

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



TRABAJO FIN DE MÁSTER

## **Estudio experimental de Imaging a 100 GHz y 300 GHz para la detección de diversos objetos**



*AUTOR:* Héctor Kevin Delgado Patiño  
*DIRECTOR:* José María Molina García-Pardo

Septiembre / 2017





<b>Autor</b>	Héctor Kevin Delgado Patiño
<b>E-mail del Autor</b>	hectorpatino1992@gmail.com
<b>Director</b>	José María Molina García-Pardo
<b>E-mail del Director</b>	josemaria.molina@upct.es
<b>Título del TFM</b>	Estudio experimental de Imaging a 100 y 300 GHz para la detección de diversos objetos
<b>Resumen</b> <p>Las radiaciones cuyas longitudes de onda se sitúan en el rango de los terahertzios (THz) o décimas de terahertzio (0.1-1 THz) han despertado interés en tiempos recientes entre los investigadores dedicados al campo de las comunicaciones. Al estar situadas entre la región infrarroja y la región de microondas del espectro electromagnético, dichas radiaciones pueden propagarse con facilidad a través de materiales no polarizados, tales como la ropa o las envolturas de paquetes.</p> <p>Esto las hace particularmente interesantes de estudiar para su aplicación en sistemas de detección de objetos o de medición remota, en el cual, mediante la emisión de un haz de ondas electromagnéticas enfocado hacia un objeto de interés, podemos ser capaces de obtener información del mismo.</p> <p>Las principales bandas de frecuencias objeto del estudio han sido las de 100 GHz y 300 GHz. Para ello, la UPCT ha realizado dos campañas de medidas mediante un analizador de redes vectorial de 67 GHz, al cual, al añadirsele convertidores de onda milimétricos, puede trabajar en un rango de frecuencias desde 50 hasta 500 GHz.</p> <p>El objetivo principal es la implementación de algoritmos de Imaging para ver objetos mediante ondas milimétricas.</p>	
<b>Titulación</b>	Máster en Ingeniería de Telecomunicación
<b>Departamento</b>	Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación</b>	Septiembre 2017



## **Agradecimientos**

A mi madre, sin cuyo sacrificio y esfuerzo el haber llegado hasta aquí no hubiera sido posible. A Victoria, por todos los años pasados a su lado y ser mi apoyo en los malos momentos. Y a los que no creyeron en mí, por impulsar mi espíritu de superación para tener el placer de callarles.



<b>Índice</b> .....	<b>7</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>11</b>
INTRODUCCIÓN.....	11
<u>1.1. Objetivos</u> .....	12
<u>1.2. Fases del proyecto</u> .....	13
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>17</b>
IMAGING. ESTADO DEL ARTE.....	17
<u>2.1. Radares de apertura sintética</u> .....	18
<u>2.2. Radar de apertura sintética con analizador de redes</u> .....	21
<u>2.3. Imaging mediante la Transformada Dispersa de Fourier</u> .....	23
<u>2.4. Imaging en 3-D de alta resolución a 300 GHz con stand-off</u> .....	27
<u>2.5. Imaging con escaneo usando la técnica fan-beam</u> .....	28
<u>2.6. Imaging con modelado SAR mediante ondas milimétricas</u> .....	32
<u>2.7. Resumen del capítulo</u> .....	33
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>35</b>
METODOLOGÍA.....	35
<u>3.1. Técnica de imaging bi-focusing. Formulación matemática</u> .....	35
<u>3.2. Algoritmo MMW Bi-focusing en banda ancha ISAR FQ (100 y 300 GHz)</u> .....	37
<u>3.3. Algoritmo auxiliar para el cálculo del PDP</u> .....	40
<u>3.4. Resumen del capítulo</u> .....	41
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>43</b>
CAMPAÑA DE MEDIDAS.....	43
<u>4.1. Descripción del campo de trabajo</u> .....	45
<u>4.2. Esquema de las medidas</u> .....	46
<u>4.3. Configuraciones de las medidas</u> .....	47
<u>4.4. Objetos a medir</u> .....	51
<u>4.4.1. Cubo verde</u> .....	51
<u>4.4.2. Paquete de post-it</u> .....	53
<u>4.4.3. Caja de cartón vacía</u> .....	55
<u>4.4.4. Caja con pelota</u> .....	56
<u>4.4.5. Varios elementos</u> .....	58
<u>4.5. Resumen del capítulo</u> .....	59
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>61</b>
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	61
<u>5.1. Medidas realizadas a la frecuencia de 100 GHz</u> .....	62
<u>5.1.1. Cubo verde</u> .....	62
<u>5.1.2. Paquete de post-it</u> .....	65
<u>5.1.3. Caja de cartón vacía</u> .....	67
<u>5.1.4. Caja con pelota</u> .....	71
<u>5.1.5. Varios elementos</u> .....	74
<u>5.2. Medidas realizadas a la frecuencia de 300 GHz</u> .....	77
<u>5.2.1. Cubo verde</u> .....	78
<u>5.2.2. Paquete de post-it</u> .....	80
<u>5.2.3. Caja de cartón vacía</u> .....	82
<u>5.2.4. Caja con pelota</u> .....	83

