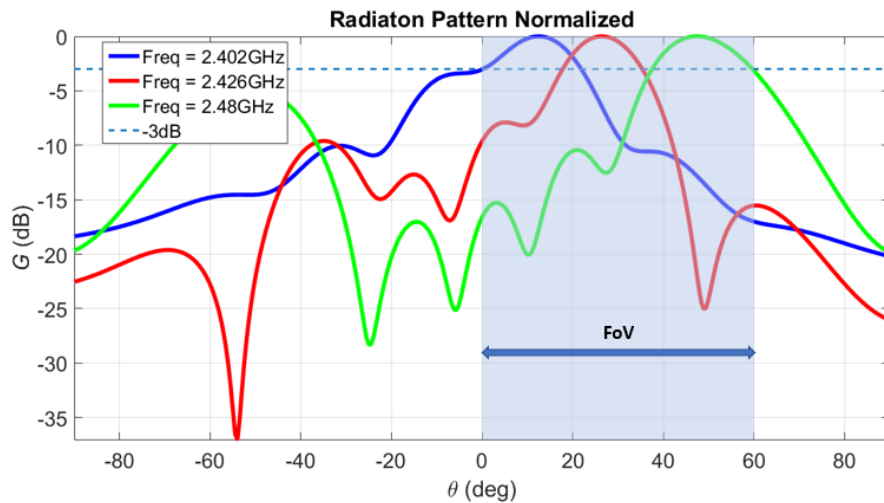


Figura 3.7: Diagrama de radiación.

En cuanto a sus diagramas en el plano E, obtenemos cada uno para cada angulo máximo de radiación de cada canal.

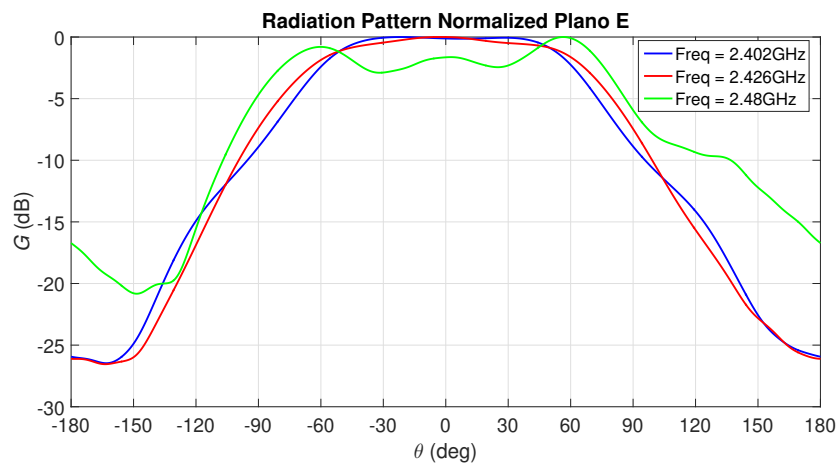


Figura 3.8: Ganancia en Plano E canal 37.

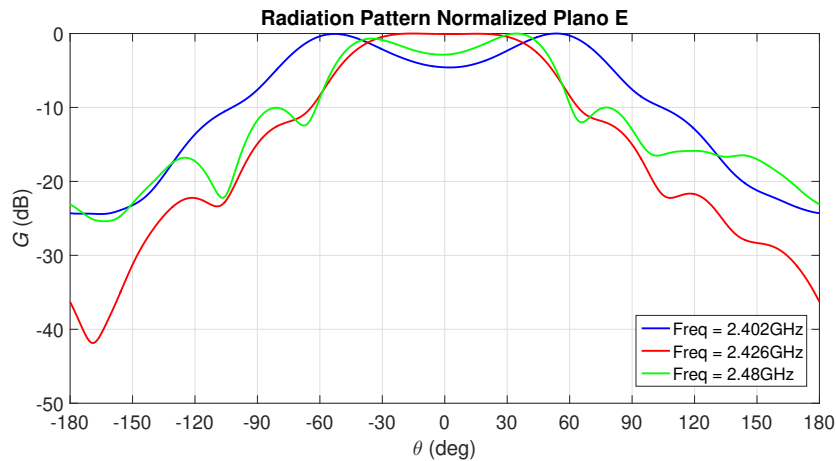


Figura 3.9: Ganancia en Plano E canal 38.

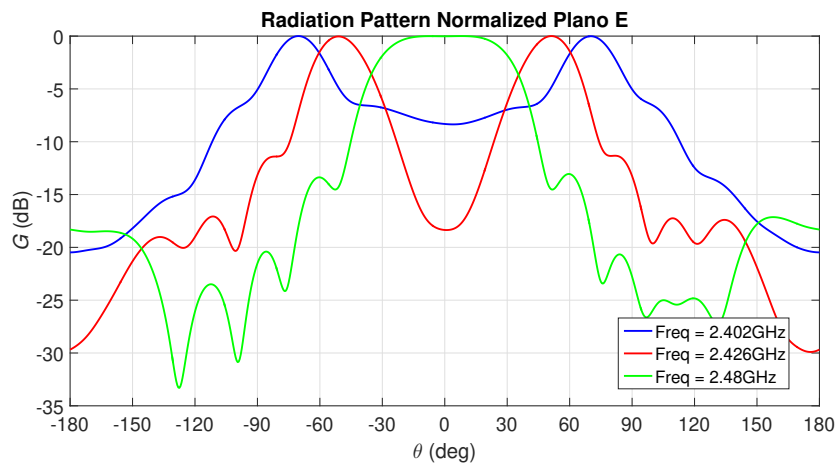


Figura 3.10: Ganancia en Plano E canal 39.

Se puede apreciar el comportamiento Fan Beam en plano H y plano E que se introdujo en capítulos anteriores.

## 3.2. Diseño sistema de antenas para el sistema monopulso 2D

A partir de la Half-width LWA diseñada anteriormente vamos a formar la configuración final del sistema, una antena compuesta por un array en configuración de cruz formado por cuatro antenas HWLWA iguales enfrentadas dos a dos. De esta manera se cumplen las condiciones necesarias para formar un sistema monopulso 2D que se explicaron en apartados anteriores. Estas son:

1. Antena con patrón de radiación con escaneo en frecuencia.

2. Antena con 2 patrones de radiación que se entrelacen formados por 3 canales frecuenciales cada uno, para tener resolución angular en cada dimension.

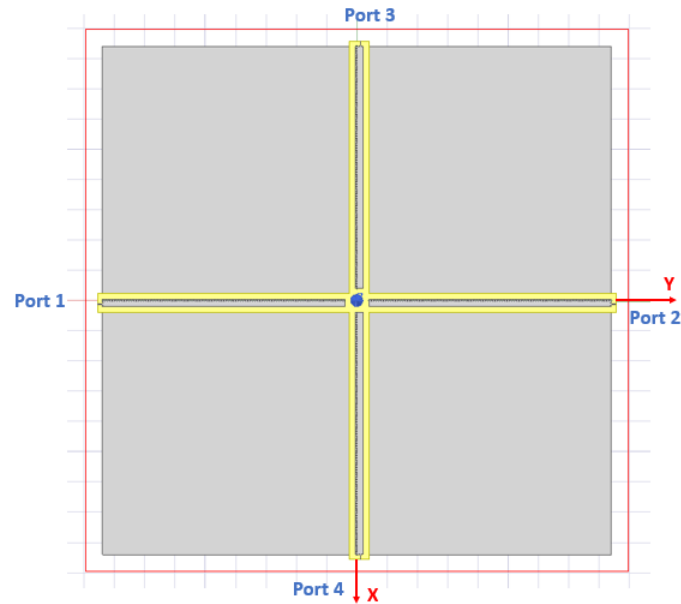


Figura 3.11: Diseño antena en HFSS.

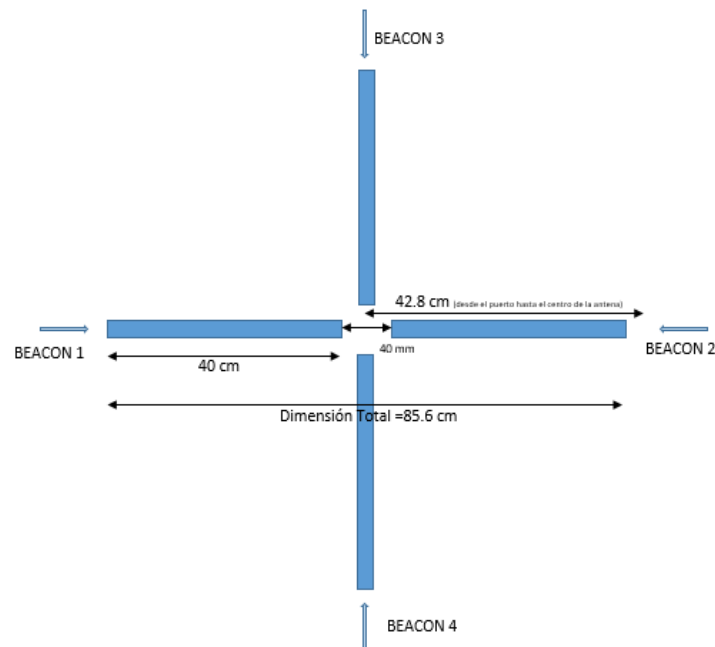


Figura 3.12: Estructura antena formada por 4 HW-LWA.

Como se comentó en el Apartado 2.6.3. el tener dos pares de antenas nos proporciona resolución en azimut y elevación, esto estaba referido a una antena colocada en un plano vertical.

Pero en nuestro caso la antena esta en un plano horizontal de manera que el drone aterrizará sobre la misma estructura realizando un descenso vertical. Por tanto, tendremos resolución en dos planos perpendiculares orientados sobre el Eje X e Y, en coordenadas esféricas nos referiremos  $\theta_x$  y  $\theta_y$ .

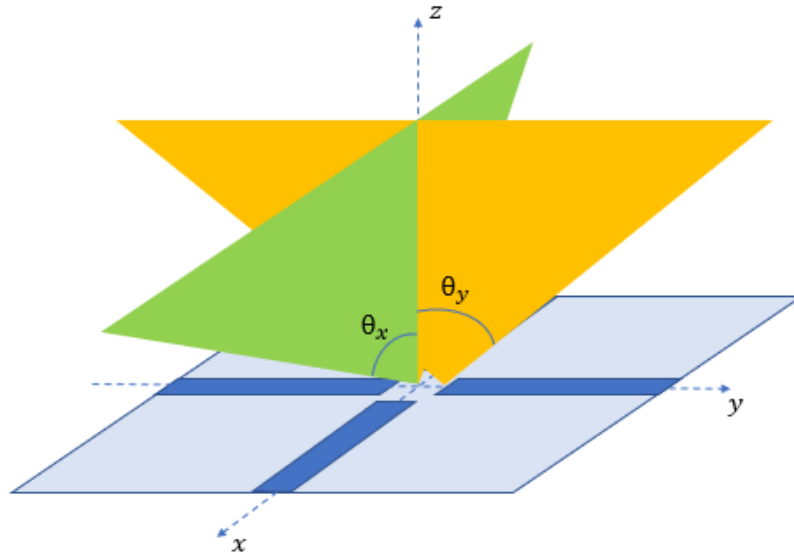


Figura 3.13: Campos de escaneo  $\theta_x$  y  $\theta_y$

De esta manera y con campo de visión (Field of View, FoV) de  $120^\circ$  para cada eje, abarcamos un área variable para cada distancia Fig 3.14. Si tomamos un intervalo de alturas de 12m hasta 50cm, tendremos un área de detección  $432 - 0,75m^2$  respectivamente.

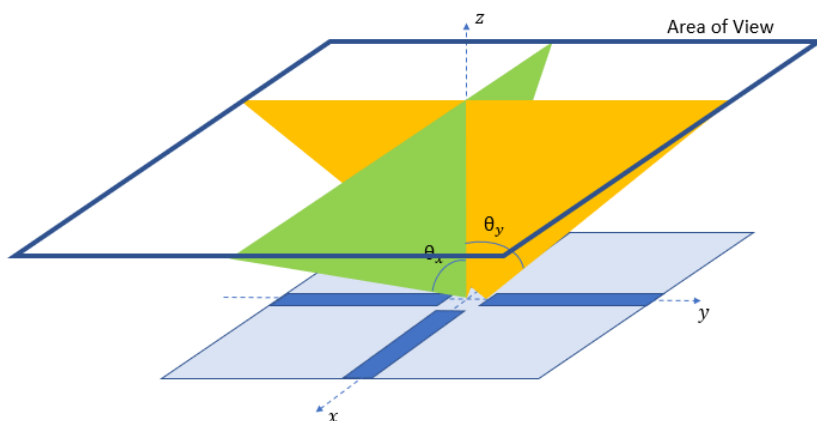


Figura 3.14: Área de visión



### 3.2.1. Estudio de los diagramas de radiación en campo lejano, región de Fresnel y campo cercano.

Es bien conocido de la teoría de antenas, que la zona que rodea a una antena se puede dividir en tres regiones principales:

1. Región Rayleigh o Campo Cercano Reactivo.
2. Región Fresnel o Campo Cercano Radiactivo, los campos cercanos radiactivos son dominantes dependientes de la distancia radial.
3. Región Fraunhofer o Campo Lejano, el patrón de radiación tiene una forma angular estable que no depende de la distancia radial.

Estas tres zonas están delimitadas por las siguientes expresiones:

$$d_{NearField} = 0,62\sqrt{\left(\frac{S^3}{\lambda}\right)} \quad (3.3)$$

$$d_{FarField} = 2\frac{S^2}{\lambda} \quad (3.4)$$

donde  $S$  es la dimensión máxima de la antena total, y  $\lambda$  longitud de onda. En nuestro caso, para una sola antena donde  $S = 40cm$  y  $\lambda = 12,49cm$  para  $f_1(2.402 GHz)$  obtenemos el límite de campo lejano a  $d_{FarField} = 2,8248m$  y el de campo cercano a  $d_{NearField} = 0,4775m$ , pero como el sistema total esta compuesto por varias antenas, debemos calcular los límites de las regiones para dichas dimensiones, donde  $S = 84cm$  y  $\lambda = 12,49cm$  para  $f_1(2.402 GHz)$  obtenemos el límite de campo lejano a  $d_{FarField} = 11,29m$  y el de campo cercano a  $d_{NearField} = 1,35m$ .

El diagramas de radiación en campo lejano para el eje Y se representa en la figura 3.15 .

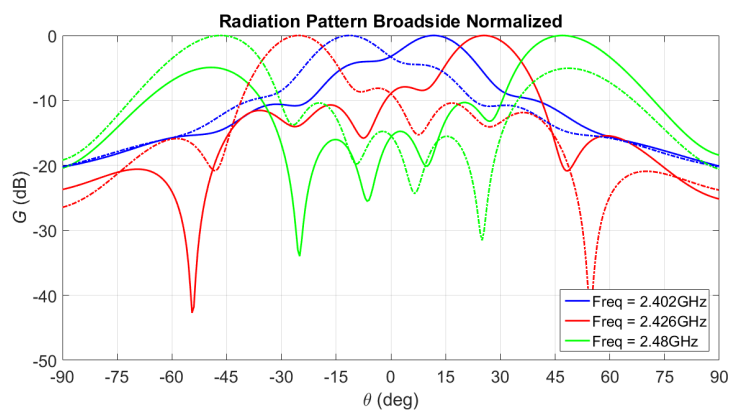


Figura 3.15: Patrón de Radiación FarField.

Ahora tenemos 6 haces, formados por los puertos 1 y 2 de la antena en el Eje Y. Para el Eje X tendremos exactamente lo mismo, sin apenas variación, ya que las antenas son iguales, pero los haces los formarán los puertos 3 y 4.

Debido al escaneo en frecuencia tendremos distintos ángulos de apuntamiento, para los 6 haces tenemos:

	$\theta_{RAD}^{P1}(deg)$	$G_{P1}(dB)$	$\theta_{RAD}^{P2}(deg)$	$G_{P2}(dB)$
$f_1$	$12^\circ$	4.5	$-12^\circ$	4.5
$f_2$	$25^\circ$	8.595	$-25^\circ$	8.595
$f_3$	$47.5^\circ$	6.94	$-47.5^\circ$	6.94

Tabla 3.4: Ángulo de radiación y valor de ganancia para cada frecuencia.

Al ser las antenas iguales y estar enfrentadas respecto del Eje Z, obtenemos una réplica a cada lado del Eje Z apuntando hacia ángulos positivos los formados por el puerto 1, y hacia ángulos negativos los del puerto 2.

En cuanto al FoV total de la antena, retomando el FoV de la antena individual de  $60^\circ$ , ahora conseguimos un FoV de  $120^\circ$   $[-60^\circ, +60^\circ]$  para cada eje, como se puede ver en la siguiente figura.

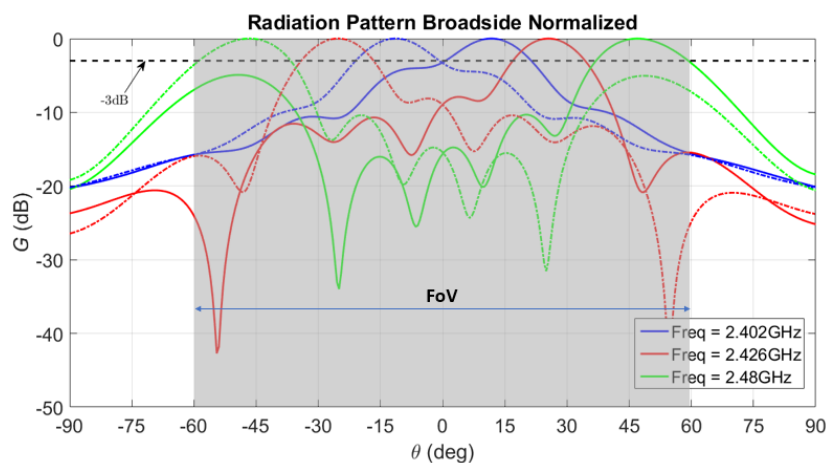


Figura 3.16: FoV en FarField.

Para este proyecto es interesante estudiar como varían los diagramas de radiación según la altura a la que nos encontremos.

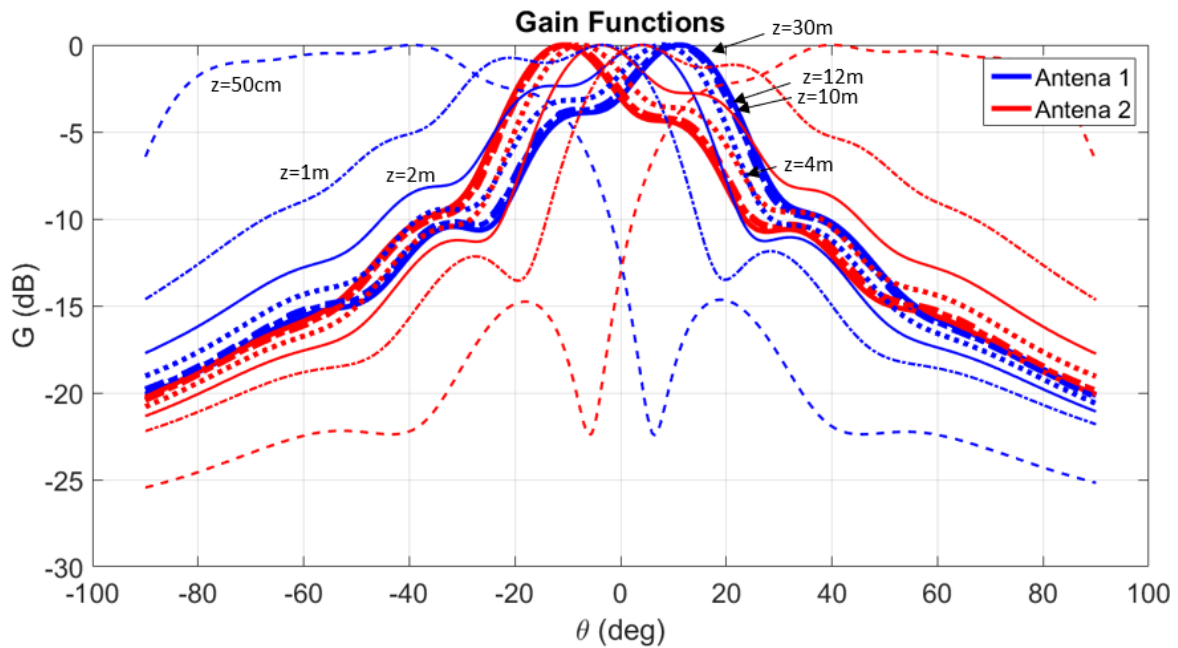


Figura 3.17: Patrón de Radiación en función de la distancia para el canal 37

Los campos radiados por la antena 1 se trazan con contornos azules en la Fig. 3.17, mientras que los campos de la antena 2 están trazados con contornos rojos, la gráfica representa el patrón de radiación del canal 37. Cabe destacar que para las distancias 30m, 12m y 10m los patrones son casi idénticos, y conforme disminuimos la distancia se aprecia un comienzo de la distorsión de las curvas de ganancia, en concreto donde la altura es inferior al límite de campo cercano (1.35m) que son el caso de 1m y 0.5m. Este efecto nos afectará al cálculo de las funciones monopulso que se verán mas adelante, y por tanto nos dificultara la obtención de la posición del objetivo.

### 3.2.2. Procesado de señal del sistema monopulso.

A partir de los límites Far Field y Near Field calculados, se va a mostrar cada función monopulso resultado de la combinación de cada par de haces de ganancia de canales contiguos a diferentes distancias, con el fin de ver el efecto de la aproximación a la antena y de los Near Fields. Las distancias para las que se ha hecho el estudio son: 30m, 12m, 10m, 4m, 2m, 1m y 50cm. Estas distancias han sido elegidas para ver como se comporta en FarField a los 30m y 12m, el efecto de los NearField desde 12m-2m, además de ver que sucede para distancias mas próximas (1m-0.5m) a la antena donde ya estamos dentro de la región reactiva.

Distancia 30 metros.

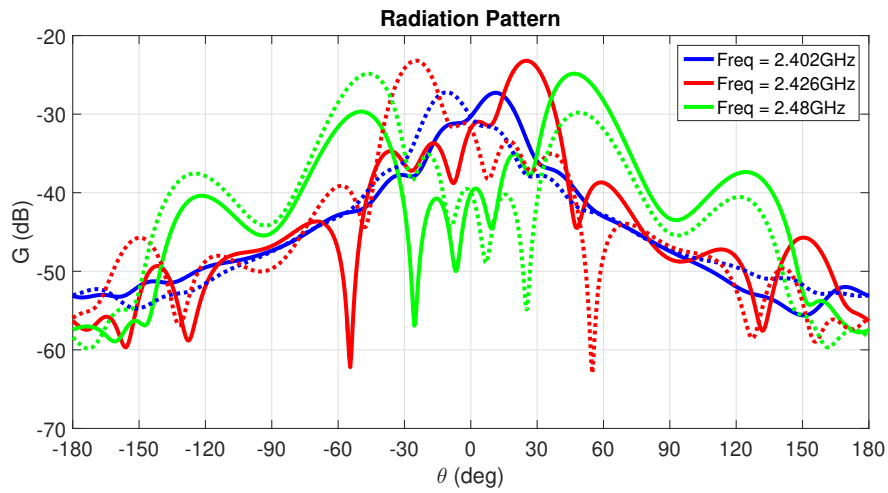


Figura 3.18: Patrón de Radiación para una altura de 30m.

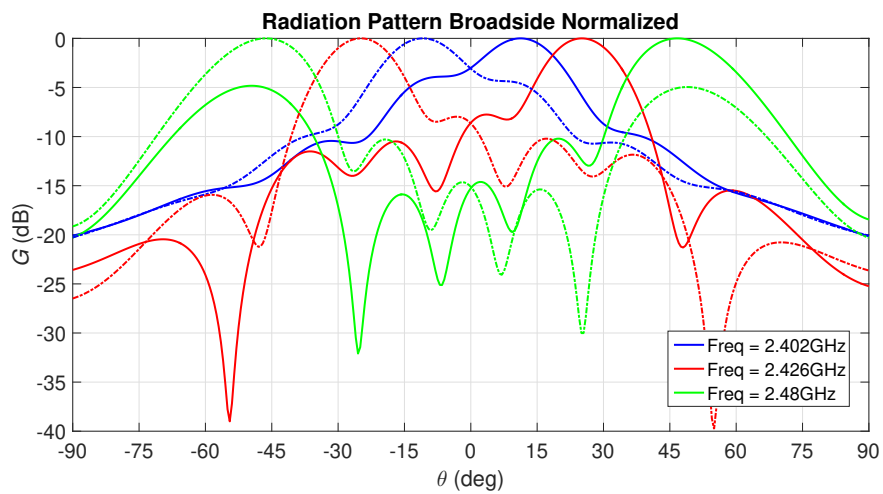


Figura 3.19: Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 30m.

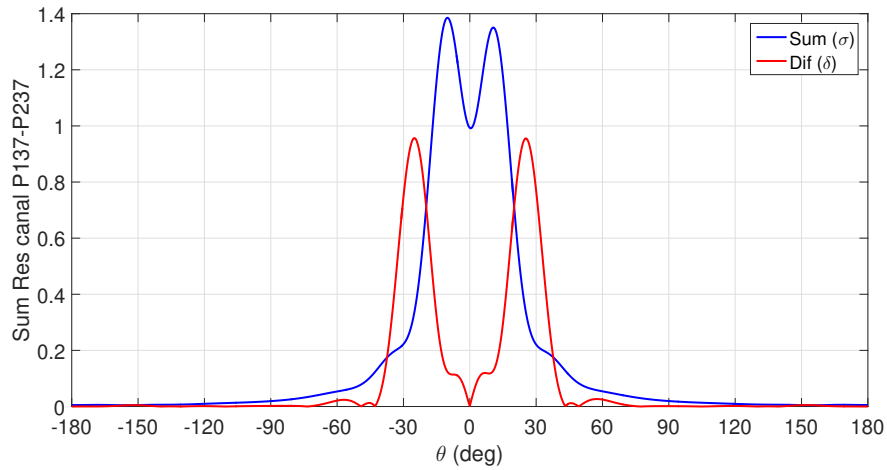


Figura 3.20: Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 z30m.

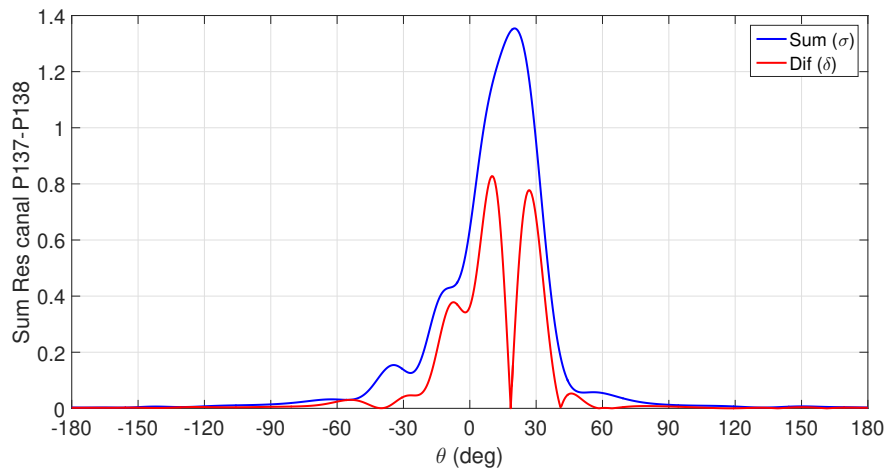


Figura 3.21: Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 z30m.

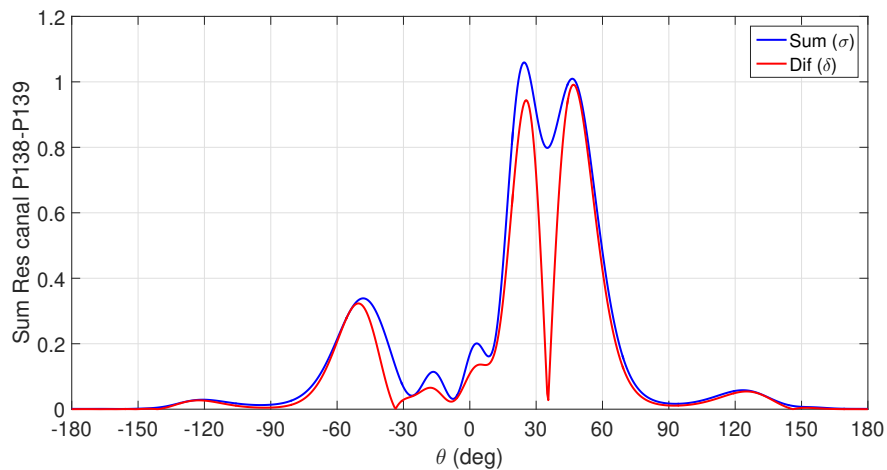


Figura 3.22: Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 z30m.

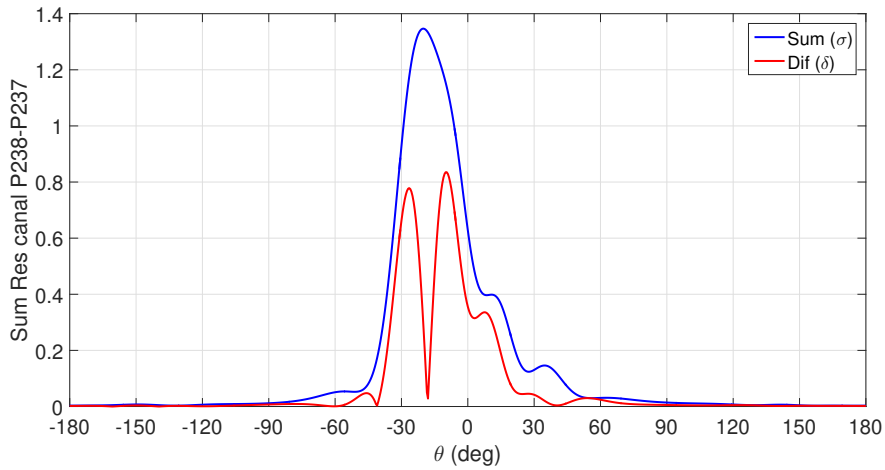


Figura 3.23: Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 z30m.

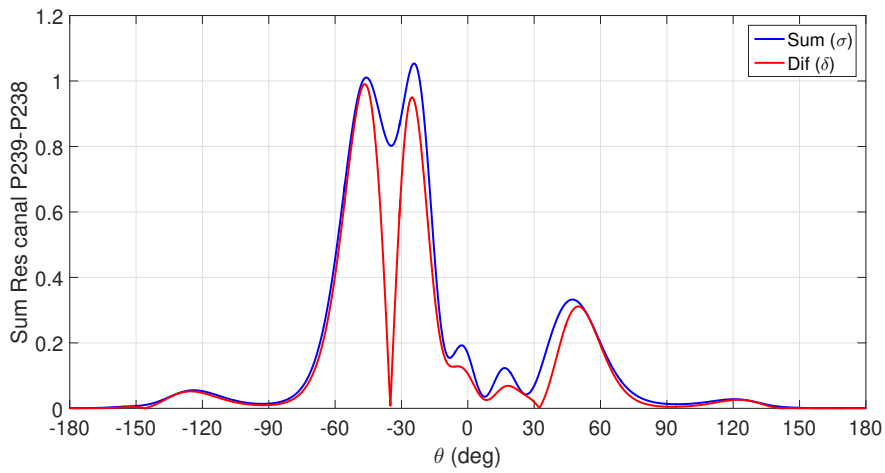


Figura 3.24: Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 z30m.

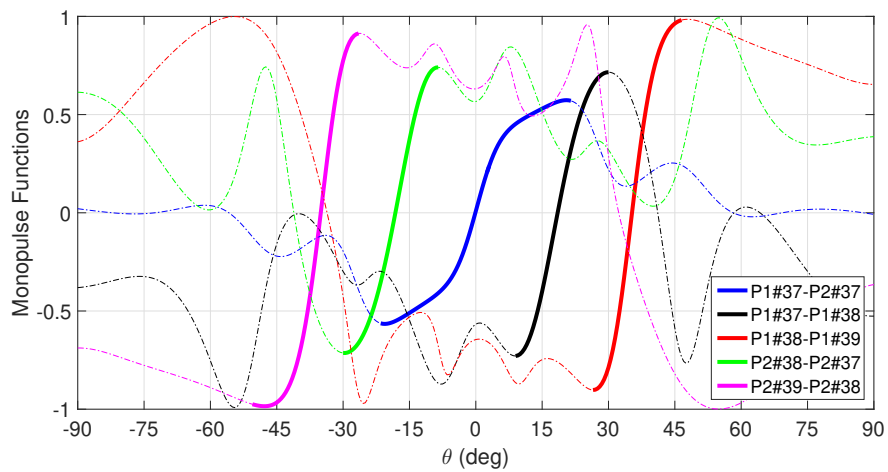


Figura 3.25: Funciones Monopulso z30m.

A continuación se presentan en esta tabla, el FoV en grados para cada monopolso ( $m = 1, \dots, 5$ ) definiendo también la combinación de frecuencias y puertos para los que se ha calculado cada función monopolso.

Funcion Monopulso	Puerto y Canales	FoV (deg)
$m = 1$	$P1\#37 - P1\#37$	$[-9,+9]$
$m = 2$	$P1\#37 - P1\#38$	$[+9.5,+30]$
$m = 3$	$P1\#38 - P1\#39$	$[+26.5,+47]$
$m = 4$	$P2\#38 - P2\#37$	$[-31,-8.5]$
$m = 5$	$P2\#39 - P1\#38$	$[-47,-26]$

Tabla 3.5: FoV Funciones Monopulso  $z=30m$

Como podemos ver, para una altura de 30m conseguimos un FoV total de  $94^\circ$  ( $+47^\circ, -47^\circ$ ).

**Distancia 12 metros.**

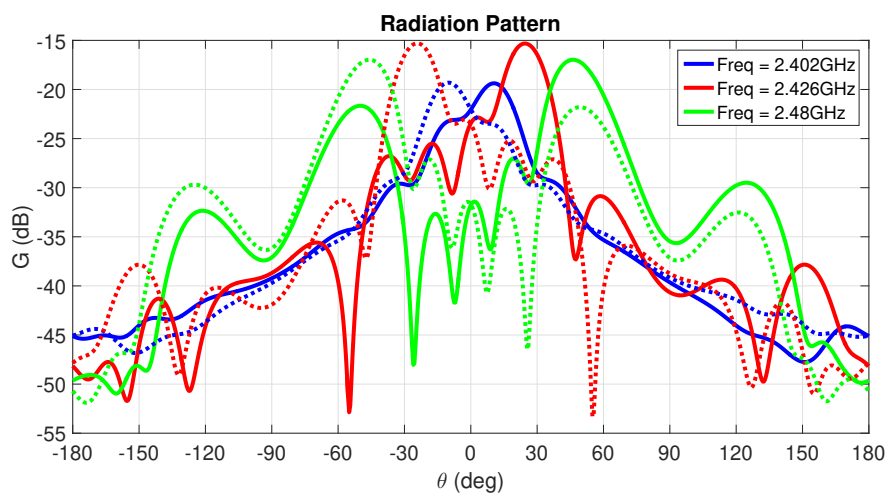


Figura 3.26: Patrón de Radiación para una altura de 12m.

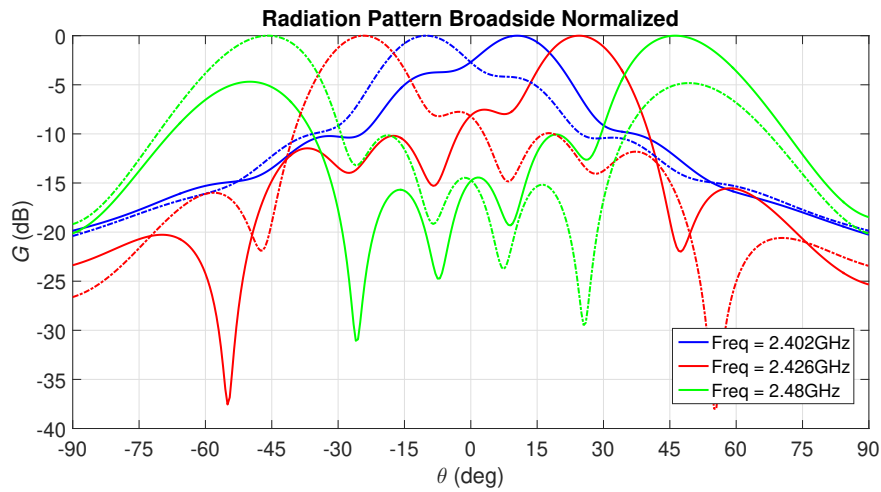


Figura 3.27: Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 12m.

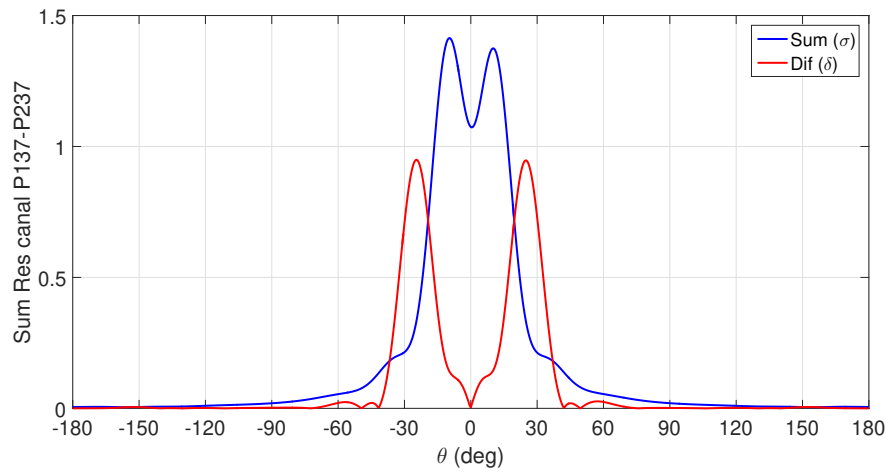


Figura 3.28: Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 z12m.

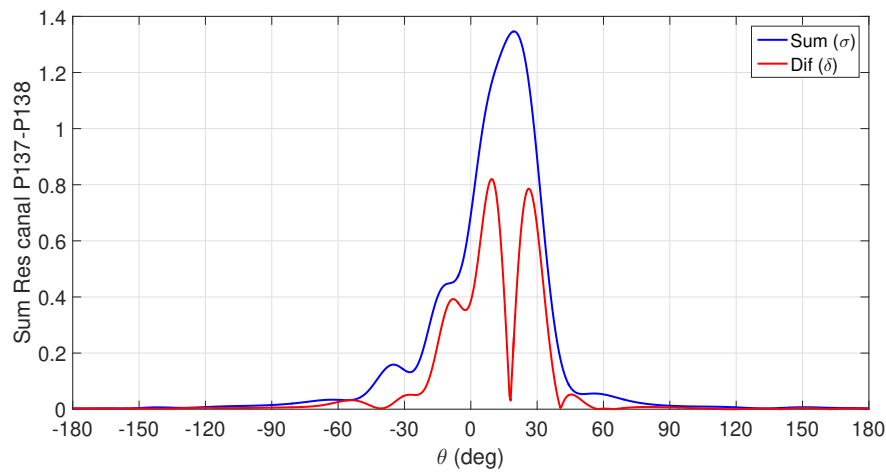


Figura 3.29: Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 z12m.



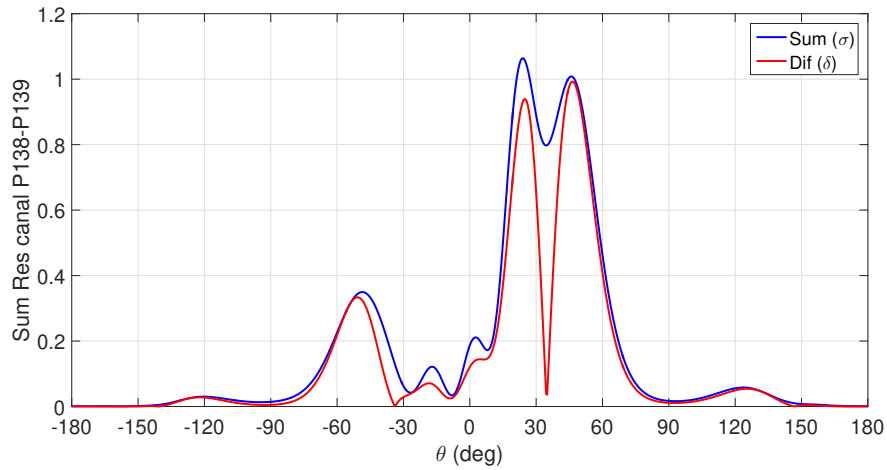


Figura 3.30: Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 z12m.

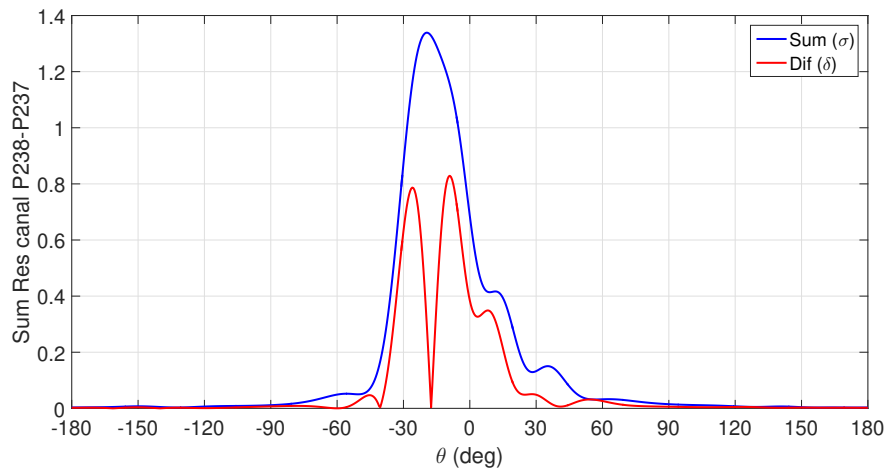


Figura 3.31: Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 z12m.

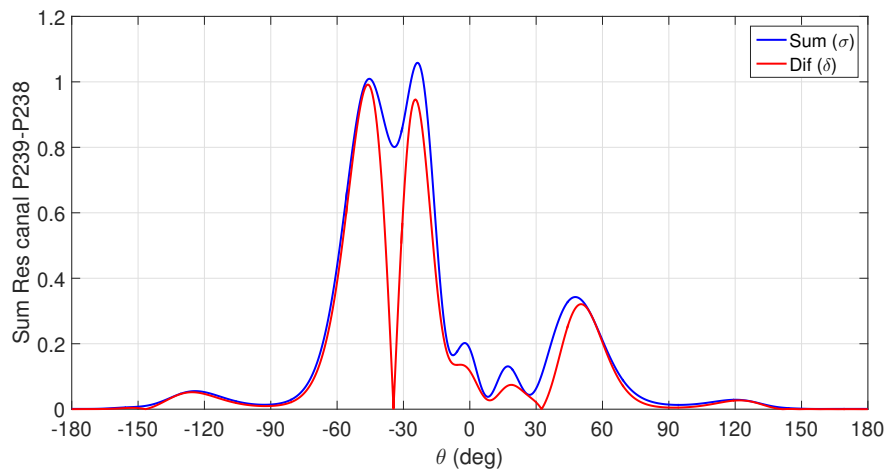


Figura 3.32: Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 z12m.

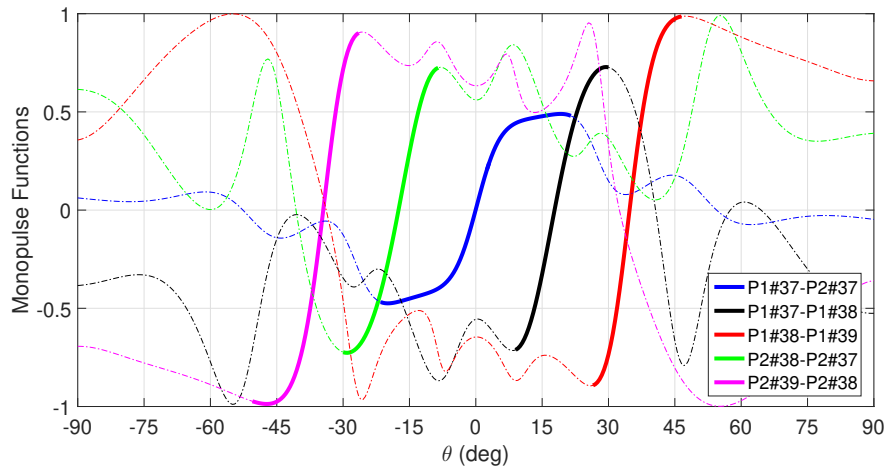


Figura 3.33: Funciones Monopulso z12m.

Funcion Monopulso	Puerto y Canales	FoV (deg)
$m = 1$	$P1\#37 - P1\#37$	$[-9,+9]$
$m = 2$	$P1\#37 - P1\#38$	$[+9.5,+30]$
$m = 3$	$P1\#38 - P1\#39$	$[+26.5,+47]$
$m = 4$	$P2\#38 - P2\#37$	$[-28.5,-7.5]$
$m = 5$	$P2\#39 - P1\#38$	$[-47,-26]$

Tabla 3.6: FoV Funciones Monopulso z=12m

Para esta distancia, no se nota una variación reseñable respecto a la anterior, debido a que seguimos en campo lejano y aquí los haces ya son constantes. Por tanto, para 30m y 12m tendremos resultados casi idénticos.

### Distancia 10 metros.

En una distancia igual a 10 metros, nos encontramos en campo cercano, se va a apreciar una pequeña variación de los haces en el diagrama de radiación desplazándose entre  $1^\circ$ - $2^\circ$  el ángulo de máxima radiación hacia broadside.

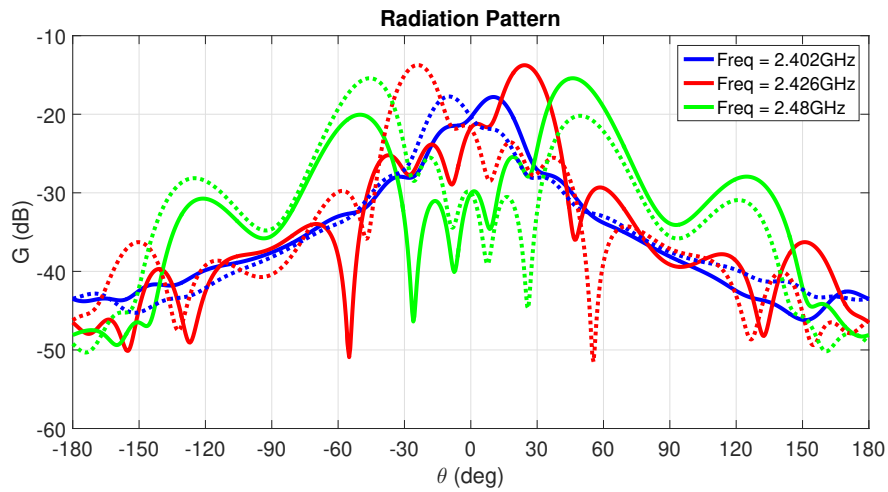


Figura 3.34: Patrón de Radiación para una altura de 10m.