5.2.5. <i>Varios elementos</i> .....	86
5.3. <i>Resumen del capítulo</i> .....	87
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>89</b>
CONCLUSIONES.....	89
6.1. <i>¿Qué se ha realizado en este trabajo?</i> .....	89
6.2. <i>¿Qué resultados se obtienen?</i> .....	89
6.3. <i>¿Son los resultados esperados? ¿Qué aplicaciones podría tener la técnica usada en concreto?</i> .....	89
6.4. <i>¿Qué líneas de investigación pueden derivarse de este trabajo?</i> .....	90
6.5. <i>¿Se han alcanzado los objetivos? ¿Qué ha supuesto la realización de este trabajo?</i> .....	90
6.6. <i>Resumen del capítulo</i> .....	90
<b>Anexo A. Muestras y cortes de los mapas de potencia a 100 GHz</b> .....	<b>91</b>
A.1. <i>PDP del cubo verde</i> .....	91
A.2. <i>PDP del paquete post-it</i> .....	92
A.3. <i>PDP de la caja vacía</i> .....	93
A.4. <i>PDP de la caja con pelota</i> .....	94
<b>Anexo B. Muestras y cortes de los mapas de potencia a 300 GHz</b> .....	<b>97</b>
B.1. <i>Cubo verde</i> .....	97
B.2. <i>Paquete de post-it</i> .....	98
B.3. <i>Caja vacía</i> .....	98
B.4. <i>Caja con pelota</i> .....	99
<b>Anexo C. Ejemplo de análisis mediante la técnica de Beamforming</b> .....	<b>101</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>105</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>107</b>
<b>Índice de ecuaciones</b> .....	<b>109</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>111</b>

*«No hay que darse por vencidos jamás, no hay que darse por vencidos jamás,  
"nunca, nunca, nunca jamás", en nada, ni grande ni pequeño,  
importante o insignificante[...] No hay que darse por vencidos jamás,  
salvo ante las convicciones del honor y el sentido común»*

**WINSTON CHURCHILL**



# Capítulo 1

## *INTRODUCCIÓN*

Las radiaciones cuyas longitudes de onda se sitúan en el rango de los terahertzios (THz) o décimas de terahertzio (0.1-1 THz) han despertado interés en tiempos recientes entre los investigadores dedicados al campo de las comunicaciones. Al estar situadas entre la región infrarroja y la región de microondas del espectro electromagnético, dichas radiaciones pueden propagarse con facilidad a través de materiales no polarizados, tales como la ropa o las envolturas de paquetes. [1]

Esto las hace particularmente interesantes de estudiar para su aplicación en sistemas de detección de objetos o de medición remota, en el cual, mediante la emisión de un haz de ondas electromagnéticas enfocado hacia un objeto de interés, podemos ser capaces de obtener información del mismo, tal y como [2]:

- Dimensiones espaciales del mismo
- Intensidad del campo magnético a su alrededor
- Espectro del objeto (útil para mediciones de espectroscopia)