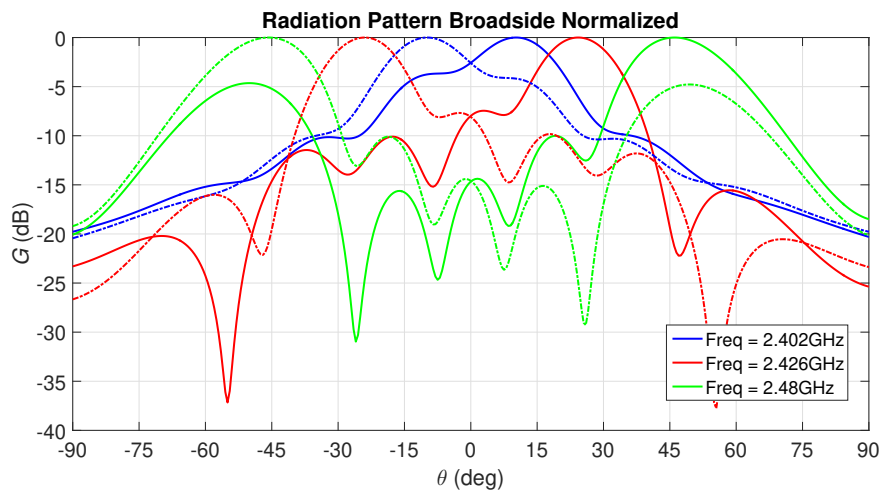


Figura 3.35: Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 10m.

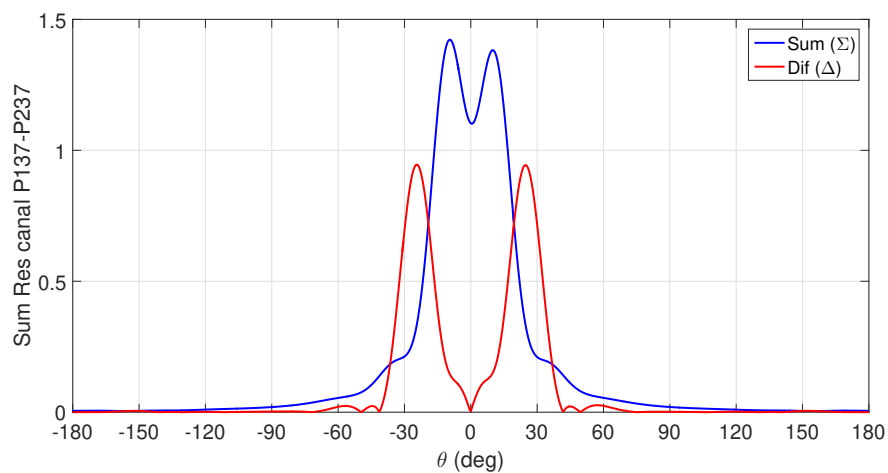


Figura 3.36: Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 a una altura de 10m.

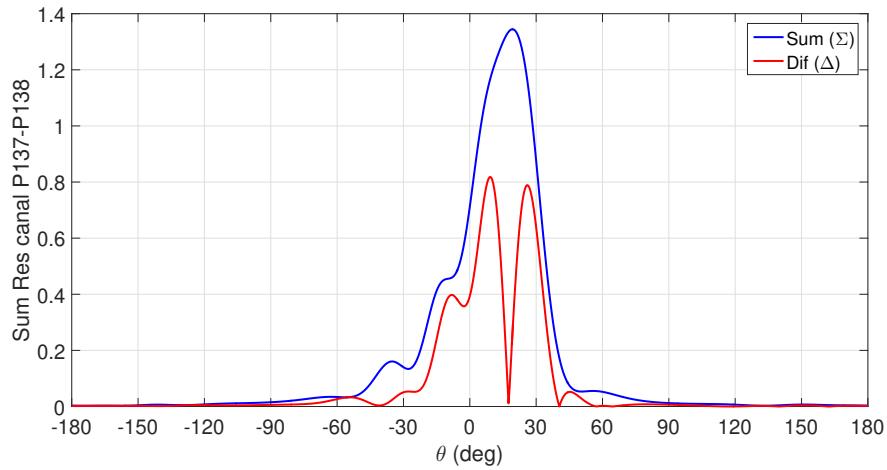


Figura 3.37: Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 a una altura de 10m.

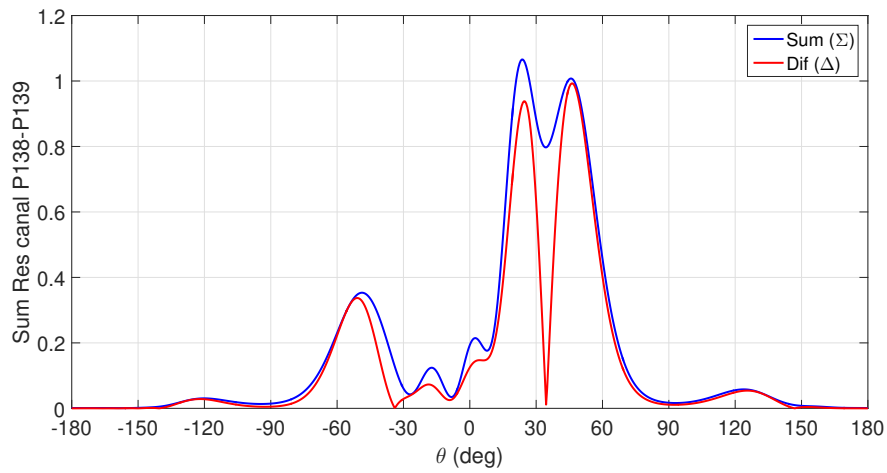


Figura 3.38: Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 a una altura de 10m.

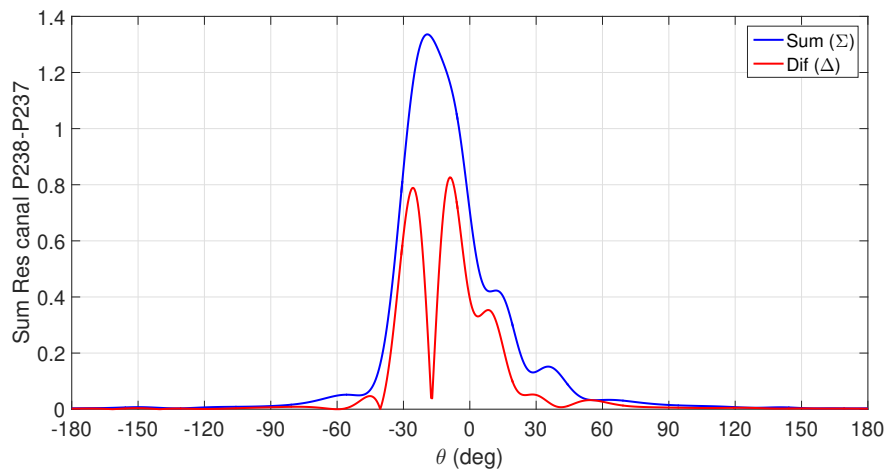


Figura 3.39: Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 a una altura de 10m.

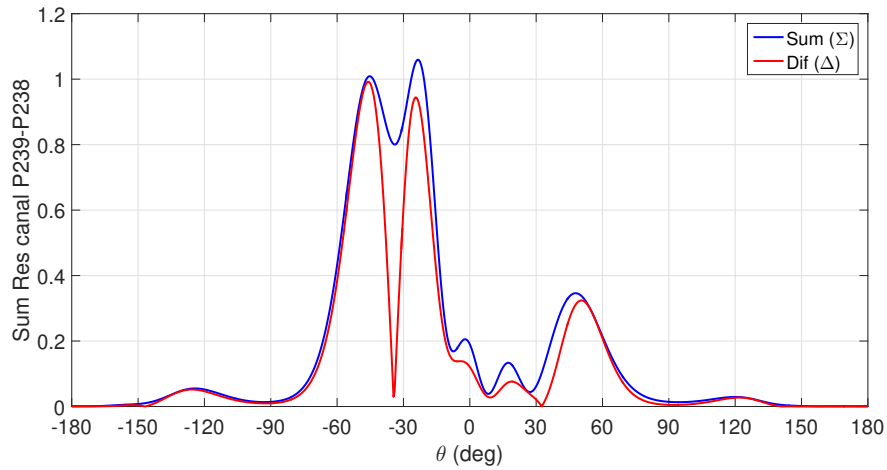


Figura 3.40: Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 a una altura de 10m.

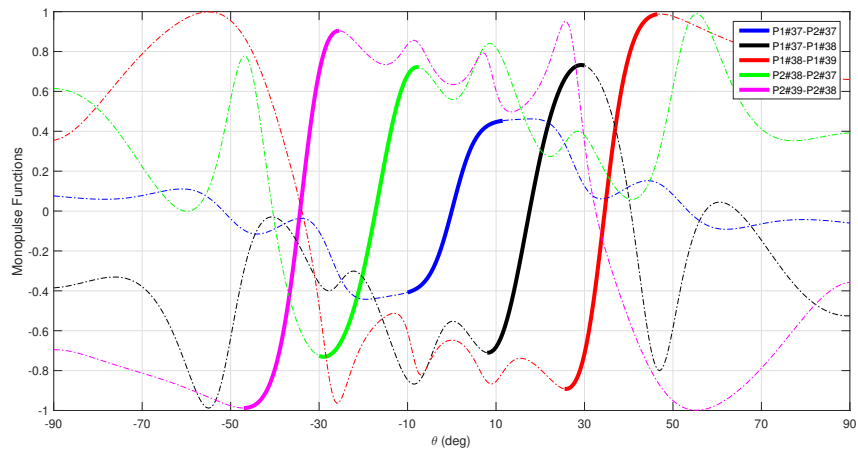


Figura 3.41: Funciones Monopulso a una altura de 10m.

Funcion Monopulso	Puerto y Canales	FoV (deg)
$m = 1$	$P1\#37 - P1\#37$	$[-6.5,+6.5]$
$m = 2$	$P1\#37 - P1\#38$	$[+9,+29.5]$
$m = 3$	$P1\#38 - P1\#39$	$[+26,+47.5]$
$m = 4$	$P2\#38 - P2\#37$	$[-28.5,-8]$
$m = 5$	$P2\#39 - P1\#38$	$[-45.5,-25]$

Tabla 3.7: FoV Funciones Monopulso a una altura de 10m

A esta distancia se obtiene un FoV total de 92°.

Distancia 4 metros.

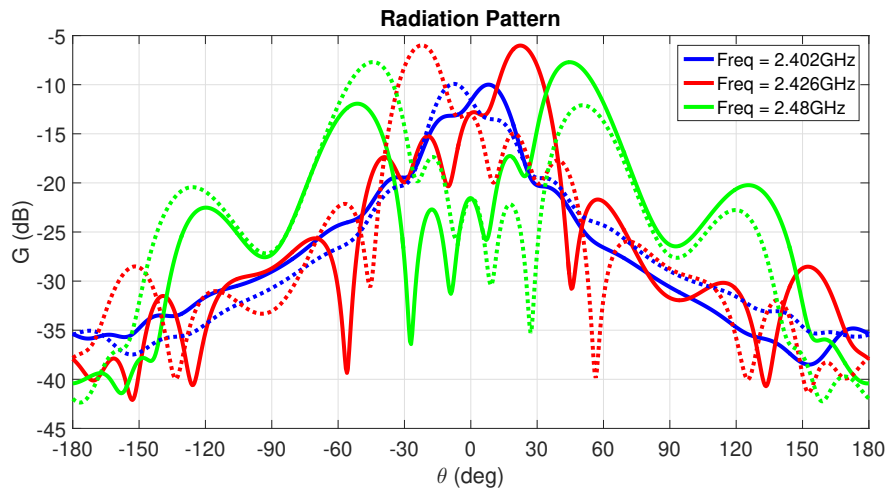


Figura 3.42: Patrón de Radiación para una altura de 4m.

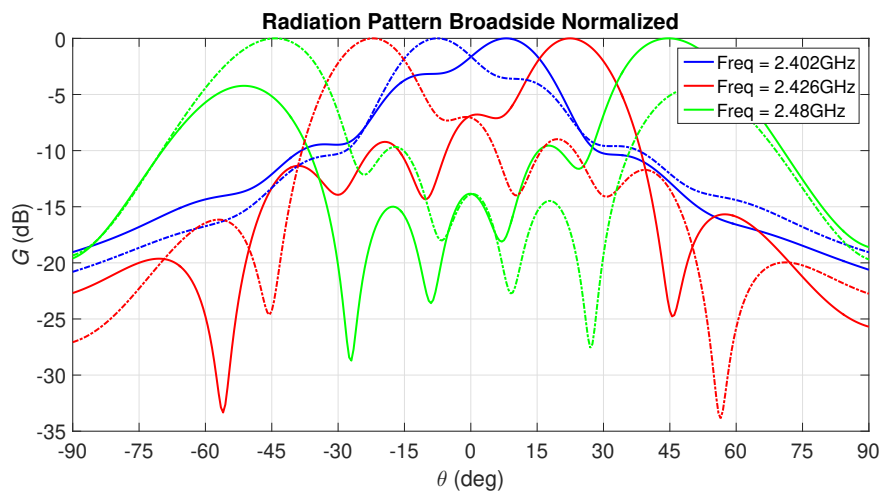


Figura 3.43: Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 4m.

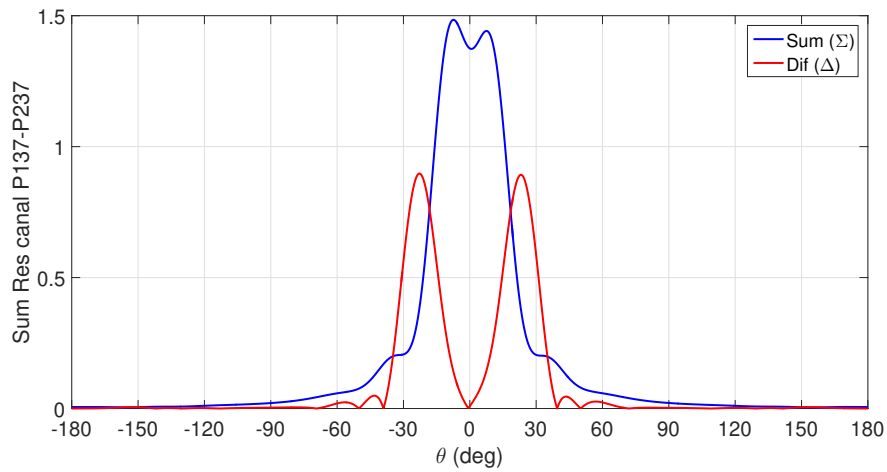


Figura 3.44: Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 a altura de 4m.

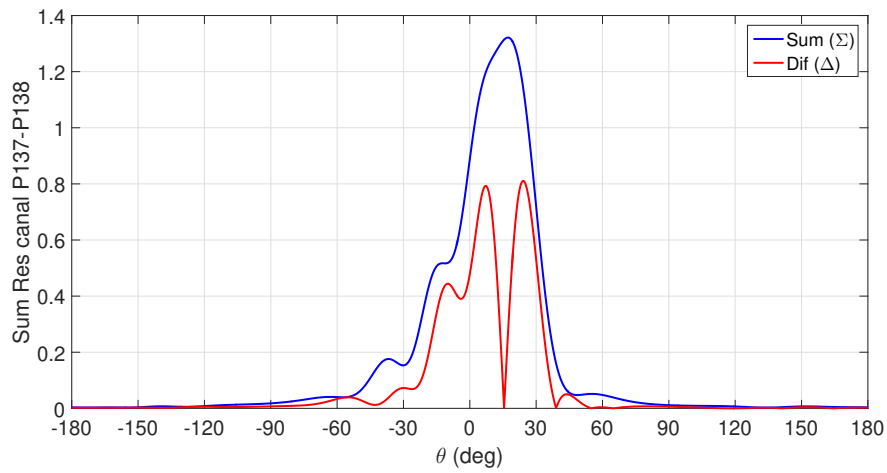


Figura 3.45: Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 a altura de 4m.

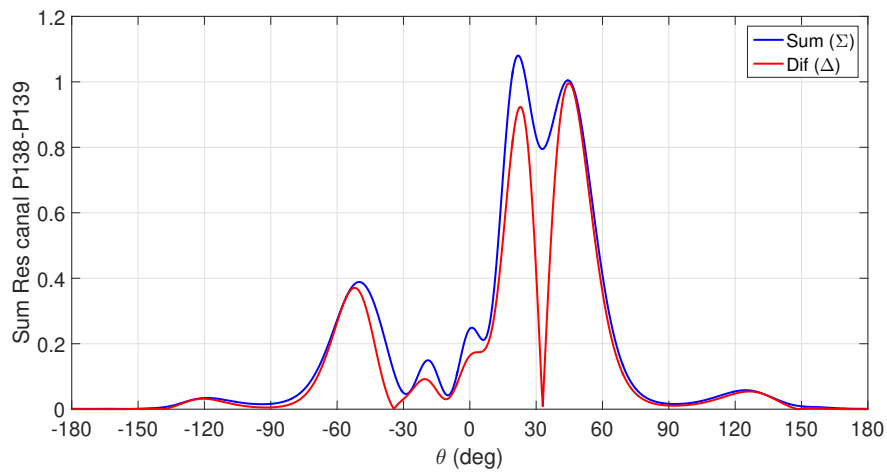


Figura 3.46: Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 a altura de 4m.

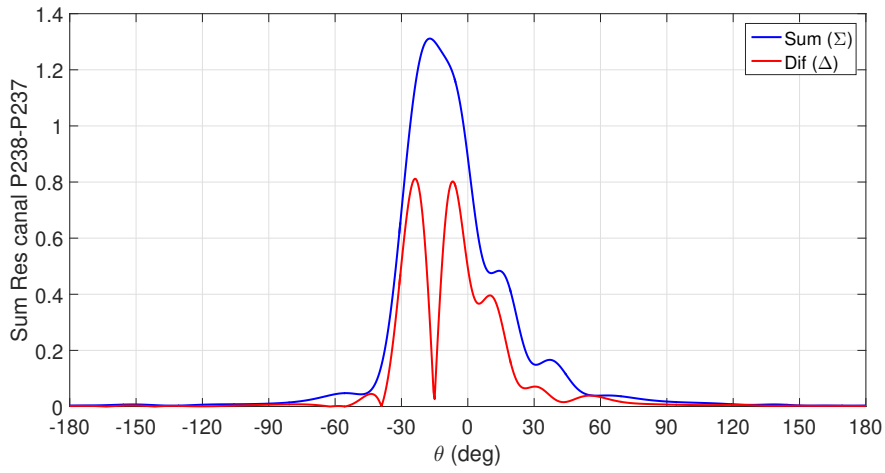


Figura 3.47: Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 a altura de 4m.

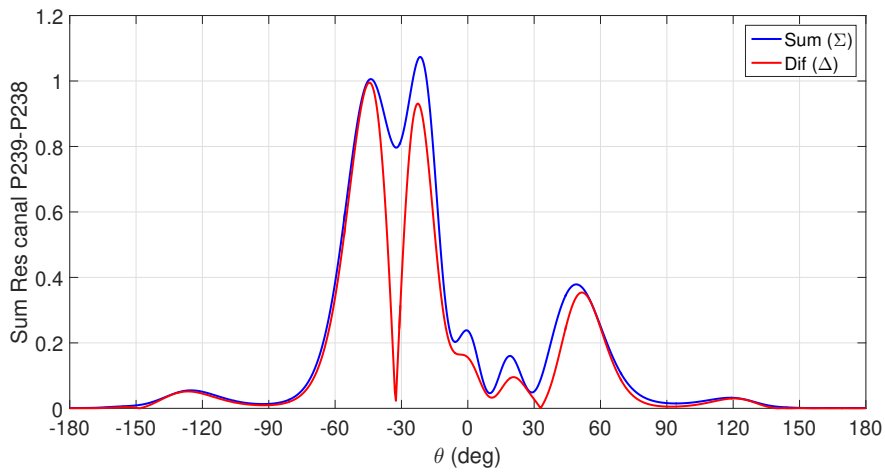


Figura 3.48: Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 a altura de 4m.

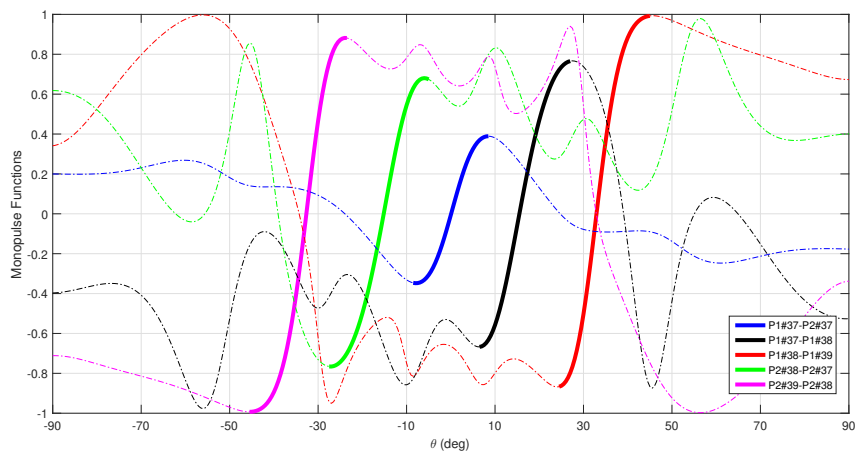


Figura 3.49: Funciones Monopulso a altura de 4m.



Funcion Monopulso	Puerto y Canales	FoV (deg)
$m = 1$	$P1\#37 - P1\#37$	$[-7.5,+7.5]$
$m = 2$	$P1\#37 - P1\#38$	$[+7,+27.5]$
$m = 3$	$P1\#38 - P1\#39$	$[+24.5,+46]$
$m = 4$	$P2\#38 - P2\#37$	$[-27,-6.5]$
$m = 5$	$P2\#39 - P1\#38$	$[-45,-23.5]$

Tabla 3.8: FoV Funciones Monopulso a una altura de 4m

En  $d=4m$ , obtenemos un FoV total de  $90^\circ$ . Además las pendientes de las funciones monopulso aumentan, esto nos provoca mucha mayor resolución angular, que es lo que necesitamos conforme nos acercamos a la antena.

### Distancia 2 metros.

A una distancia de 2 metros, estamos midiendo muy cerca del límite inferior de campo cercano. Notándose una variación reseñable en los ángulos de apuntamiento para cada frecuencia, teniendo el canal 37 casi a  $0^\circ$ .