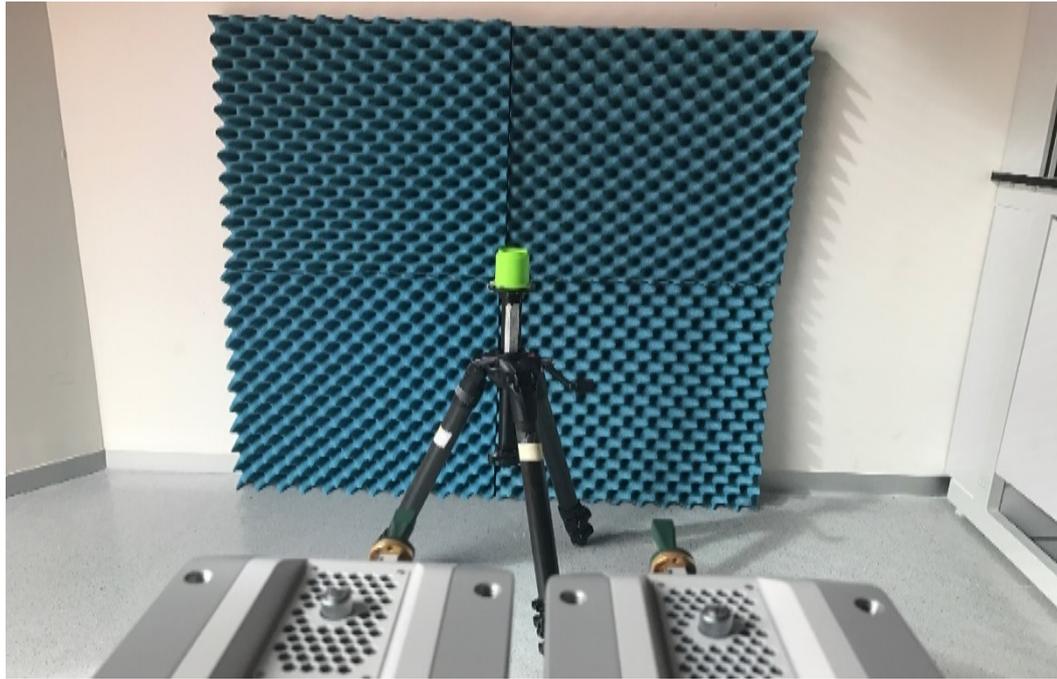
Las principales bandas de frecuencias objeto del estudio han sido las de 100 GHz y 300 GHz. Para ello, la UPCT ha realizado dos campañas de medidas mediante un analizador de redes vectorial de 67 GHz, al cual, al añadirsele convertidores de onda milimétricos, puede trabajar en un rango de frecuencias desde 50 hasta 500 GHz. [3] Dichos convertidores trabajan en un rango de 75 a 110 GHz para las medidas tomadas a 100 GHz, y en un rango de 220 a 330 GHz para las medidas tomadas a 300 GHz [4]

En el montaje desarrollado para la realización de estas medidas, se han utilizado dos cabezas a modo de radar biestático<sup>1</sup>, siendo utilizado una de ellos para transmitir el haz y la otra para recibir el haz reflejado, buscando obtener el parámetro de *scattering*  $S_{21}$ <sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Un radar biestático es un radar donde el transmisor y el receptor se encuentran separados entre sí. La distancia entre ellos es del orden de la distancia al objeto que se quiere detectar.

<sup>2</sup> Un parámetro de scattering es un parámetro complementario del comportamiento de una red eléctrica lineal cuando la sometemos a estímulos de régimen permanente en pequeña señal. Existen 4 diferentes. El  $S_{21}$ , en concreto, corresponde a la ganancia de la tensión en directa.



*Figura 1.1. Ejemplo de montaje empleado en este trabajo*

En la figura mostrada en la página anterior se puede observar una muestra del montaje realizado para la toma de las medidas, que se describirán más adelante. Los objetos empleados para el estudio han sido un cilindro de plástico, un taco de post-its, una caja de cartón vacía, la misma caja con una pelota de plástico en su interior y finalmente una serie de objetos de forma variada [4]. En este trabajo, solamente recogemos las medidas realizadas con los cuatro primeros objetos. Se puede deducir que todos los objetos son en teoría materiales opacos a la luz para comprobar la hipótesis de que el haz de ondas electromagnéticas pueda atravesarlos y mostrarlos de una manera lo más fidedigna posible, así como de comprobar si a dichas frecuencias es también posible detectar un objeto opaco escondido dentro de otro.

### *1.1. Objetivos*

El objetivo principal es la implementación de un algoritmo para la obtención de imágenes. Para ello, se ha realizado una campaña de medidas en interior y posteriormente, los resultados obtenidos se han analizado con un algoritmo desarrollado en MATLAB donde se obtiene la imagen espectral del objeto, comprobando si se ajusta a las dimensiones y forma esperados.