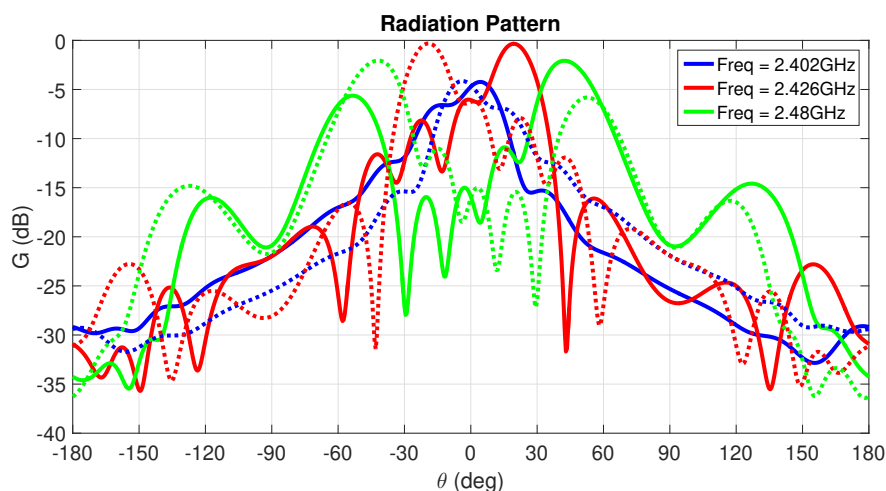


Figura 3.50: Patrón de Radiación para una altura de 2m.

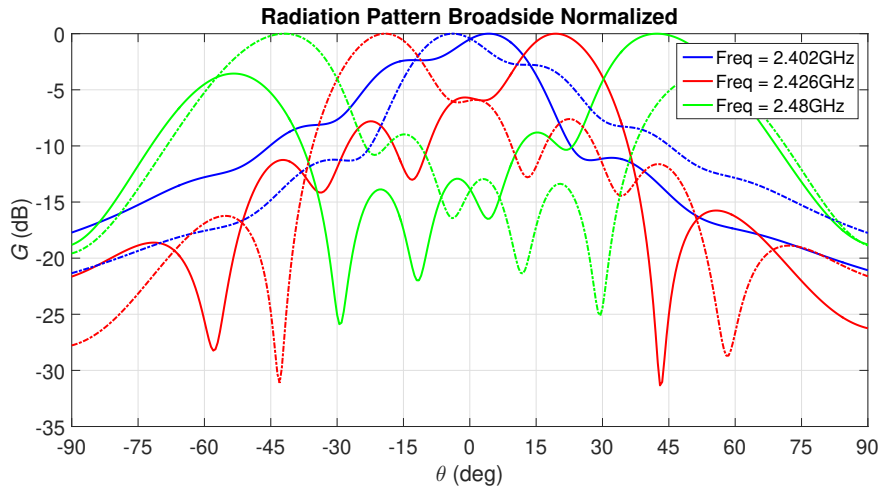


Figura 3.51: Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 2m.

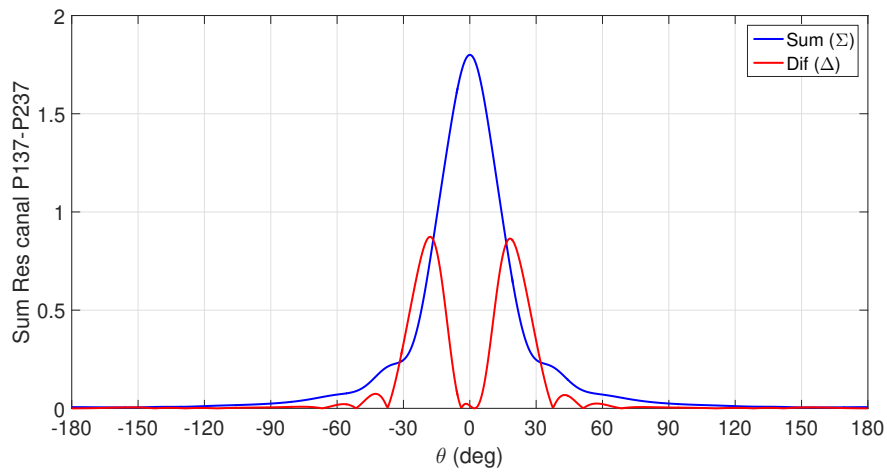


Figura 3.52: Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 para una altura de 2m.

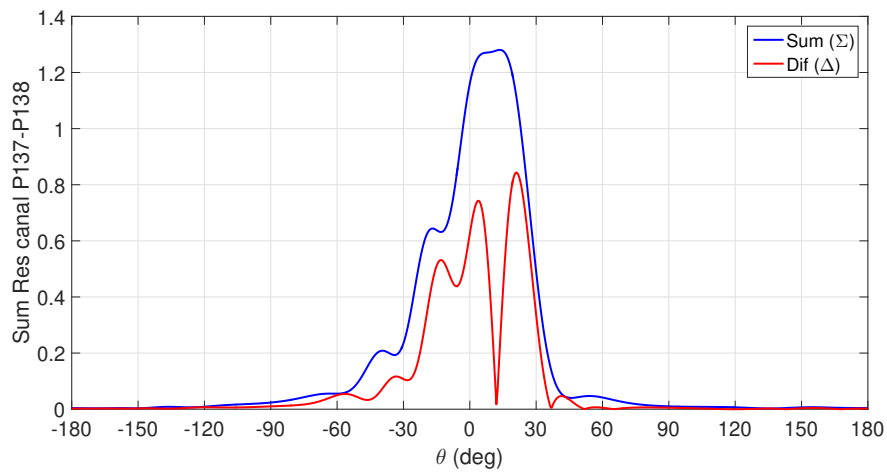


Figura 3.53: Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 para una altura de 2m.

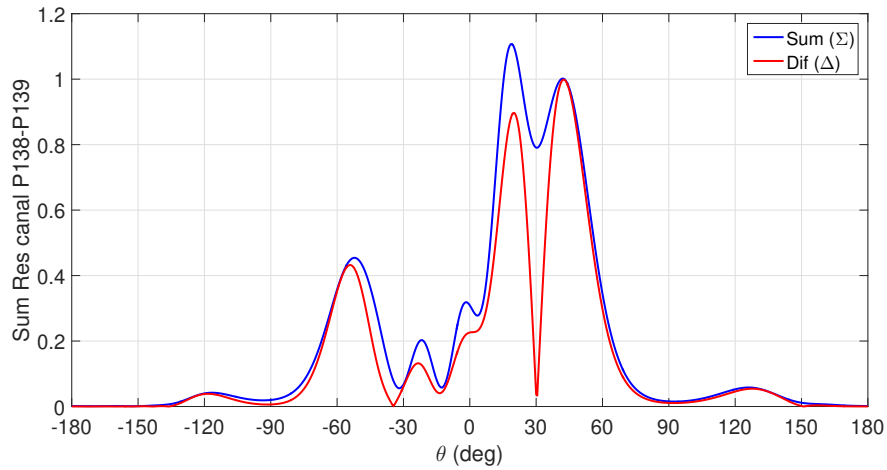


Figura 3.54: Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 para una altura de 2m.

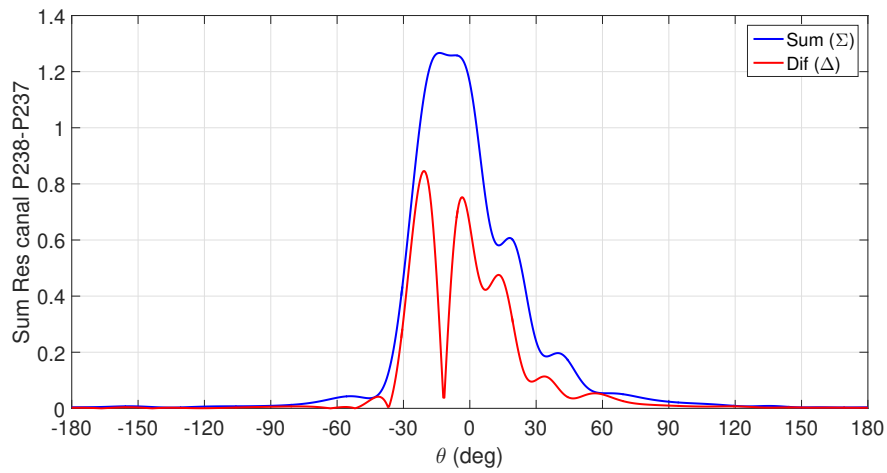


Figura 3.55: Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 para una altura de 2m.

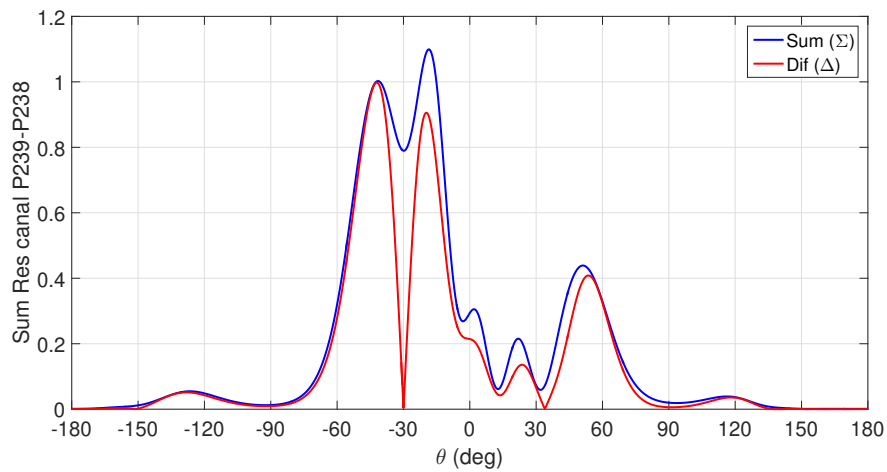


Figura 3.56: Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 para una altura de 2m.

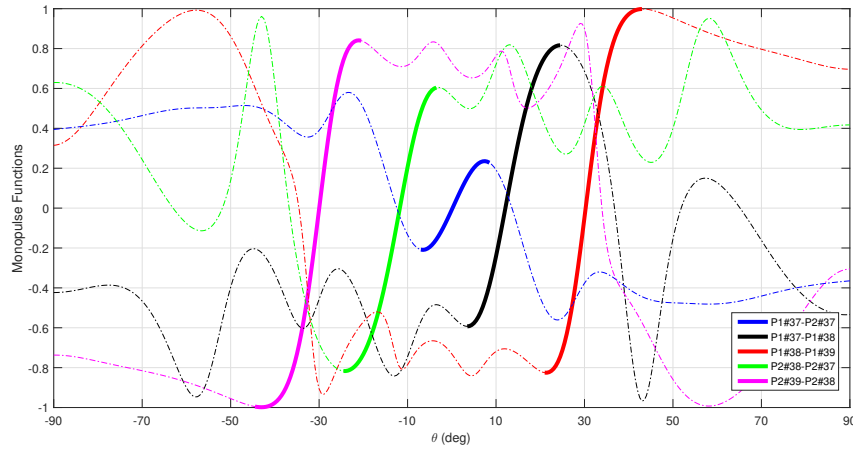


Figura 3.57: Funciones Monopulso para una altura de 2m.

Funcion Monopulso	Puerto y Canales	FoV (deg)
$m = 1$	$P1\#37 - P1\#37$	$[-7.5,+7.5]$
$m = 2$	$P1\#37 - P1\#38$	$[+2.5,+24]$
$m = 3$	$P1\#38 - P1\#39$	$[+21,+42.5]$
$m = 4$	$P2\#38 - P2\#37$	$[-24,-2.5]$
$m = 5$	$P2\#39 - P1\#38$	$[-44,-22]$

Tabla 3.9: FoV Funciones Monopulso para una altura de 2m

Para esta distancia  $d=2m$ , conseguimos un FoV total de  $88^\circ$ , disminuyéndose respecto de  $d=4m$ , consiguiendo así mejor resolución.

Distancia 1 metros.

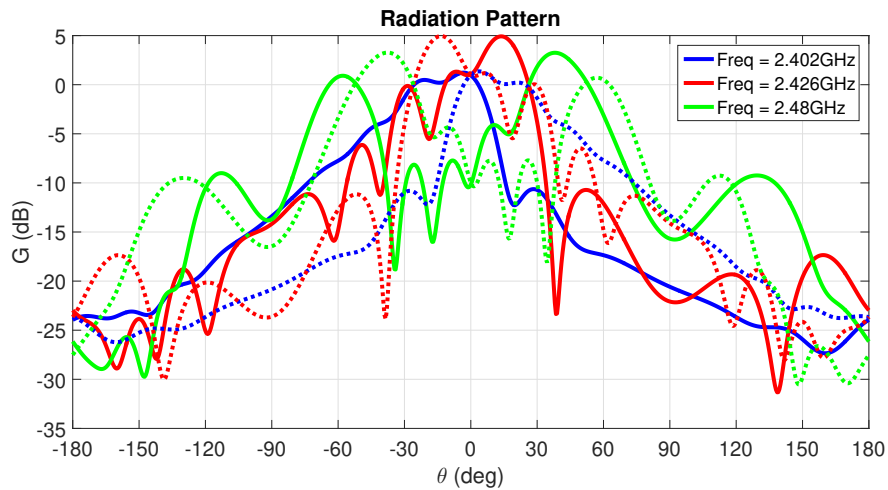


Figura 3.58: Patrón de Radiación para una altura de 1m.

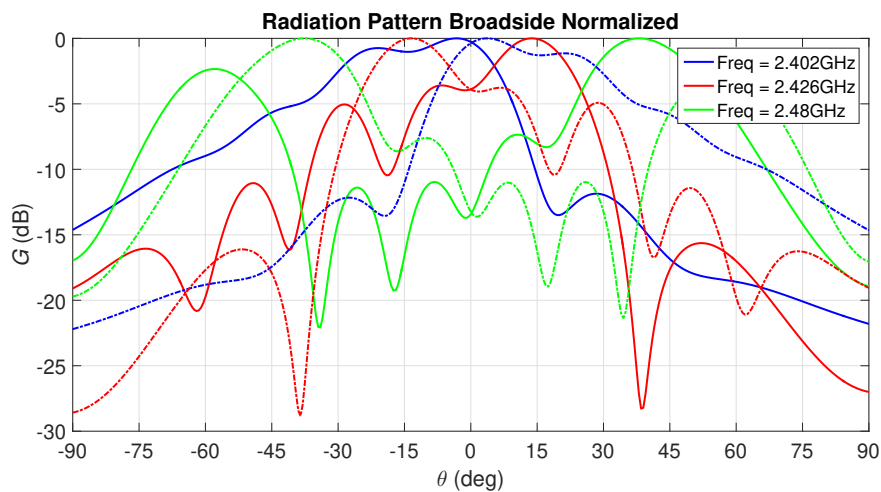


Figura 3.59: Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 1m.

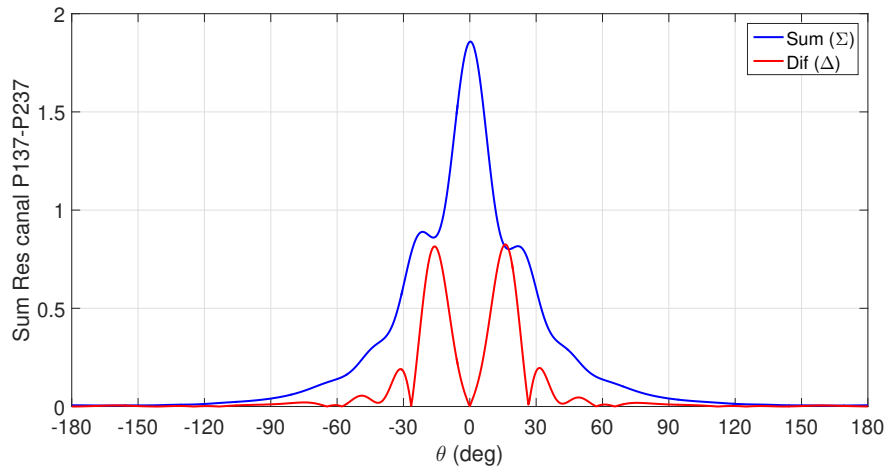


Figura 3.60: Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 a una altura de 1m.

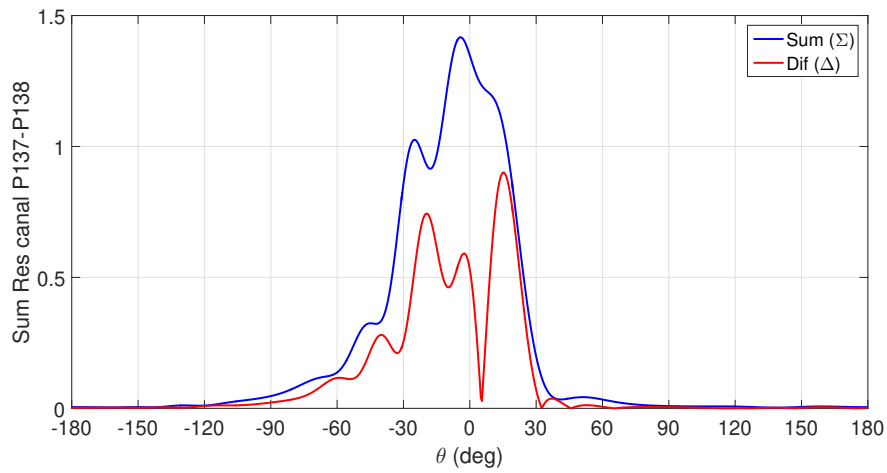


Figura 3.61: Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 a una altura de 1m.

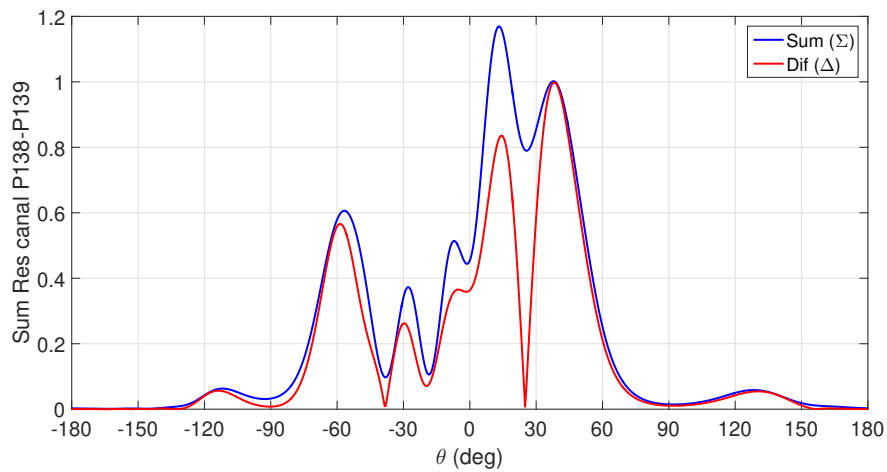


Figura 3.62: Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 a una altura de 1m.

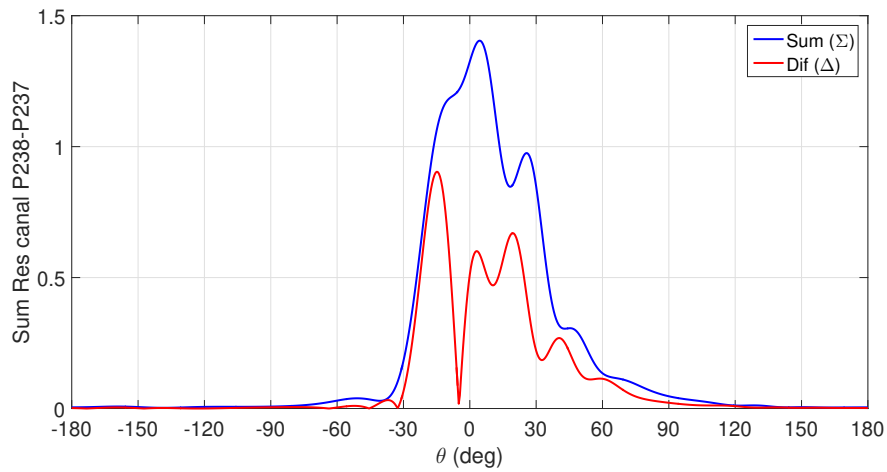


Figura 3.63: Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 a una altura de 1m.

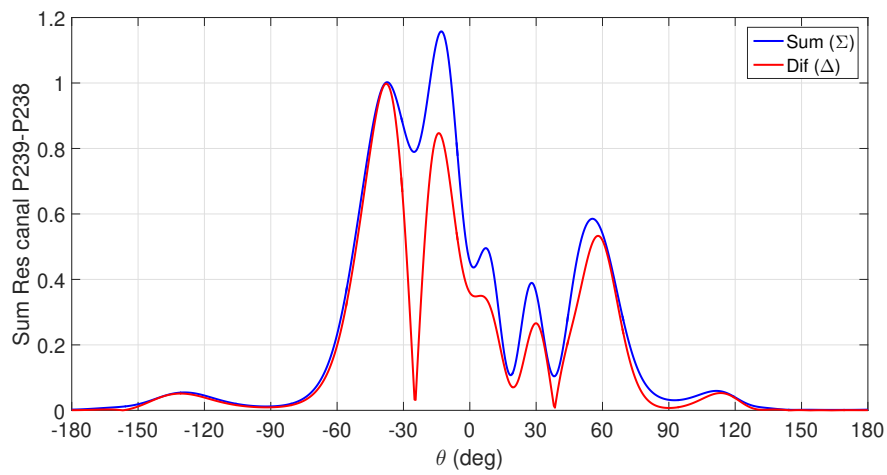


Figura 3.64: Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 a una altura de 1m.

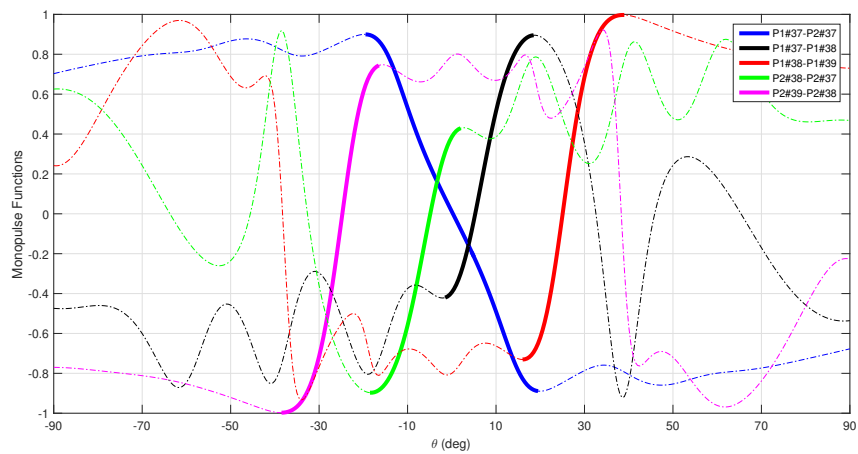


Figura 3.65: Funciones Monopulso a una altura de 1m.

Funcion Monopulso	Puerto y Canales	FoV (deg)
$m = 1$	$P1\#37 - P1\#37$	$[-19,+19]$
$m = 2$	$P1\#37 - P1\#38$	$[-0.5,+18.5]$
$m = 3$	$P1\#38 - P1\#39$	$[+16.5,+38.5]$
$m = 4$	$P2\#38 - P2\#37$	$[-17.5,+3]$
$m = 5$	$P2\#39 - P1\#38$	$[-37.5,-15.5]$

Tabla 3.10: FoV Funciones Monopulso a una altura de 1m

Para 1m, las curvas de ganancia del canal 37 se cruzan por  $0^\circ$  y empiezan a distorsionarse, Fig. 3.59. Esto nos afecta a la función monopulso  $m=1$ , Fig. 3.65, en la que aumenta su zona lineal, con un FoV de  $38^\circ$ , volviéndose una función monopulso con mayor pendiente y negativa, perdiendo mucha resolución. Una opción para intentar mejorar esto es usar los haces del canal 38 generados por puerto 1 y el puerto 2, ya que sus curvas de ganancia se cortan en  $-3.9\text{dB}$  para  $0^\circ$ .

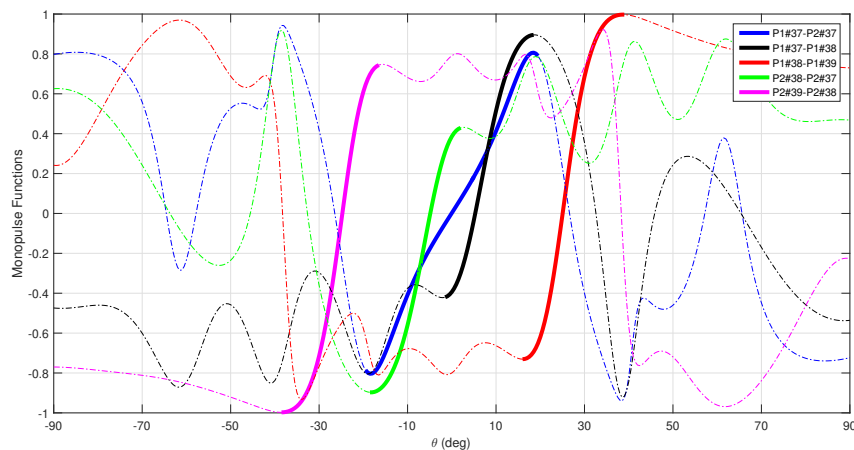


Figura 3.66: Funciones Monopulso.

Aplicando esta solución, dejamos de tener una función monopulso negativa, pero seguimos teniendo poca resolución angular, para la función monopulso central, en cambio, para las demás funciones si se consigue mayor resolución ya que siguen bien definidos los haces del canal 38 y 39, reduciendo el FoV a  $75^\circ$  aproximadamente.

### Distancia 0.5 metros.

A esta distancia, ya estamos lejos del límite de campo cercano, y se apreciarán las influencias de los campos reactivos en la distorsión del patrón de radiación.



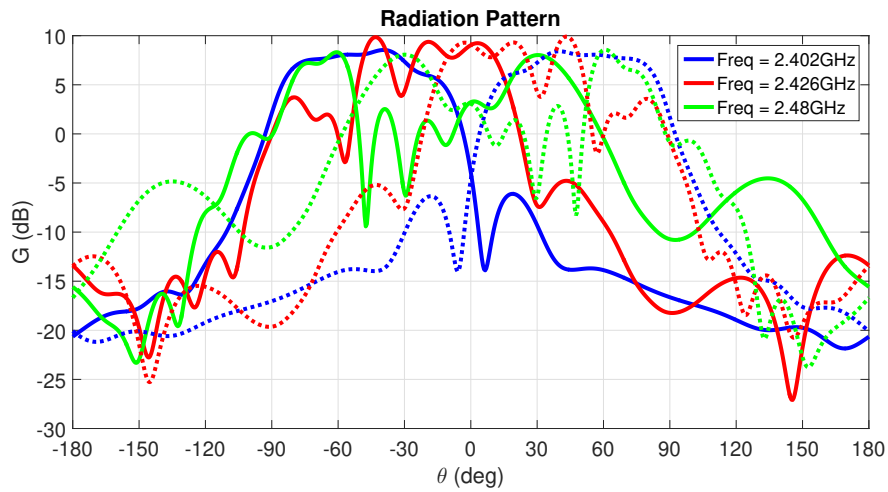


Figura 3.67: Patrón de Radiación para una altura de 50 cm.

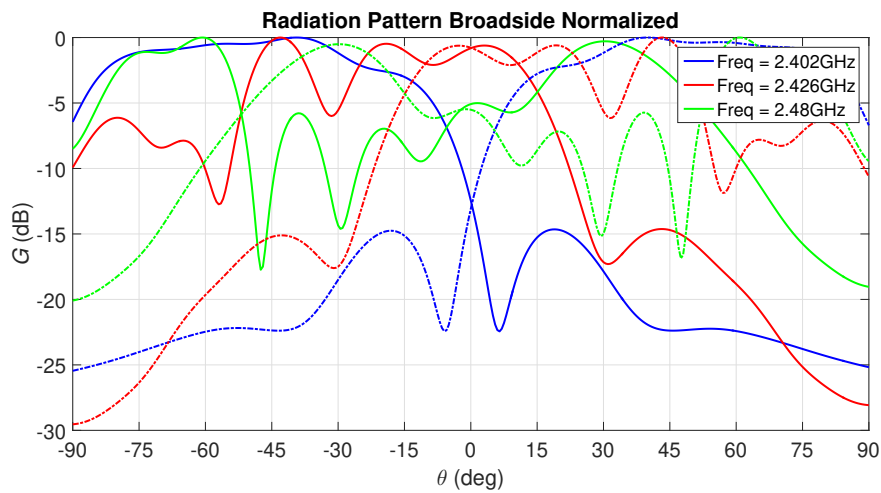


Figura 3.68: Patrón de Radiación normalizado broadside para una altura de 50 cm.

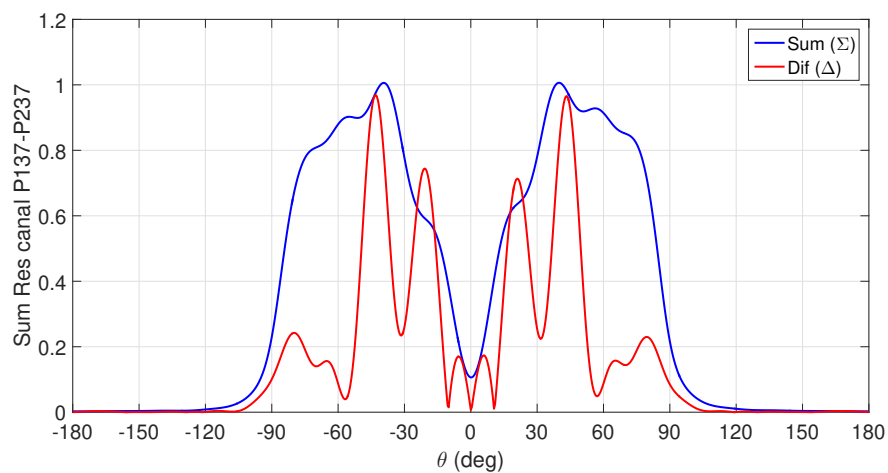


Figura 3.69: Diagrama Suma-Diferencia P137-P237 a una altura de 50 cm.

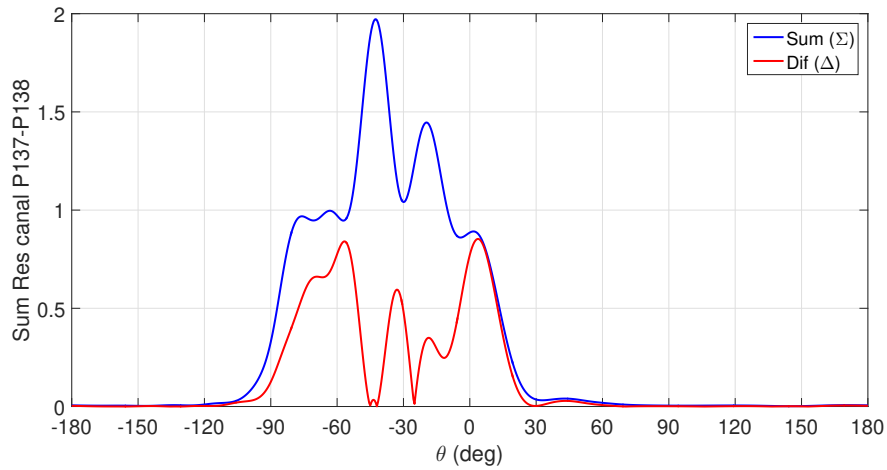


Figura 3.70: Diagrama Suma-Diferencia P137-P138 a una altura de 50 cm.

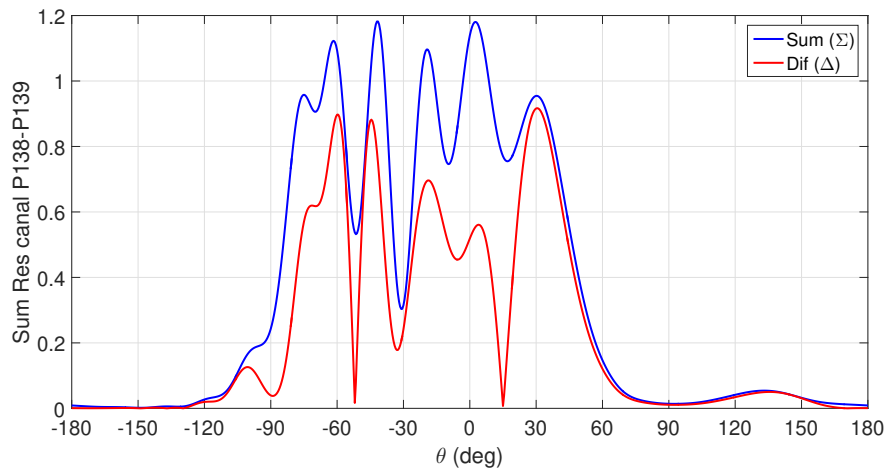


Figura 3.71: Diagrama Suma-Diferencia P138-P139 a una altura de 50 cm.

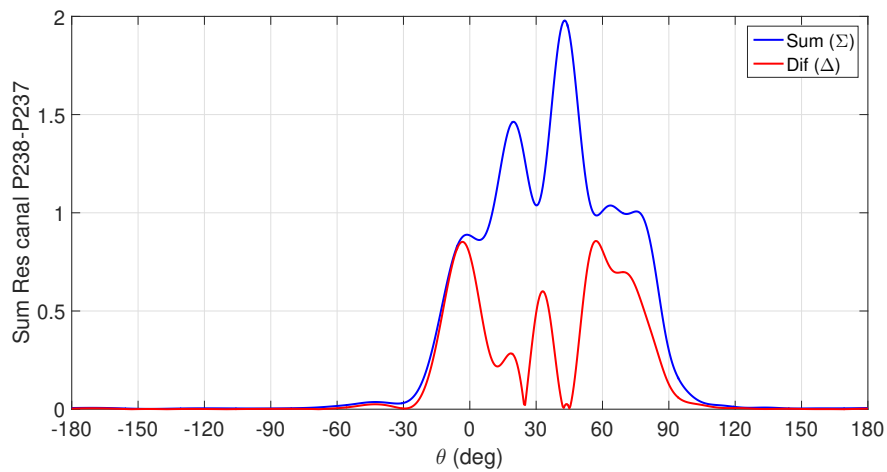


Figura 3.72: Diagrama Suma-Diferencia P238-P237 a una altura de 50 cm.

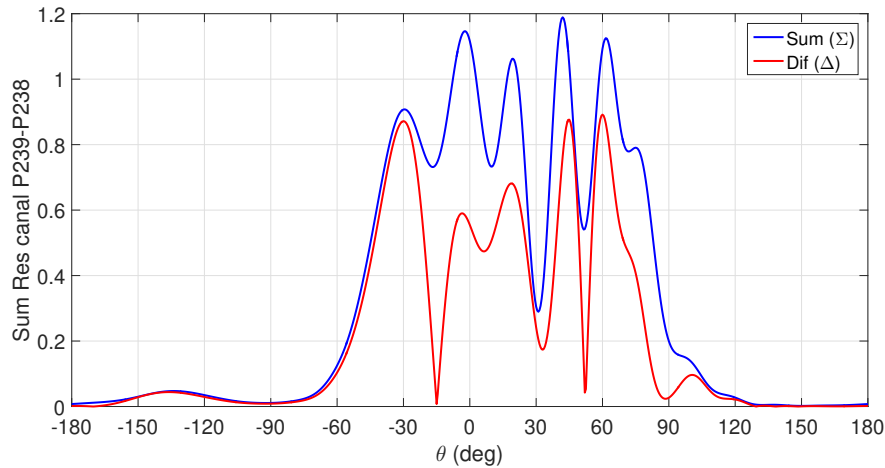


Figura 3.73: Diagrama Suma-Diferencia P239-P238 a una altura de 50 cm.

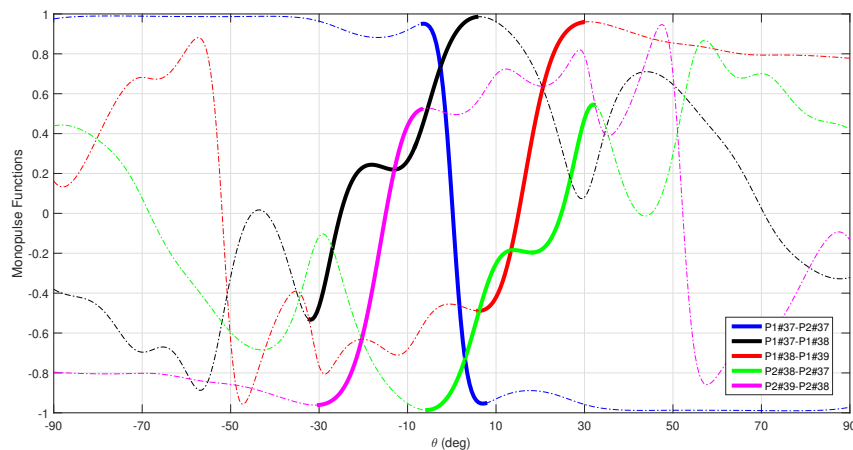


Figura 3.74: Funciones Monopulso a una altura de 50 cm.

Para este caso se aprecia una mezcla de las funciones monopulso, dejando de estar bien definido su FoV en su zona lineal, solo obteniendo buenas funciones con el uso de los canales 38-39 del puerto 1 y 38-39 del puerto 2, esto tiene sentido, ya que el canal 39 no se ha distorsionado mucho. Por tanto, a esta altura ya no tendremos buenos resultados en la obtención de las funciones de error y la consiguiente estimación de la posición.



# Capítulo 4

## Estimación de la posición del dron

En cuanto a la estimación de la posición del dron, se han obtenido los patrones de radiación lineales en cada eje (X e Y) y sus respectivas funciones monopulso. Esto mejorará la estimación de la posición, ya que el dron se mueve en planos horizontales paralelos al plano XY de nuestro sistema de referencia. Además, se ha medido la potencia en dichos planos horizontales paralelos a distintas alturas y distancias respecto de los ejes principales.

Los pasos a seguir para la localización y asistencia de aterrizaje del dron son los siguientes:

- Posicionamiento del dron con GPS.

En primer lugar, el dron se sitúa sobre la zona de aterrizaje a una altura entre 30m y 11.29m, límite donde ya entraríamos en campo cercano, mediante navegación GPS. A una altura de 30m, el área donde el dron puede posicionarse es un cuadrado de 51.9615m x 51.9615m y para 11.29m unas dimensiones de unos 20m x 20m, cubrimos una zona muy grande donde el dron será detectado sin problema. El sistema monopulso puede detectar la señal que el dron envía si supera un cierto umbral y así detectar que el dron ha entrado en la zona de aterrizaje. Desde ese momento, el sistema monopulso se encarga de la maniobra de descenso del propio dron.

- Desactivación del sistema GPS, conexión al sistema monopulso.

En segundo lugar, el sistema envía al dron la instrucción de desactivar la navegación GPS. El dron se conecta a la red BLE que proporciona el sistema. El dron mide la altura H con el altímetro sonar y le pasa esta información al sistema. El sistema monopulso mide las 4 RSSI y aplica la función monopulso para estimar la posición del dron.

- Estimación de la distancia lineal al origen ( $d_x, d_y$ ) y posición relativa del dron

El sistema monopolso estima la distancia al origen  $d_x$  y  $d_y$ , como puede verse en la Fig. 4.1 y por tanto la posición relativa del dron. Le da instrucciones para que corrija la desviación respecto de la posición central y descienda. A medida que desciende, el dron informa de su altura y el sistema monopolso mide la RSSI, aplica de nuevo la función monopolso en campo lejano, estima  $d_x$  y  $d_y$  y finalmente la posición relativa.

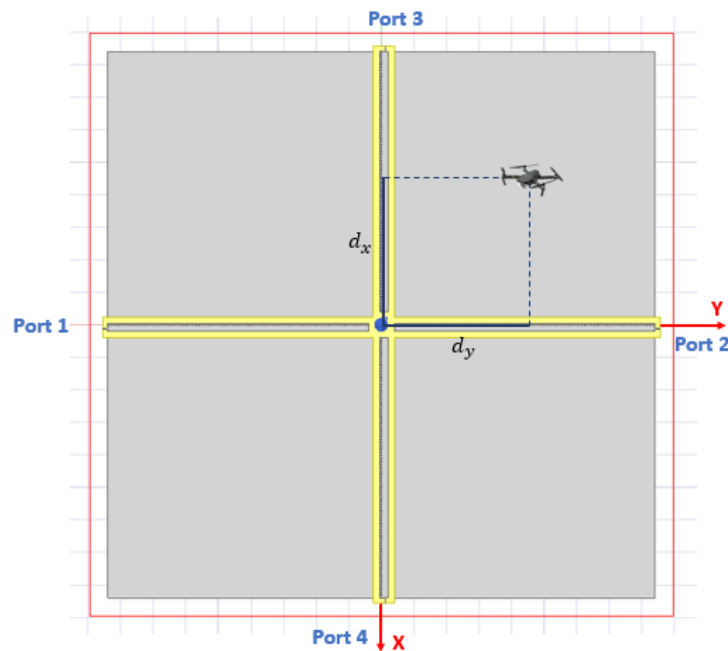


Figura 4.1: Coordenadas para protocolo de localización y asistencia al aterrizaje de drones.

Este proceso se repite de forma continua hasta que el dron se posa sobre la plataforma de aterrizaje, integrada en la estructura en cruz de las antenas monopolso directivas. Esto puede verse de manera mas clara en el siguiente diagrama de flujo:

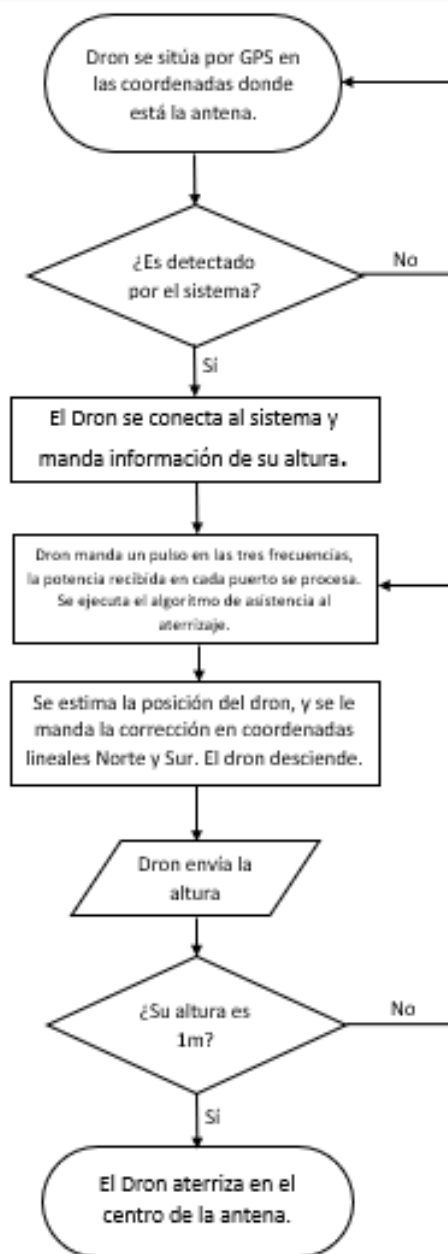


Figura 4.2: Diagrama de Flujo.

Para comprobar dicho protocolo se va a definir un punto de testeo dentro del FoV del sistema, en el cual se supondrá que está el dron situado, dicho punto tendrá unas coordenadas cartesianas  $(d_x, d_y, d_z)$ . En concreto, se van a suponer varios casos o puntos de estimación con el fin de ver como se comporta el sistema monopulso en cada punto del espacio.

1. Primer caso de estimación: El dron esta situado sobre uno de los ejes,  $d_x = 0m$ ,  $d_y = 1m$  y  $d_z = 10m$ . Esta estimación es necesaria para corroborar que sobre uno de los ejes el dron se sitúa correctamente ya que se están usando las funciones monopulso obtenidas con las ganancias tomadas en el mismo eje, sin embargo respecto del otro eje habrá un pequeño

error debido a que usamos las funciones monopulso calculadas sobre ese eje y no sobre eje paralelo donde esta el dron.

2. Segundo caso de estimación: El dron esta situado en  $d_x = 1m$ ,  $d_y = 4m$  y  $d_z = 10m$ . Donde se esta suponiendo que el dron está a una altura considerable, en la cual ha podido colocarse mediante el uso de su sistema GPS. Sobre esta altura podría comenzar el primer paso que el sistema debe realizar: la localización del dron.
3. Tercer caso de estimación:  $d_x = 0,42m$ ,  $d_y = 0m$  y  $d_z = 4m$ . Para este caso se simula la posición del dron a una altura mas próxima a la antena aun dentro del límite de campo cercano, además vamos a poner como ejemplo que estamos sobre uno de los ejes.
4. Cuarto caso de estimación:  $d_x = 0,2m$ ,  $d_y = 0m$  y  $d_z = 1m$ . Ahora se simula la posición del dron a una altura muy cercana a su punto de aterrizaje final, el centro de las antenas. Suponiendo que solo se le ha corregido en una coordenada respecto de la posición anterior. En este punto es necesario que el sistema estime con el menor error posible la posición exacta, ya que cada vez las correcciones que se le enviarán al dron respecto a su posición serán menores.

Para cada caso de estudio, se comenzará estimando la posición respecto del Eje Y, y después, respecto del Eje X, concluyendo con la combinación de ambas, obteniendo así el punto estimado de interés.

## 4.1. Primera estimación.

Coordenadas:  $d_x = 0m$ ,  $d_y = 1m$  y  $d_z = 10m$ .

### 4.1.1. Estimación respecto Eje Y

Partimos de datos conocidos, como el patrón de radiación a una altura dada por el sonar del dron.



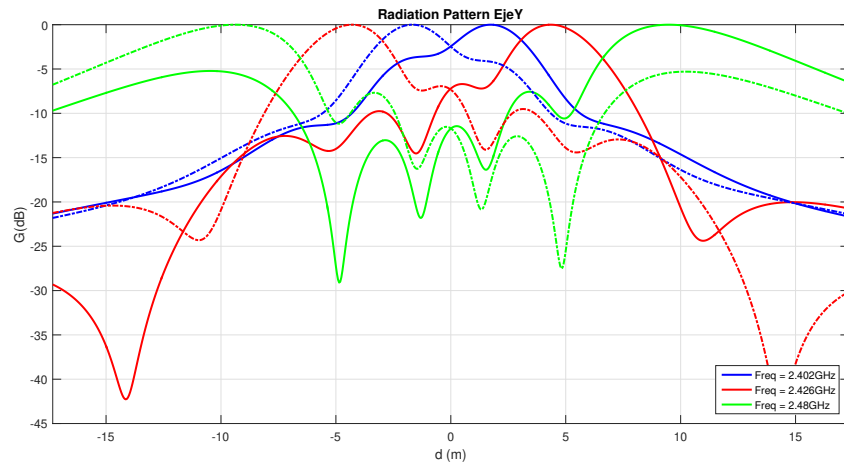


Figura 4.3: Patrón Radiación Lineal EjeY.

A partir de estos datos, calculamos las funciones monopulso.