### *Medidas realizadas a 100 GHz*

- Realización de la campaña de medidas con array virtual simulando un radar biestático cuyos cabezales oscilan en un rango entre 75 y 110 GHz. Se miden 4 objetos y posteriormente, un grupo de objetos de diversas formas.
- Desarrollo de la formulación de los algoritmos MATLAB de obtención del PDP<sup>3</sup> y de Imaging para la evaluación de las medidas realizadas.
- Evaluación de las medidas y comparativa de resultados. Análisis de la calidad de la imagen obtenida y su ajuste al objeto medido.

### *Medidas realizadas a 300 GHz*

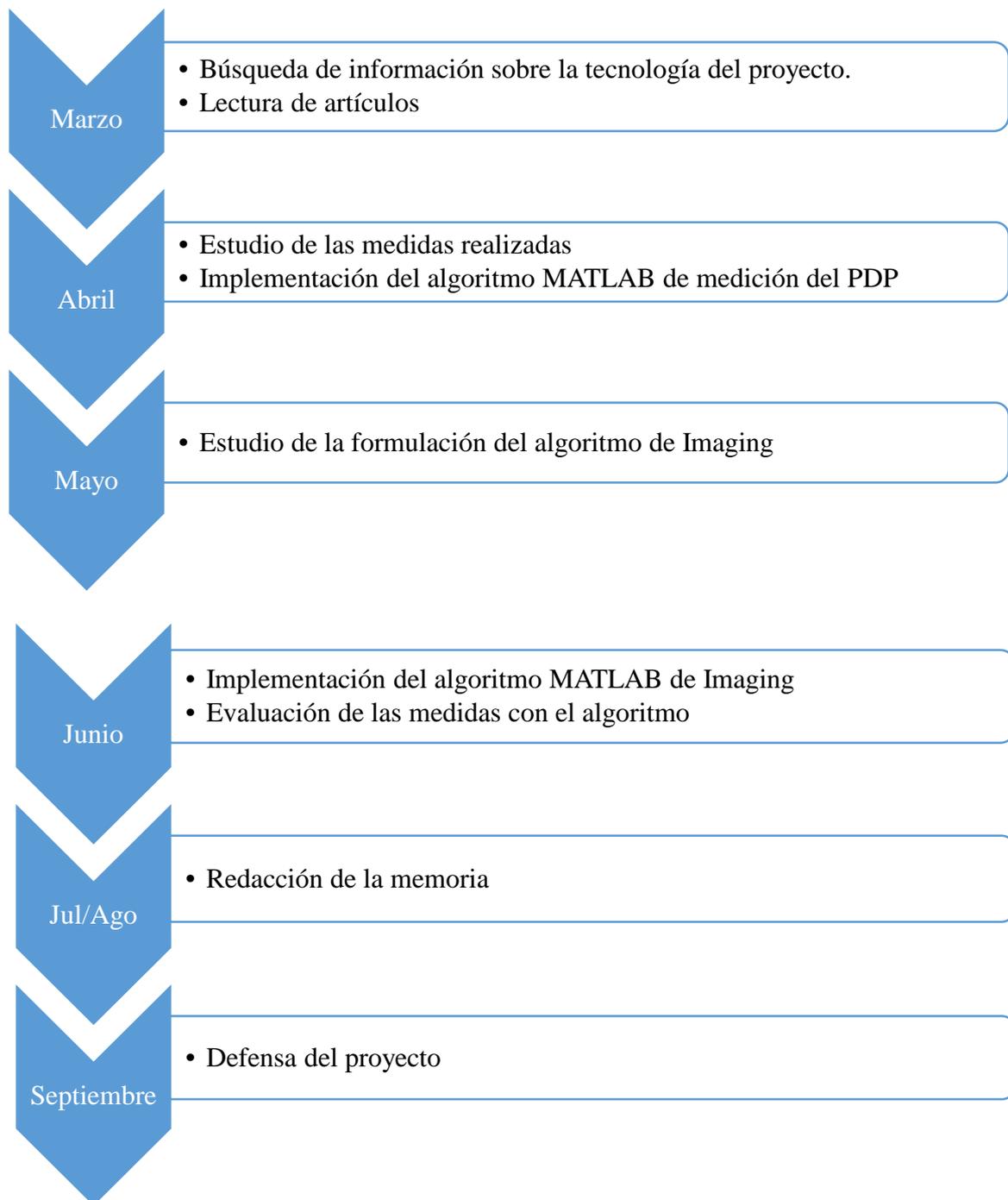
- Realización de la campaña de medidas con array virtual simulando un radar biestático cuyos cabezales oscilan en un rango entre 220 y 330 GHz. Se miden 4 objetos y posteriormente, el mismo grupo de objetos de formas diversas utilizado en el caso anterior.
- Desarrollo de la formulación de los algoritmos MATLAB de obtención del PDP y de Imaging para la evaluación de las medidas realizadas.
- Evaluación de las medidas y comparativa de resultados. Análisis de la calidad de la imagen obtenida y su ajuste al objeto medido.

## *1.2. Fases del proyecto*

El desarrollo temporal de este proyecto ha sido el que se detalla en la imagen inferior. Se ha buscado que cada una de las fases del mismo haya durado aproximadamente un mes, tiempo más que suficiente para poder completarlas sin ningún tipo de problema.

---

<sup>3</sup> Power Delay Profile (Perfil de retardo de potencia) En el capítulo 3 se explica con más detalle qué es y qué utilidad tiene en este trabajo.



*Figura 1.2. Esquema de las fases del proyecto*

El desarrollo del proyecto comenzó en el mes de marzo con la búsqueda y lectura de información de artículos varios relacionados con la tecnología y los objetivos a alcanzar en el proyecto.

Seguidamente, en el mes de abril, se procedió a estudiar las medidas tomadas con anterioridad (fueron realizadas en los meses de octubre y noviembre de 2016), y a repasar asignaturas y conceptos de la rama de Sistemas de Telecomunicaciones desconocidos por mí hasta la fecha (el autor hizo los estudios de la otra rama), tales como Comunicaciones Móviles y Radioenlaces, a fin de poder implementar el algoritmo para medir el PDP.

Mayo fue dedicado por entero al estudio y comprensión de la formulación del algoritmo de Imaging, para posteriormente, dedicar el mes de junio a su implementación y evaluación del mismo y de las medidas tomadas.

Por último, julio y agosto quedaron como tiempo para la redacción del proyecto, siendo el mismo objeto de defensa en el mes de septiembre.

La memoria en sí se divide en 6 capítulos: En el primero, llamado *Introducción*, se ponen de manifiesto los objetivos del proyecto, se resume el mismo y se especifican sus fases. Le sigue el capítulo *Imaging. Estado del Arte*, donde se hace un repaso de algunos de los sistemas que implementan esta técnica y sus últimas evoluciones, así como se describe la técnica utilizada en la implementación. Posteriormente, en *Metodología*, se describe la formulación matemática y los algoritmos desarrollados. El capítulo titulado *Campaña de medidas*, describe las medidas realizadas a los objetos utilizados para evaluar la efectividad de la técnica, mientras que en *Resultados y análisis* mostramos y comentamos las imágenes obtenidas. Por último, en *Conclusiones* se recogen las posibles aplicaciones de la técnica empleada y su posible repercusión

Se recoge, además, la bibliografía empleada, una tabla de imágenes y una tabla de ecuaciones, así como un índice de tablas. Se añaden, por último, previo a lo anterior, tres anexos: El anexo A, donde se recogen imágenes de los cortes de los mapas de potencia a 100 GHz, el anexo B, similar al anterior, pero con los cortes a 300 GHz y el anexo C, donde se muestran, a modo de contraejemplo, los resultados de un intento de análisis de las medidas mediante la técnica del beamforming.