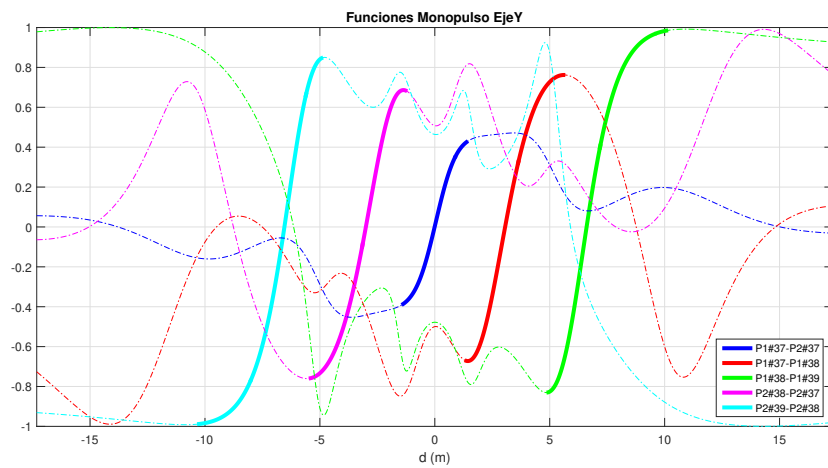


Figura 4.4: Funciones Monopulso Lineales EjeY.

El siguiente paso es, obtenida la potencia recibida del dron, calcular los diferentes valores monopulso.

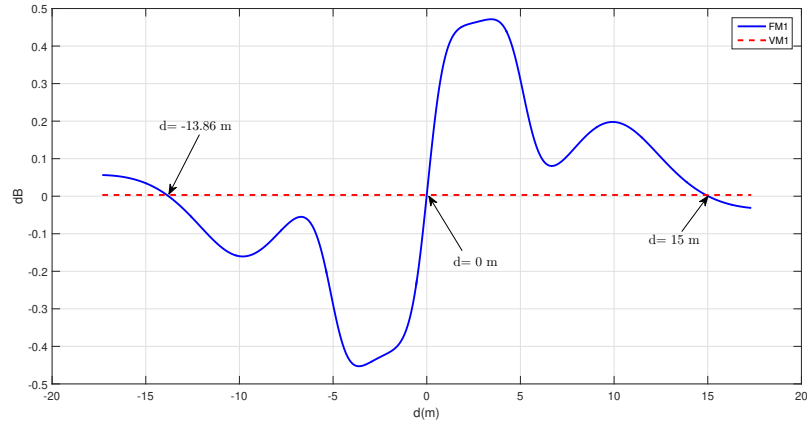


Figura 4.5: Función Monopulso m1 P1c37-P2c37 con Valor Monopulso Eje Y.

En esta figura 4.20 podemos ver el Valor monopulso y la función monopulso para  $m=1$ , es decir la combinación del Canal 37 del Puerto 1 y el canal 37 del Puerto 2.

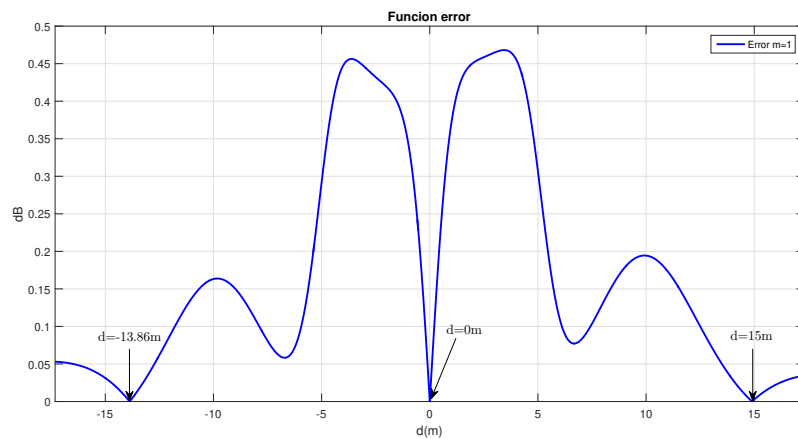


Figura 4.6: Función Error m1 P1c37-P2c37 Eje Y.

Se observan 3 nulos, uno a la distancia correcta respecto al eje Y y dos más que nos podrían generar una posible ambigüedad, para evitar eso, hacemos el mismo procedimiento con las demás funciones y valores monopulso.

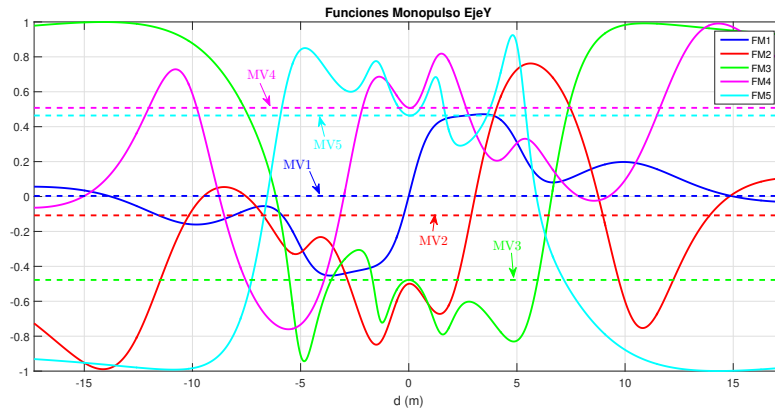


Figura 4.7: Funciones Monopulso Lineales con Valores Monopulso.

Calculamos los distintos errores para  $m=1, \dots, 5$ . De esta manera podemos ir observando como van disminuyendo las ambigüedades. Y para deshacernos de ellas completamente calculamos el Error Acumulativo General (OCE, Overall Acumulative Error) o también conocido como Error Cuadrático Medio (RMS).

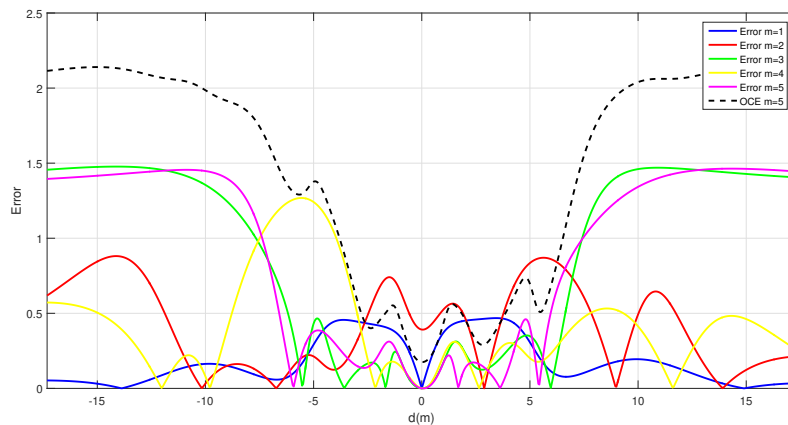


Figura 4.8: Funcion Error con OCE M5 EjeY.

En esta figura 4.21 se puede apreciar como al ir aumentando  $m$  en la función Error van disminuyendo las ambigüedades comentadas y finalmente obtenemos el OCE.

Por ultimo, a partir del OCE calculamos el Pseudoespectro. Donde podremos obtener el valor exacto de DoA.

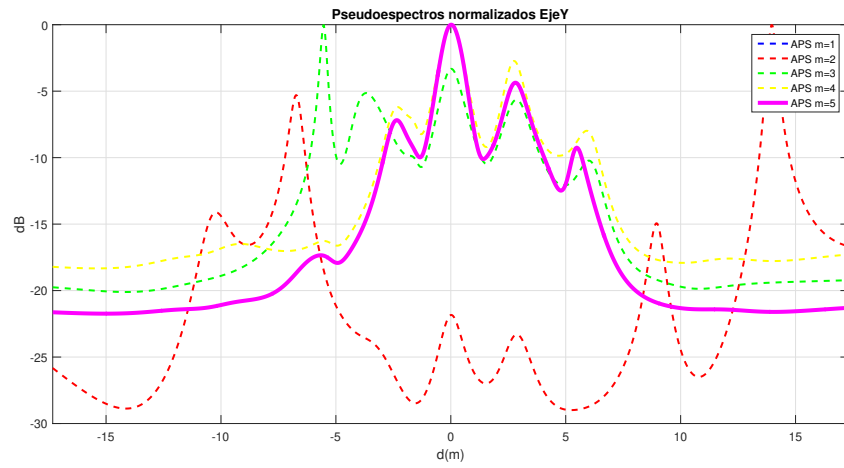


Figura 4.9: Pseudoespectro Eje Y.

#### 4.1.2. Estimación respecto Eje X

El mismo procedimiento realizado en el Eje Y, lo hacemos para el Eje X.

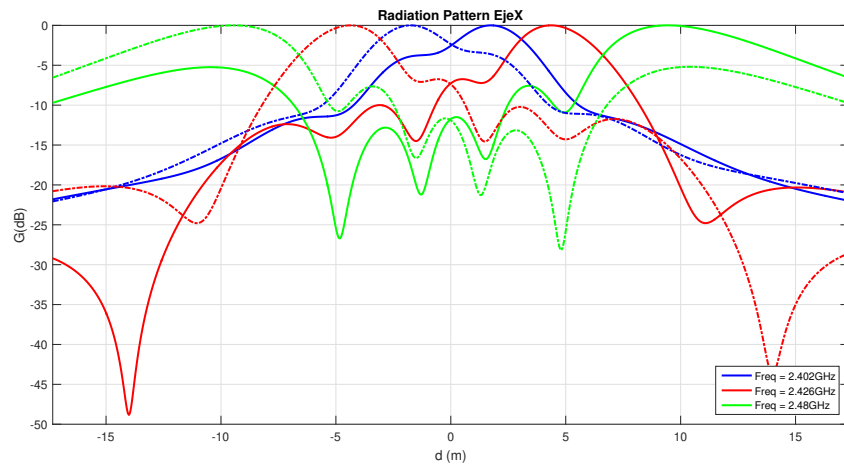


Figura 4.10: Patrón Radiación Lineal z10m en el Eje X.

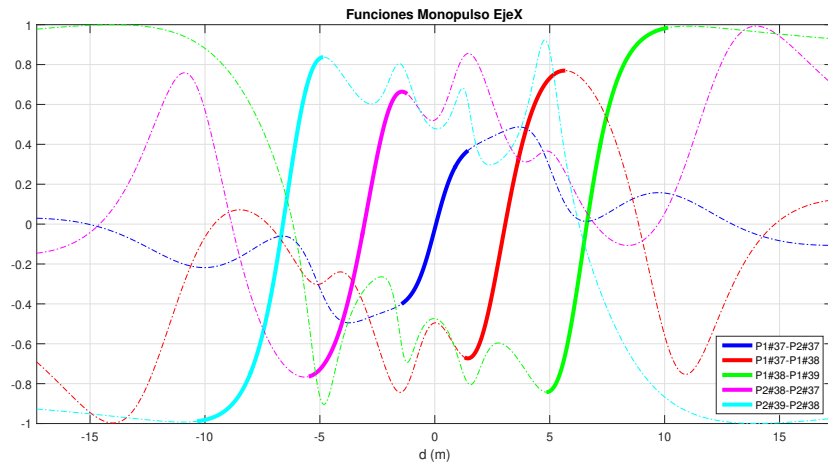


Figura 4.11: Funciones Monopulso Lineales EjeX.

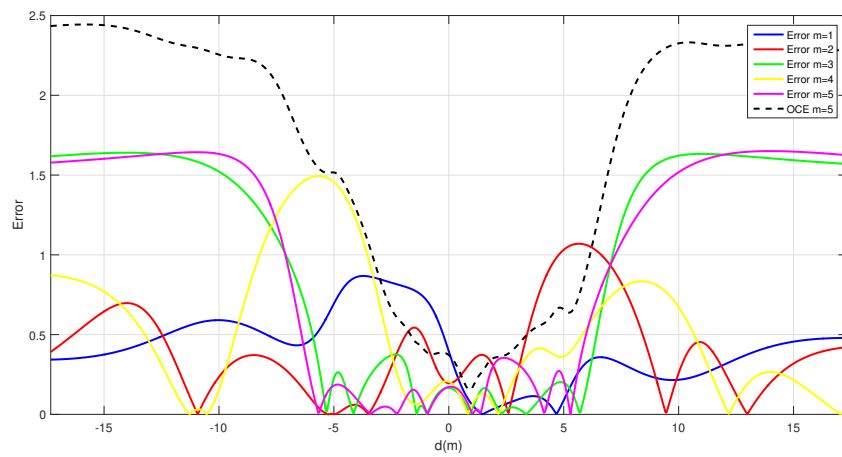


Figura 4.12: Función Error con OCE M5 EjeX.

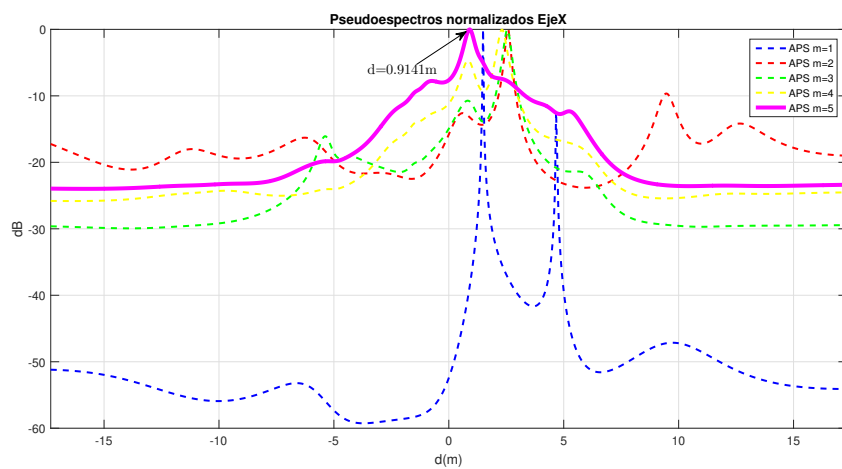


Figura 4.13: Pseudoespectros EjeX.

Se puede apreciar un pequeño error en el Pseudoespectro, ya que la posición de testeo definida a 1m no se obtiene exactamente, aparece una variación de 4cm.

Obtenemos finalmente una representación en vista superior de la posición que se ha estimado.

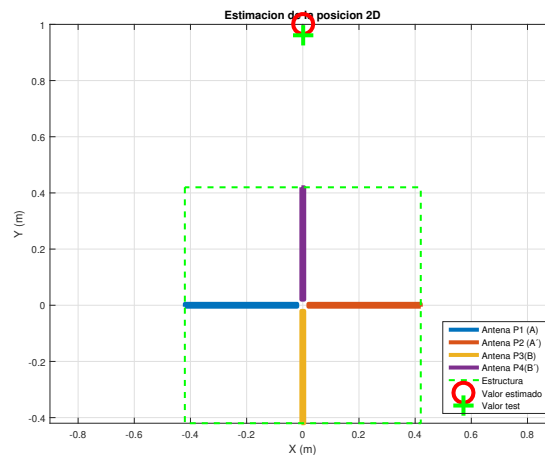


Figura 4.14: Estimación de la posición.

Como podemos ver en Fig. 4.14 y hemos adelantado antes, obtenemos la posición del drone con un pequeño error respecto al Eje X. Este error es provocado por el uso de las funciones monopulso calculadas en los ejes X e Y. Respecto a Y no tenemos ningún error, ya que se encuentra en el mismo eje, sin embargo si podemos apreciarlo respecto a X, con un error de 4cm. Este error puede llegar a ser asumible si las dimensiones del drone son mayores a esta distancia.

### Moviéndonos respecto al Eje X

Es este apartado, vamos a realizar la misma comprobación de situar el drone sobre el eje contrario al anterior y movernos respecto al otro.

Coordenadas:  $d_x = 1m$ ,  $d_y = 0m$  y  $d_z = 10m$ .

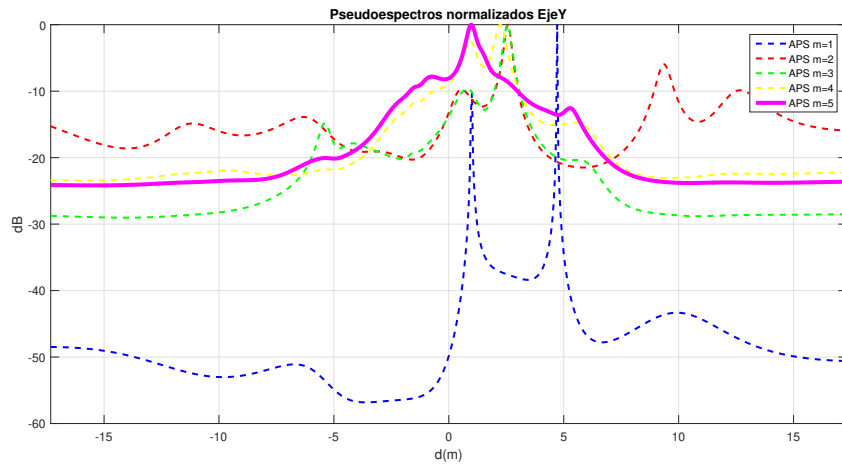


Figura 4.15: Pseudoespectros z10m EjeY.

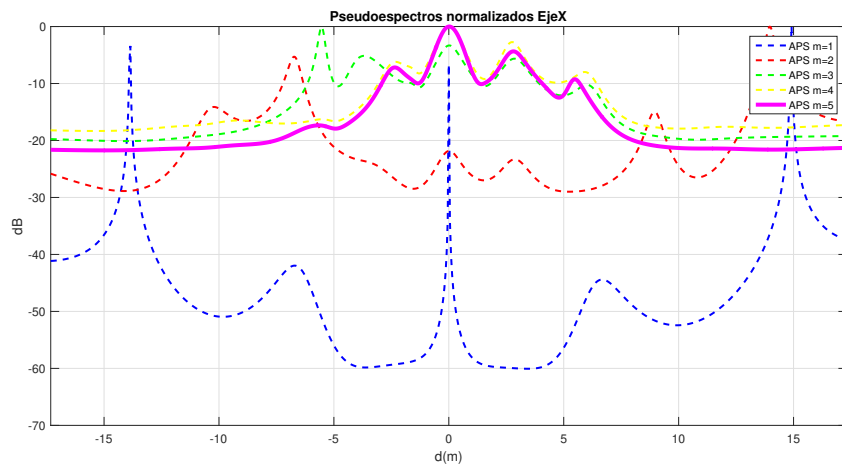


Figura 4.16: Pseudoespectros z10m EjeX.

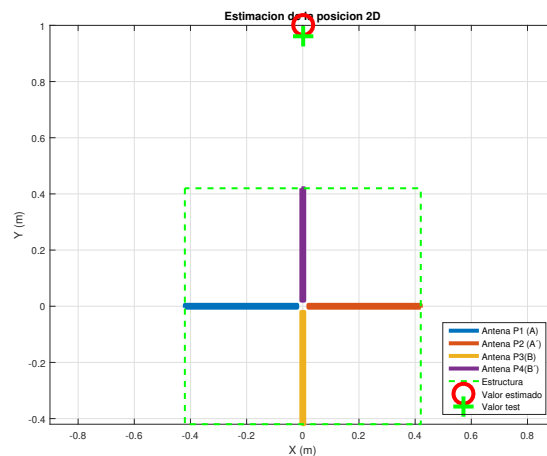


Figura 4.17: Estimación de la posición.

Como hemos podido apreciar, se cumple lo mismo que en el caso anterior, sobre un eje obtenemos una precisión exacta y un error pequeño sobre el otro.



## 4.2. Segunda estimación.

Coordenadas:  $d_x = 4m$ ,  $d_y = 1m$  y  $d_z = 10m$ .

### 4.2.1. Estimación respecto Eje Y

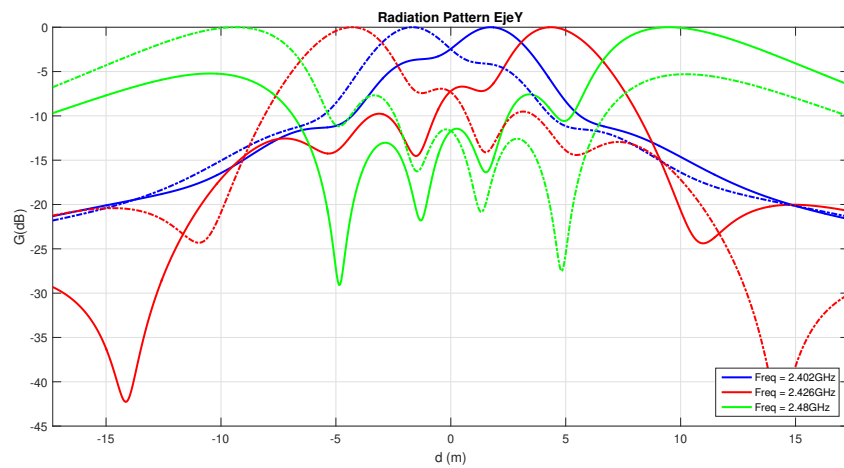


Figura 4.18: Patrón Radiación Lineal  $z=10m$ .

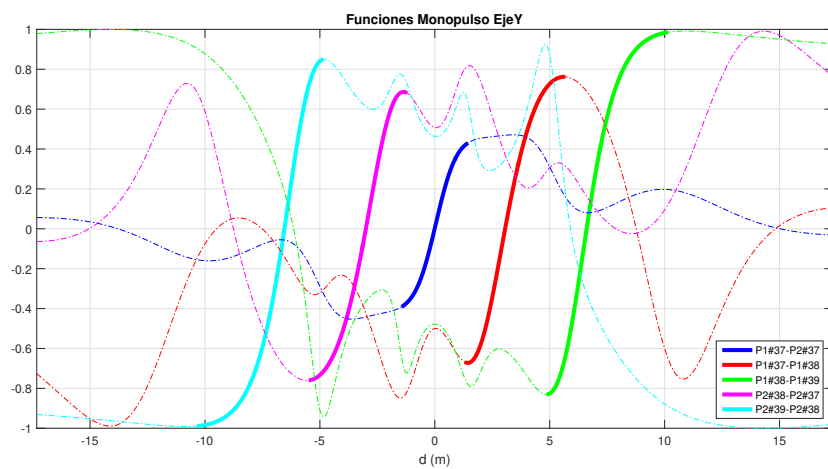


Figura 4.19: Funciones Monopulso Lineales Eje Y  $z=10m$ .

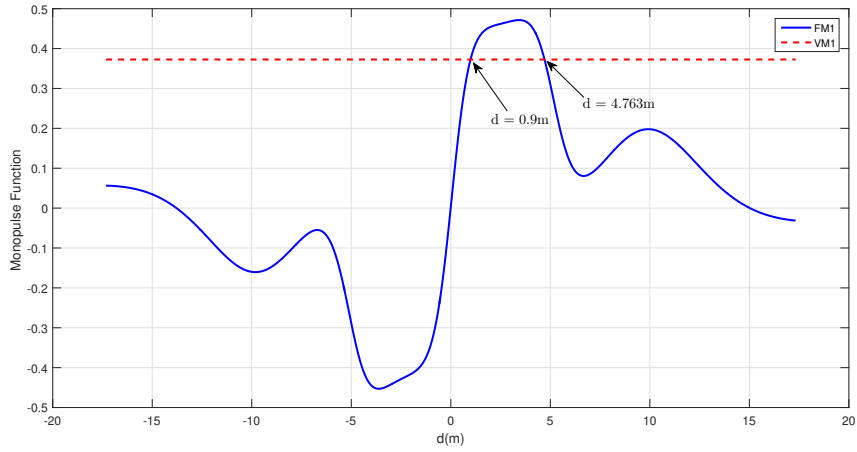


Figura 4.20: Funcion Monopulso m1 P1c37-P2c37 Eje Y z=10m.

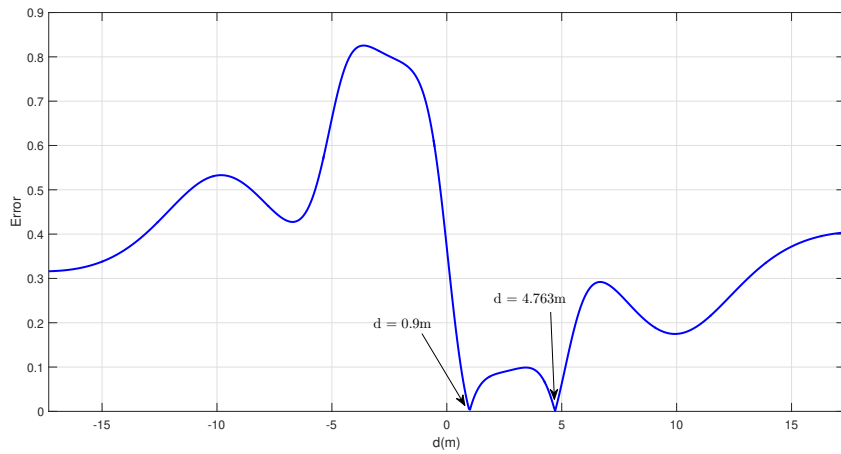


Figura 4.21: Funcion Error m1 P1c37-P2c37 Eje Y z=10m.

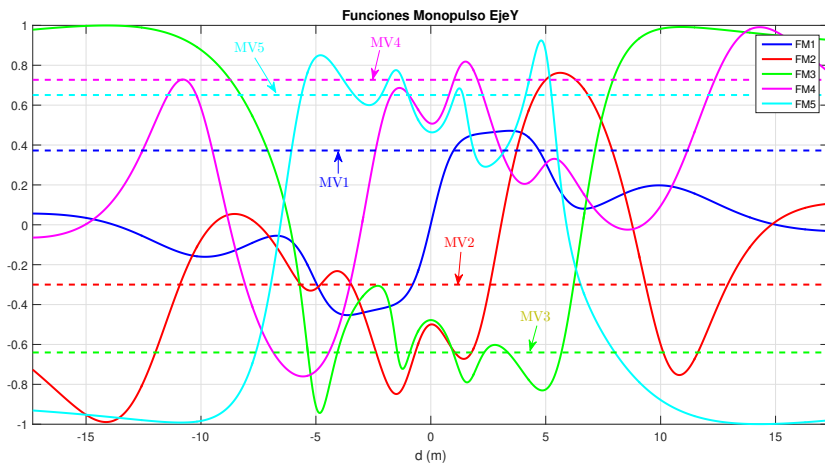


Figura 4.22: Funciones Monopulso Lineales con Valores Monopulso Eje Y z=10m.

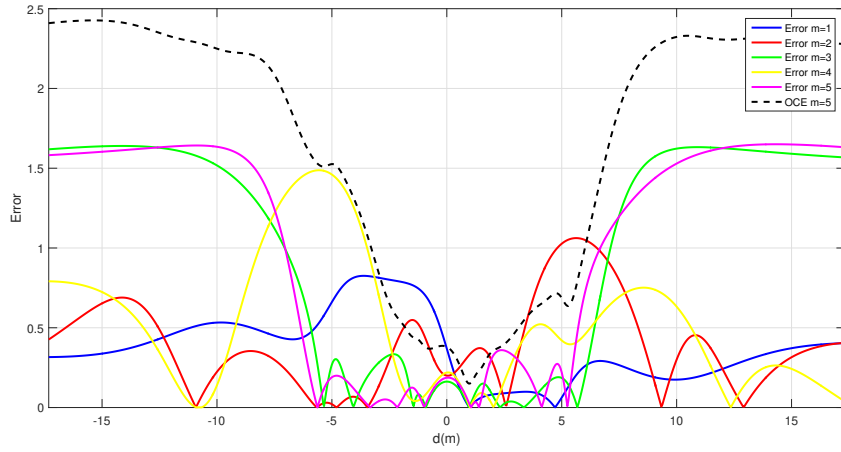


Figura 4.23: Funcion Error con OCE M=5 Eje Y z=10m.

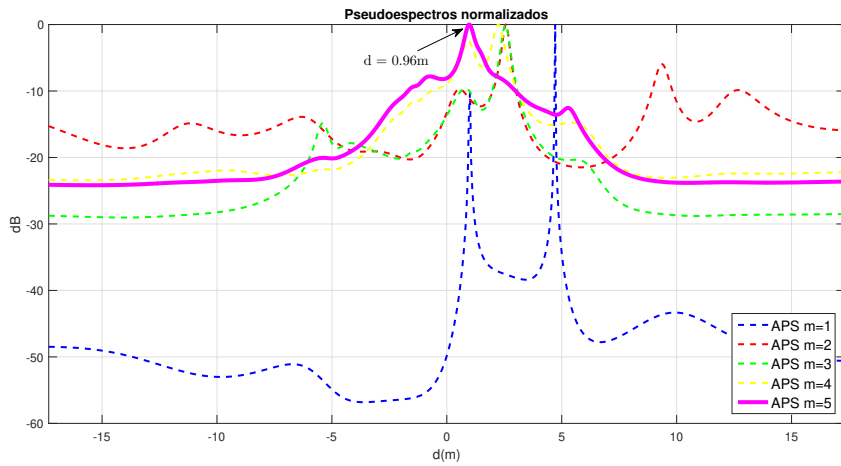


Figura 4.24: Pseudoespectros Eje Y z=10m.

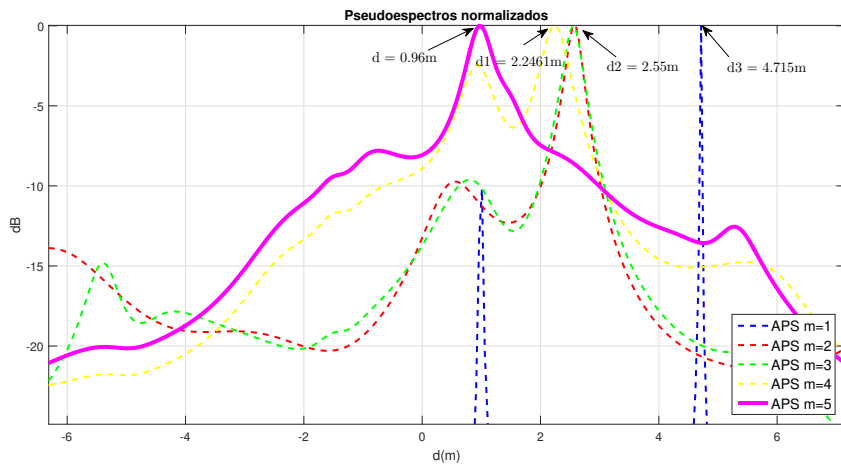


Figura 4.25: Ambigüedades APS Eje Y z=10m.

### 4.2.2. Estimación respecto Eje X

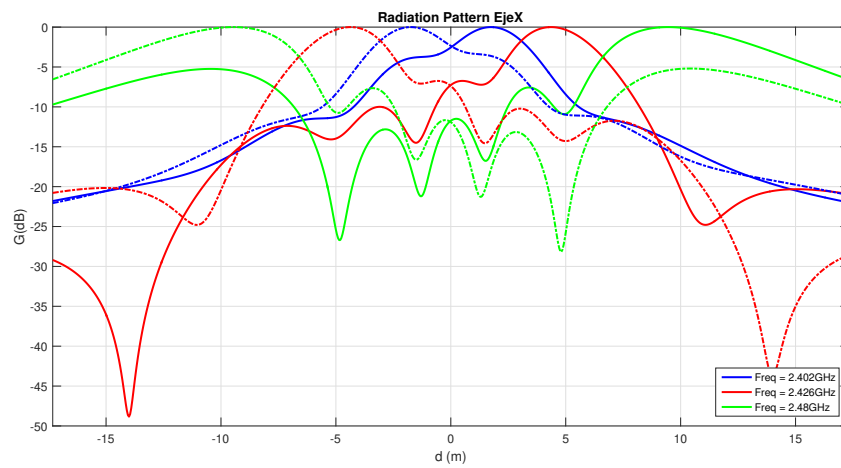


Figura 4.26: Patrón Radiación Lineal en el Eje X  $z=10\text{m}$ .

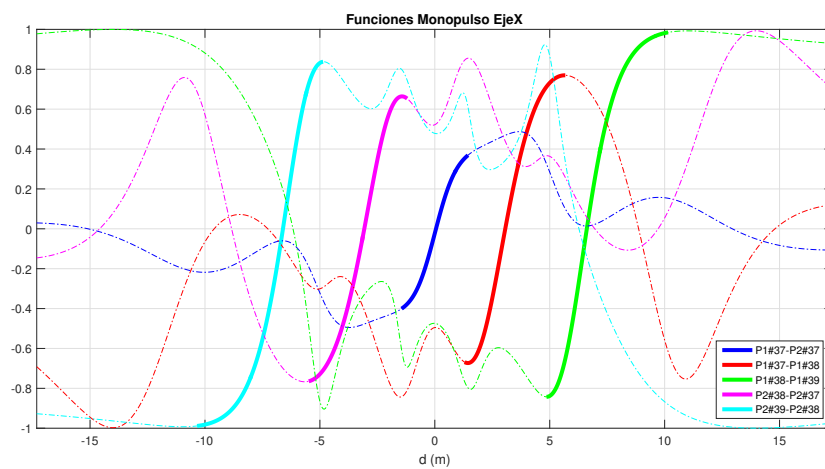


Figura 4.27: Funciones Monopulso Lineales en el Eje X  $z=10\text{m}$ .

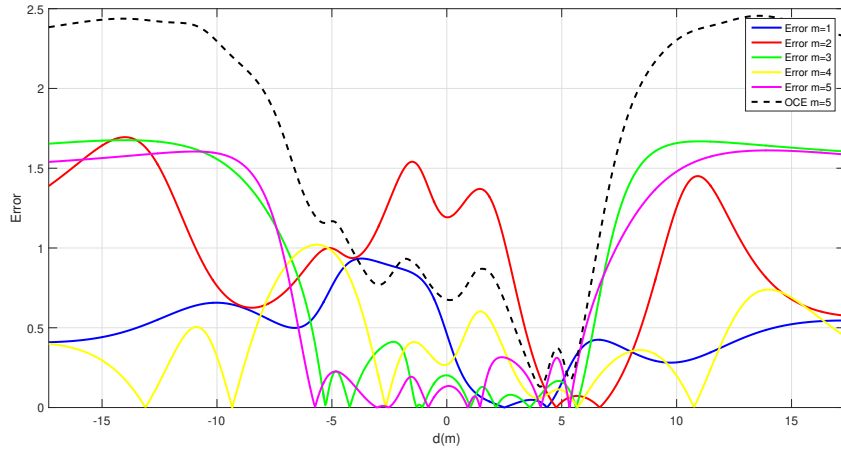


Figura 4.28: Función Error con OCE M=5 EjeX z=10m.

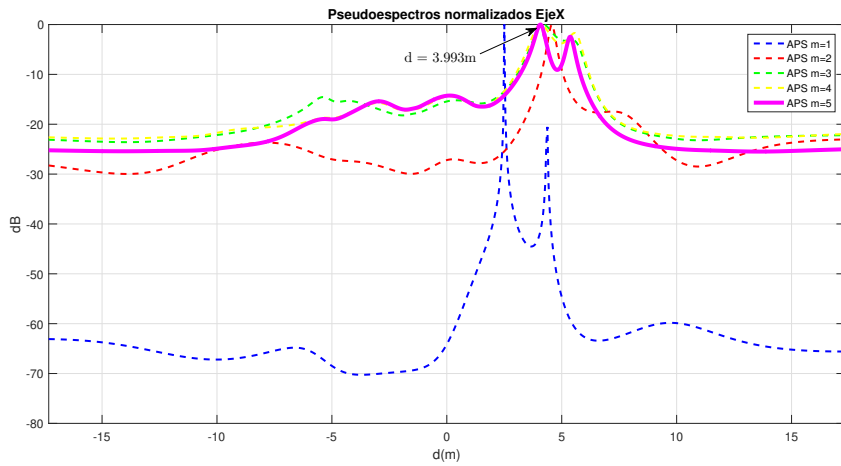


Figura 4.29: Pseudoespectros Eje X z=10m.

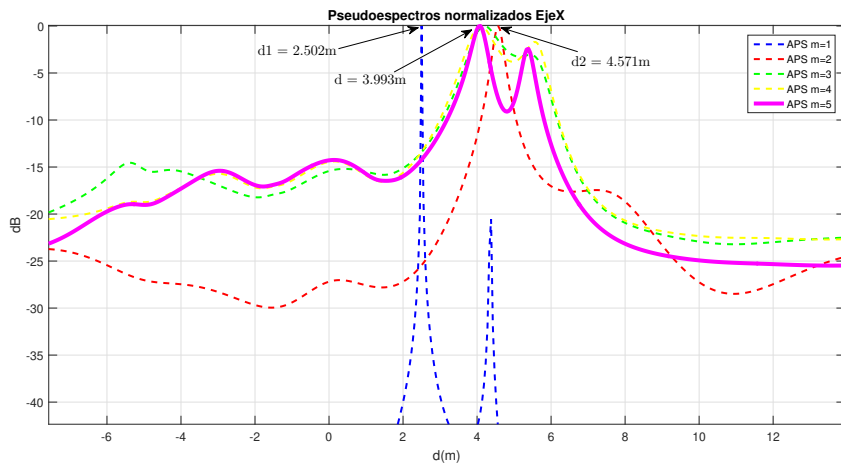


Figura 4.30: Ambigüedades en el Pseudoespectro Eje X z=10m.

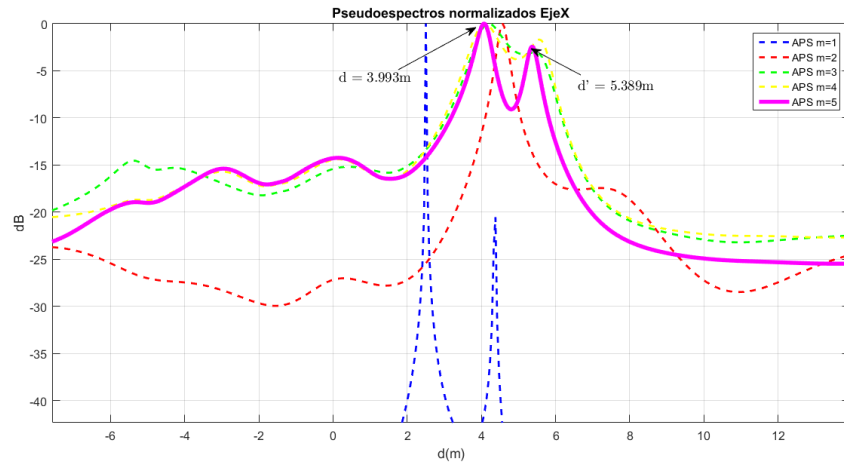


Figura 4.31: Ambigüedades en el Pseudoespectro Eje X  $z=10m$ .

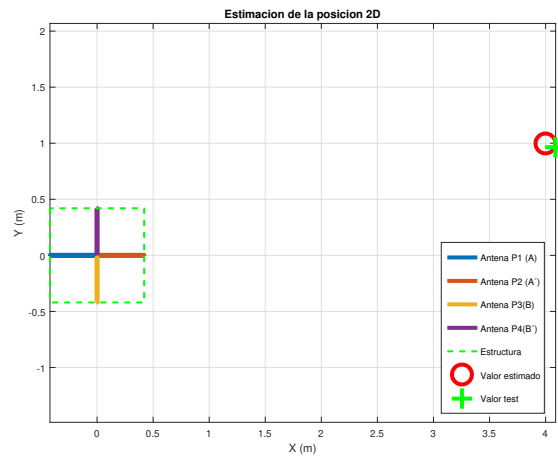


Figura 4.32: Estimacion de la posición  $z=10m$ .

En este caso, se ha obtenido un error respecto de ambos ejes, ya que ya no nos movemos sobre ninguno de ellos.

### 4.3. Tercera Estimación

Coordenadas:  $d_x = 0,42m$ ,  $d_y = 0m$  y  $d_z = 4m$ .

#### 4.3.1. Estimación respecto Eje Y

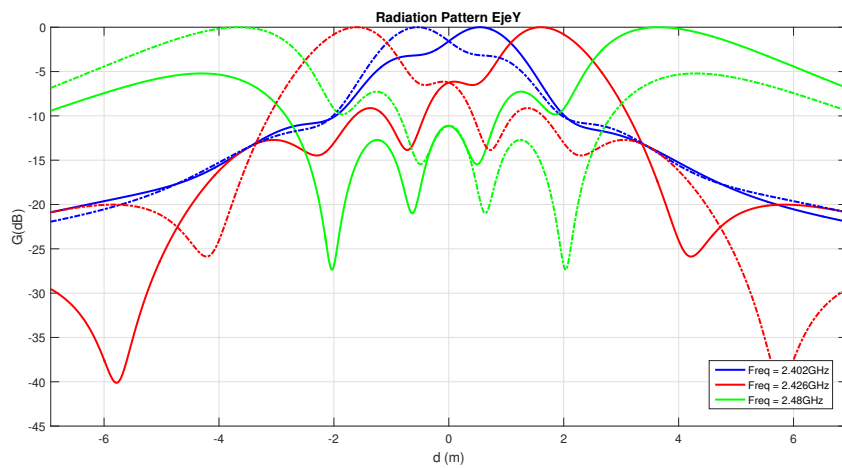


Figura 4.33: Patrón Radiación Lineal  $z=4m$ .

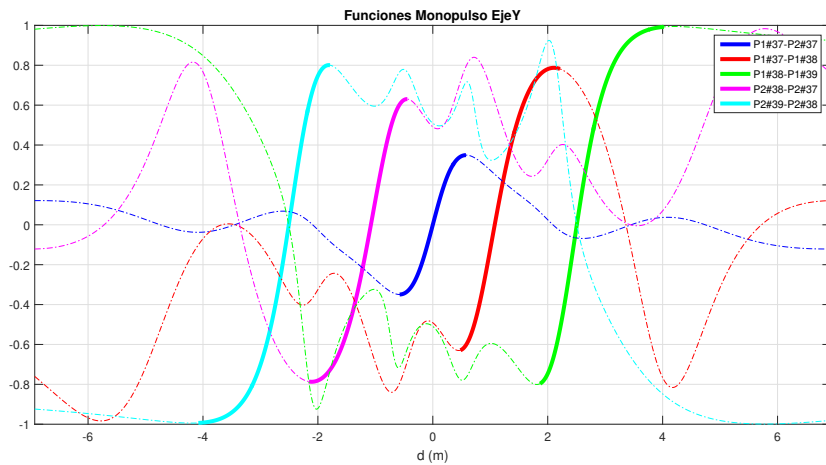


Figura 4.34: Funciones Monopulso Lineales Eje Y  $z=4m$ .

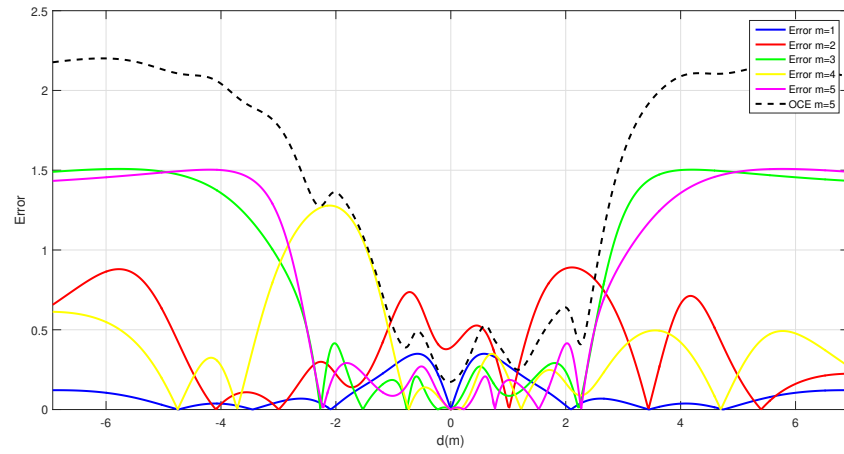


Figura 4.35: Función Error con OCE M5 Eje Y  $z=4\text{m}$ .

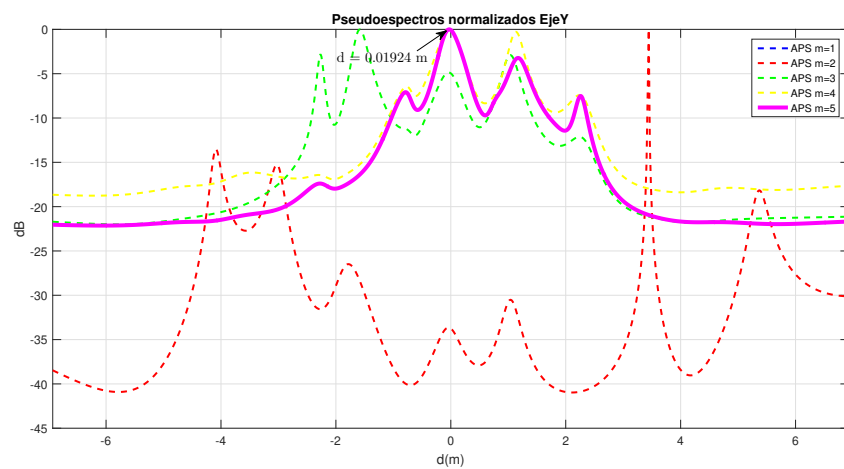


Figura 4.36: Pseudoespectros Eje Y  $z=4\text{m}$ .



### 4.3.2. Estimación respecto Eje X

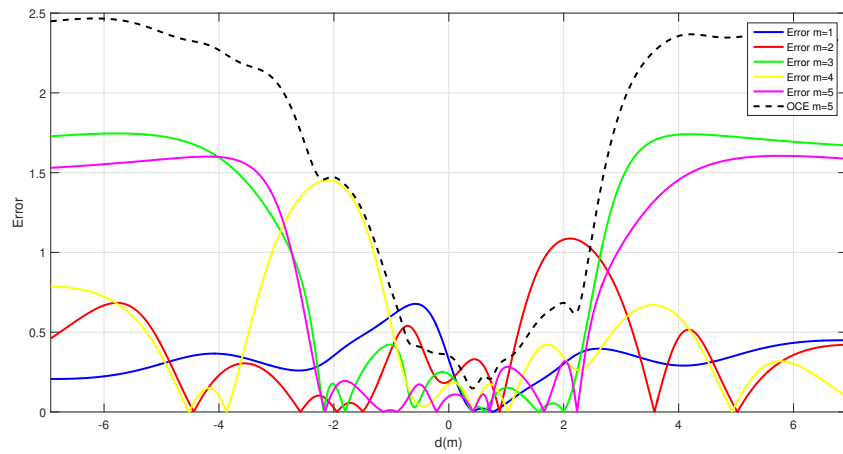


Figura 4.37: Función Error con OCE M=5 Eje X z=4m.

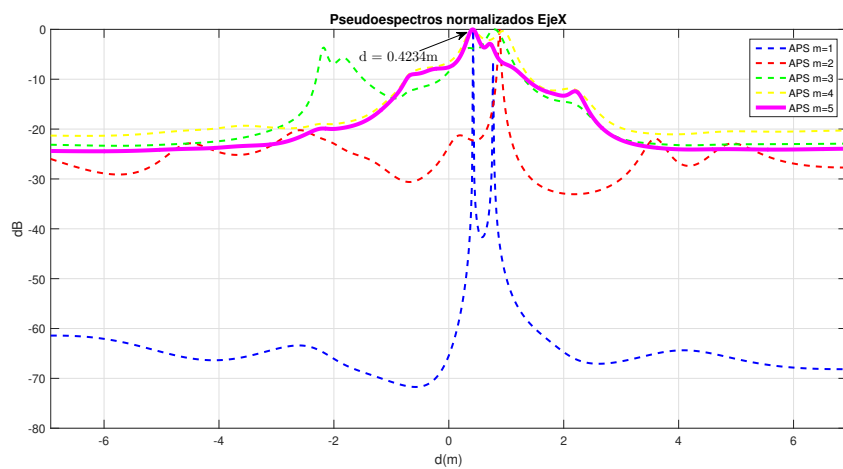


Figura 4.38: Pseudoespectros Eje X z=4m.

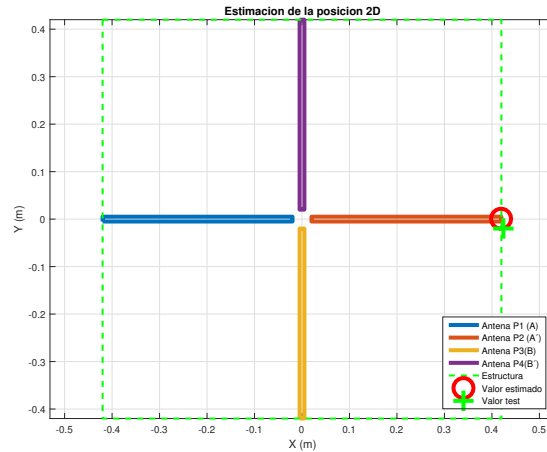


Figura 4.39: Estimación de la posición  $z=4m$ .

En general para esta estimación, tenemos un error en ambas coordenadas, en concreto en el Eje X de 3mm, error casi despreciable, y en el Eje Y de 1.9 cm.

## 4.4. Cuarta Estimación

Coordenadas:  $d_x = 0,2m$ ,  $d_y = 0m$  y  $d_z = 1m$ .

### 4.4.1. Estimación respecto Eje Y

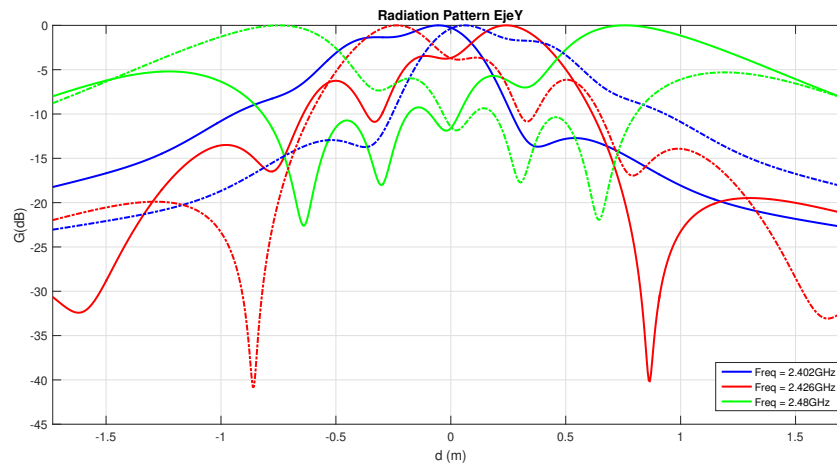


Figura 4.40: Patrón Radiación Lineal  $z=1m$ .

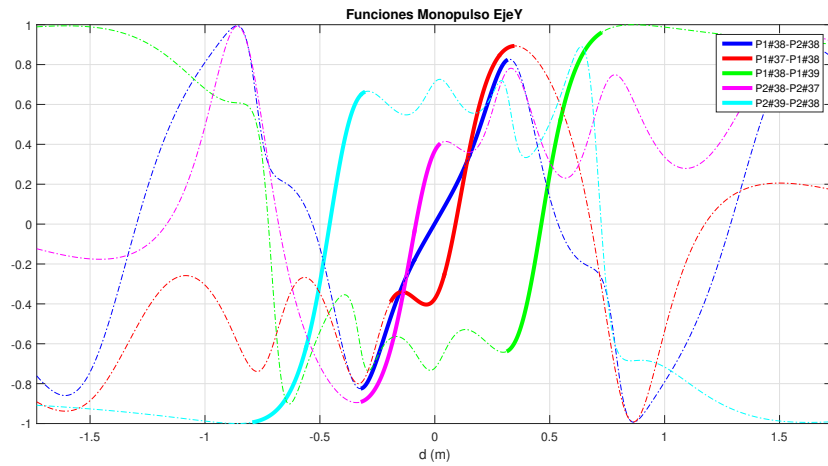


Figura 4.41: Funciones Monopulso Lineales Eje Y z=1m.

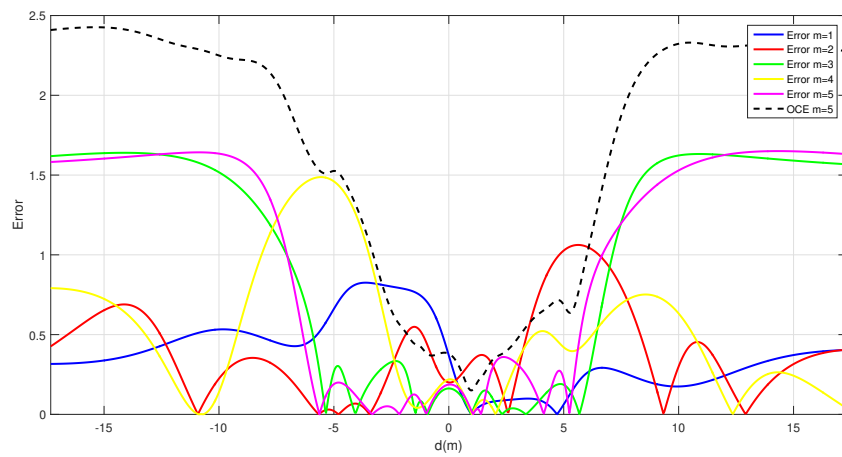


Figura 4.42: Funcion Error con OCE M=5 Eje Y z=1m.

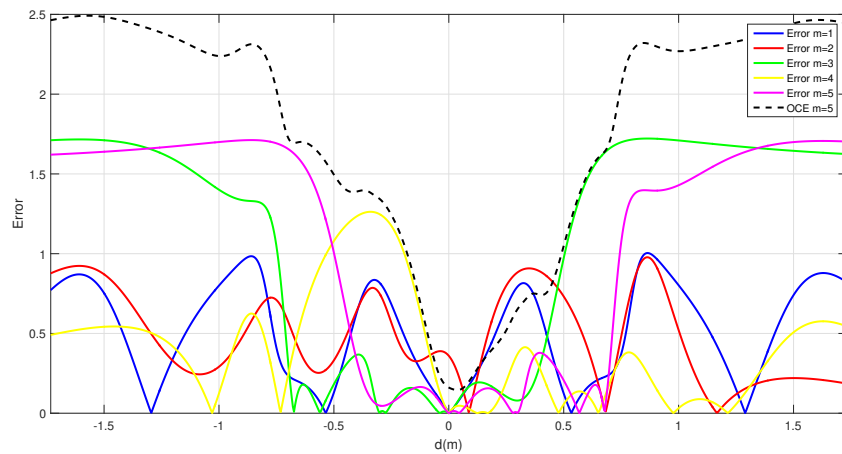


Figura 4.43: Pseudoespectros Eje Y z=1m.

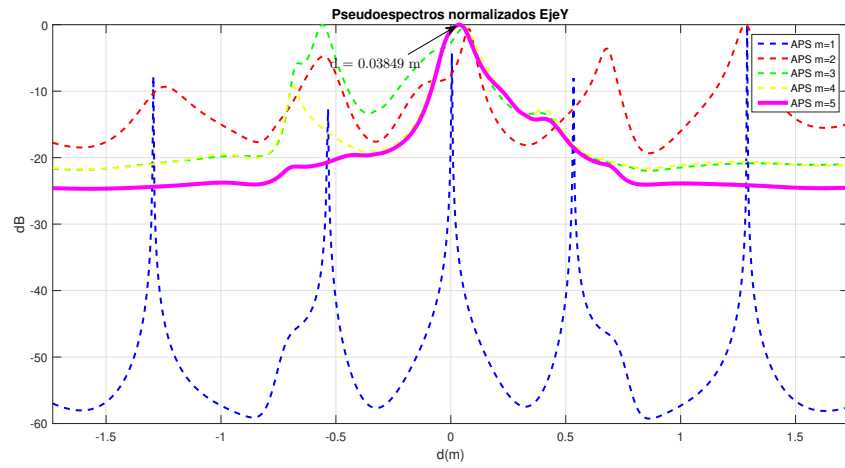


Figura 4.44: Ambigüedades APS Eje Y  $z=1\text{m}$ .

#### 4.4.2. Estimación respecto Eje X

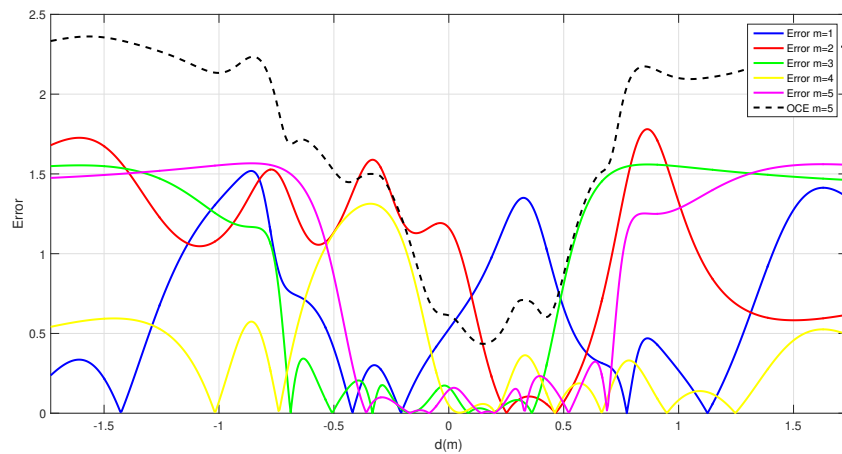


Figura 4.45: Función Error con OCE  $M=5$  Eje X  $z=1\text{m}$ .

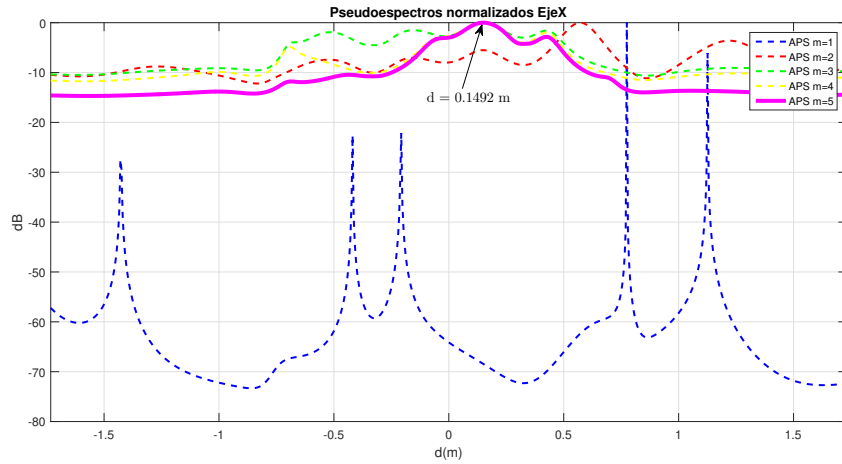


Figura 4.46: Pseudospectros Eje X  $z=1\text{m}$ .

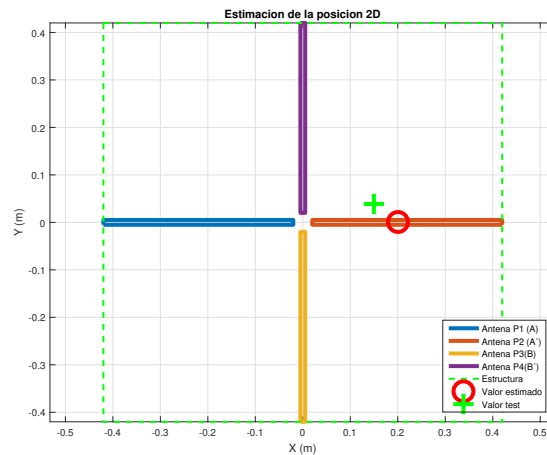


Figura 4.47: Estimación de la posición  $z=1\text{m}$ .

Para esta estimación, tenemos un error en ambas coordenadas de 0.5cm Eje X y de 3.84 cm en el Eje Y. Este error ha aumentado en ambos ejes debido a que estamos en el campo reactivo y el diagrama de radiación que se obtiene está un poco distorsionado, esto hace que las funciones monopulso no sean del todo precisas para la estimación, como hemos adelantado en el apartado 3.2.2. Aun así, este error es mejor que las posibles dimensiones del drone, por tanto podemos considerar este error asumible en el sistema.

De esta manera consideramos que el sistema monopulso 2D funciona desde una altura de 30m a 1m asumiendo un pequeño error de 4cm como máximo para casos muy alejados de la antena.



# Capítulo 5

## Conclusiones y líneas futuras

### 5.1. Conclusiones

En resumen, el proyecto comienza con el diseño del sistema radiante monopulso de antenas directivas con el objetivo de obtener funciones monopulso 2D, esto quiere decir, que cada par de antenas forman dos planos perpendiculares. De teoría de los sistemas radar monopulso, estas funciones error ofrecen una dirección de llegada de la señal a partir de la potencia recibida en las antenas. Con la desviación en cada plano, es posible conocer la posición relativa del dron a una cierta altura.

Se ha realizado las diferentes caracterizaciones a varias distancias con el objetivo de estudiar los efectos radiativos de campo cercano para hacer una estimación precisa a distancias cortas entre el dron y el sistema monopulso. Por ello, se calibra el factor de corrección y la función error de localización correspondiente a cada distancia. Como resultado aproximado de estudiar los diferentes diagramas de radiación a varias distancias, se observa que el FoV disminuye conforme el objetivo se acerca al sistema monopulso por el efecto de los campos cercanos, que hace que los haces se muevan hacia broadside y se ensanchen esto nos provoca disminución del FoV y una disminución de la resolución. Se ha propuesto un algoritmo de localización en el cual, se han estudiado varios casos de estimación para ver como se comporta el sistema.

Teniendo en cuenta estos efectos, el sistema monopulso se puede calibrar para localizar al dron en una pirámide cuadrada invertida de dimensiones aproximadas como se muestra en los dos planos sobre la Fig. 3.13.

## 5.2. Líneas futuras

Como líneas futuras de este proyecto destacaría como primer paso, fabricar la antena, pero modificando el diseño para poder integrar en un único sustrato las dos antenas en cruz. Para ello hay que usar lo que se llama un "crossover", o cruce, entre dos guías SIW, siguiendo por ejemplo este diseño:

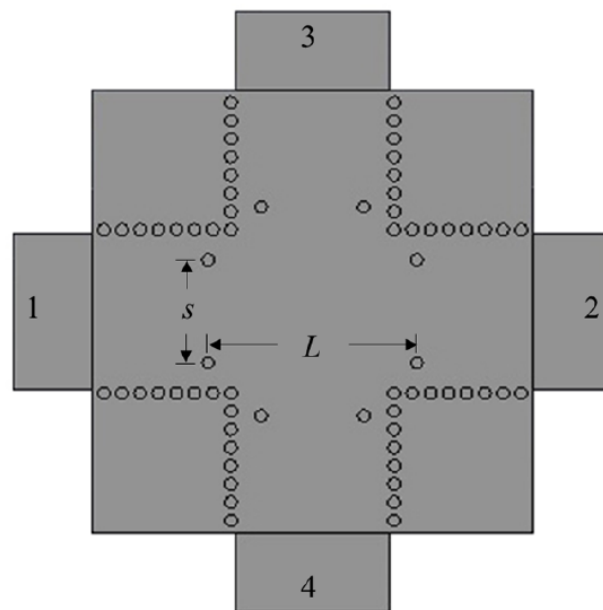


Fig. 1. Substrate integrated waveguide crossover based on full-wavelength resonator, including port numbering used in this paper.

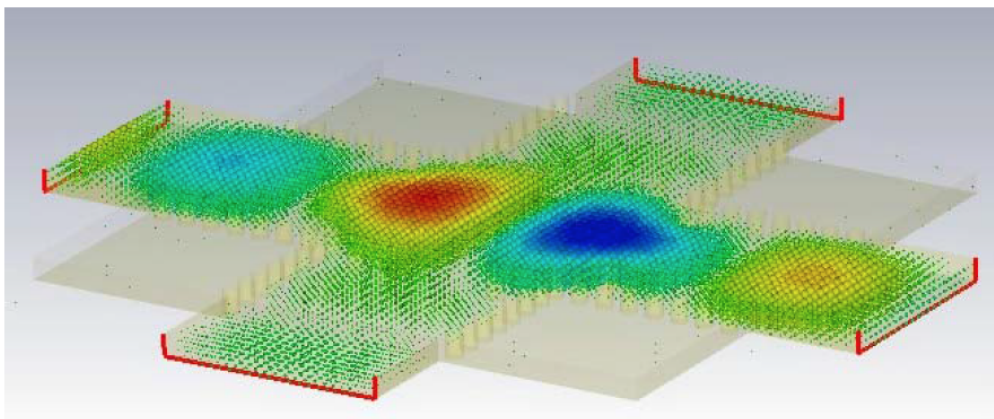


Fig. 2. Electric field within the SIW crossover displaying the full-wave ( $TE_{102}$ -mode) resonance.

Continuando con su posterior comprobación en cámara anecoica de las características para las cuales se ha diseñado. El siguiente paso sería caracterizar las diez funciones monopulso usando los tres canales BLE, tanto a nivel analógico como digital. Y por último, comprobar experimentalmente las prestaciones del sistema a la hora de estimar la posición de un drone



equipándolo con un beacon BLE y programar una rutina de estimación y corrección de la posición en tiempo real, usando la técnica monopolso propuesta, que depende de la altura del drone.



# Bibliografía

- [1] A. Oliner and D. R. Jackson, “*Leaky-wave antennas*”, in *Antenna Engineering Handbook*, J. L. Volakis, Ed., 4th ed. New York: Mc- Graw-Hill, Jun. 2007, ch. 11.
- [2] M Poveda-García, D Cañete-Rebenaque, JL Gómez-Tornero, “*Frequency-Scanned Monopulse Pattern Synthesis Using Leaky-Wave Antennas for Enhanced Power-Based Direction-of-Arrival Estimation*”. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. July 2019.
- [3] Pozar, D.M. "Microwave Engineering", 4th ed. WILEY, 2004, ch. 3.
- [4] Alejandro Javier Martínez-Ros, José Luis Gómez-Tornero , and George Goussetis. "*Microstrip Half-Mode Leaky-Wave Antenna Operating at 94 GHz*". Technical University of Cartagena, Cartagena 30202, Spain. Queen’s University Belfast, BT3 9DT, UK
- [5] Martínez Tamargo, Luis Miguel; Trabajo Fin de Grado (Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación: “Diseño de una antena monopulso leaky-wave en tecnología planar para aplicación en sistemas de localización”, dirigido por D. Cañete Rebenaque y J.L. Gómez Tornero. Octubre 2017.
- [6] Martínez Tamargo, Luis Miguel; Trabajo Fin de Master (Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación: “*Diseño de un sistema monopulso 2D para asistencia en aterrizaje autónomo de drones*”, dirigido por D. Cañete Rebenaque y J. C. Aartnouse Sánchez. Julio 2019.
- [7] D. BONEFACIC;, J. JANCULA, N. MAJUREC, "*Model of a monopulse radar tracking system for student laboratory*", *Radioengineering* 16(3):62-67 · September 2007
- [8] Poveda-García, Miguel; Trabajo Fin de Master (Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación: “Diseño de Antenas Leaky-Wave en Tecnología de Guía de Onda Integrada en Substrato con Cavidades Acopladas Para Aumentar Su Ancho de Banda”, dirigido por J.L. Gómez Tornero. Septiembre 2016.

- [9] G.M. Zelinski, G.A. Thiele, M.L. Hastriter, M.J. Havrilla and A.J. Terzuoli. "*Half width leaky wave antennas*", IET Microw. Antennas Propag., 2007, 1, (2), pp. 341–348.
- [10] W. Kederer and J. Detlefsen, "*Direction of arrival (DOA) determination based on monopulse concepts*", 2000 Asia-Pacific Microwave Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8522), Sydney, NSW, 2000, pp. 120-123.
- [11] Yuanxin Li, Quan Xue, Edward Kai-Ning Yung, and Yunliang Long, "*The Periodic Half-Width Microstrip Leaky-Wave Antenna With a Backward to Forward Scanning Capability*". IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 58, NO. 3, MARCH 2010
- [12] Manual Ansys Electronics HFSS.
- [13] J.A. López-Pastor, A. Gómez-Alcaraz, D. Cañete-Rebenaque, A.S. Martínez-Sala, and J.L. Gómez-Tornero, "*Near-Field Monopulse DoA Estimation for Angle-Sensitive Proximity WiFi Readers*", IEEE Access Journal Special Section on Emerging Trends, Issues and Challenges for Array Signal Processing and Its Applications in Smart City, July 2019.
- [14] M. Poveda-García, A. Gómez-Alcaraz, D. Cañete-Rebenaque A. S. Martínez-Sala, J.L. Gómez-Tornero, "*RSSI-based Direction-of-Departure Finding of Bluetooth Devices using Frequency-Scanned Monopulse Leaky-Wave Antenna Arrays*", IEEE Access Journal Special Section on Emerging Trends, Issues and Challenges for Array Signal Processing and Its Applications in Smart City, under review.
- [15] M. Poveda-García, A. Gómez-Alcaraz, A. Gil-Martínez, P. Hidalgo-Sánchez, D. Cañete-Rebenaque, A.S. Martínez-Sala, and J.L. Gómez-Tornero, "*Radar Monopulso Activo con Escaneo en Frecuencia basado en Dispositivos Bluetooth Low Energy usando un Array de dos Antenas Leaky Planares*", XXXIV Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Sevilla, España, 4-6 Septiembre de 2019
- [16] M. Poveda-García, A. Gómez-Alcaraz, A. Gil-Martínez, D. Cañete-Rebenaque, A.S. Martínez-Sala, and J.L. Gómez-Tornero, "*Frequency-Scanned Active Monopulse Radar based on Bluetooth Low Energy Devices using an Array of Two Planar Leaky-Wave Antennas*", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 2019), Granada, España, 9-13 Septiembre de 2019

- [17] J. A. López-Pastor, A. Gómez-Alcaraz, D. Cañete-Rebenaque, A. S. Martínez-Sala and J. L. Gómez-Tornero, "Near-Field Monopulse DoA Estimation for Angle-Sensitive Proximity WiFi Readers,in IEEE Access, vol. 7, pp. 88450-88460, 2019.
- [18] Davor Bonefacic, Julijana Jancula "*Model of a monopulse radar tracking system for student laboratory*", 48th International Symposium ELMAR-2006, 07-09 June 2006, Zadar, Croatia.
- [19] Alejandro Diaz M., José Fayos F., J. M. Cabrera, "*Microondas, Líneas de Transmisión, Guías de Onda y Cavidades Resonantes*", Universidad Politécnica de Cartagena, Septiembre 2016.
- [20] A.I. Leonov, K.I. Formichev, "*Monopulse Radar*", Artech House, Norwood, MA, 1986.
- [21] S. M. Sherman and D. K. Barton, "*Monopulse Principles and Techniques*". 957 Boston, MA, USA: Artech House, 2011.