# Capítulo 2

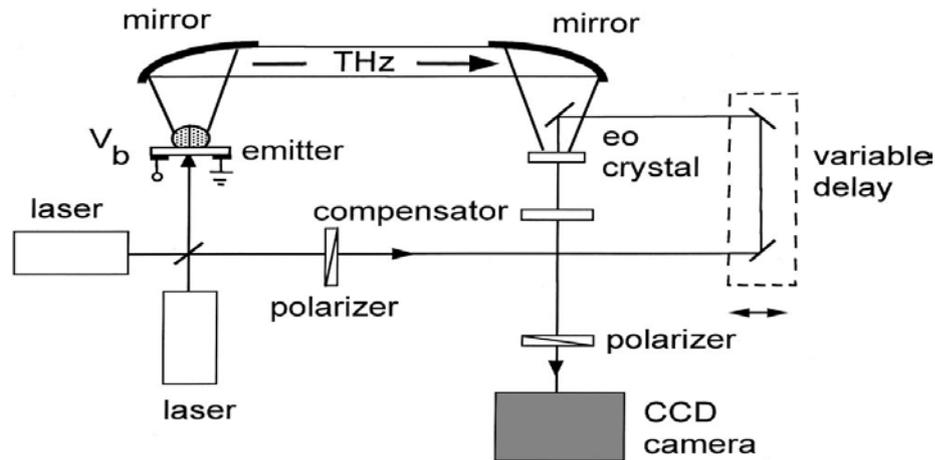
## *IMAGING. ESTADO DEL ARTE.*

Se considera radiación en frecuencias de terahertzio todas aquellas ondas electromagnéticas cuya frecuencia oscile en un rango de 0.1-0.3 a 10 THz.[5]. Nuestras frecuencias de trabajo están, pues, en el límite inferior de dicho rango. La tecnología con ondas de terahertzio ha sido la causante de progresos en el campo de la toma de imágenes desde que Hu y Nuss tomaran las primeras imágenes en 1995 [6], a lo que siguió el trabajo de Zhang [7], que a partir de los datos de Hu y Nuss consiguió iniciar un rápido desarrollo de la detección optoelectrónica a una tasa de vídeo lo suficientemente rápida como para considerar que se estaba ante el inicio del imaging.

¿Pero, qué es el imaging? Podemos definirlo como la toma de imágenes (ya sea en 2D o en 3D) utilizando un haz de ondas electromagnéticas. Dicho haz es reflejado por el objeto iluminado y mediante un procesado de la señal recibida, somos capaces de recrear la imagen de dicho objeto. El proceso descrito por los trabajos de Hu y Nuss para la obtención de imágenes con haces de ondas en frecuencias de Terahertzio es el siguiente [8]:

- Un láser ultrarrápido manejado por dispositivos optoelectrónicos genera un haz de ondas con frecuencia THz. Dichos dispositivos también deberán ser capaces de poder recibir y detectar la señal que se refleje.
- El haz se centra en un punto determinado del objeto del que queremos tomar la imagen. Dicho punto es muestreado como parte de la imagen utilizando técnicas de espectroscopia en el dominio temporal como función de la posición en el espacio del haz.
- Para cada píxel (o muestra) del objeto, se mide su onda generada en el dominio temporal, se realiza la transformada de Fourier para obtener su espectro, y dichos espectros se van integrando según el nivel que hayamos asignado a cada parte de la imagen.
- Las muestras son escaneadas por los dispositivos optoelectrónicos espacialmente y se obtienen los datos con los que es posible reconstruir la imagen.

La figura inferior ilustra el esquema del aparato experimental de Hu y Nuss para la obtención de sus imágenes:



*Figura 2.1. Esquema del aparato construido por Hu y Nuss en sus experimentos para la obtención de imágenes mediante la emisión de haces de ondas electromagnéticas. Los dispositivos optoelectrónicos eran cristales de telurito de cinc (ZnTe) [8]*

Actualmente se está incrementando continuamente el uso de esta técnica en nuestra sociedad. Los ejemplos más recientes incluyen: monitorización del medio ambiente, detección de objetos en paquetería, obtención de imágenes biomédicas, seguridad en aeropuertos... [8]. No obstante, dadas las características del proyecto, nos vamos a centrar en describir las técnicas de imaging que utilicen el rango de frecuencias que hemos utilizado nosotros, así como las que empleen los mismos dispositivos que hemos utilizado en la realización del mismo. Y para ello, hay que empezar hablando de los radares de apertura sintética.

### 2.1. Radares de apertura sintética

Un Radar de Apertura Sintética (SAR) es un radar de imaging montado sobre una plataforma en movimiento. De forma similar a los radares clásicos, las ondas electromagnéticas se transmiten de forma secuencial y los ecos recibidos son capturados por la antena del radar. La diferencia en este caso estriba en que el tiempo de transmisión/recepción se traslada a diferentes posiciones debido al movimiento. (Esto es, iluminamos un punto y debido al movimiento de la plataforma o vehículo donde está el radar, los ecos de ese punto se reciben en otra posición diferente) [9].

La combinación coherente de las señales recibidas permite la construcción de una apertura virtual de mucha mayor longitud que la del array de antenas existente. De ahí el nombre de “Apertura Sintética”. En la figura se ilustra un ejemplo de funcionamiento de este radar.

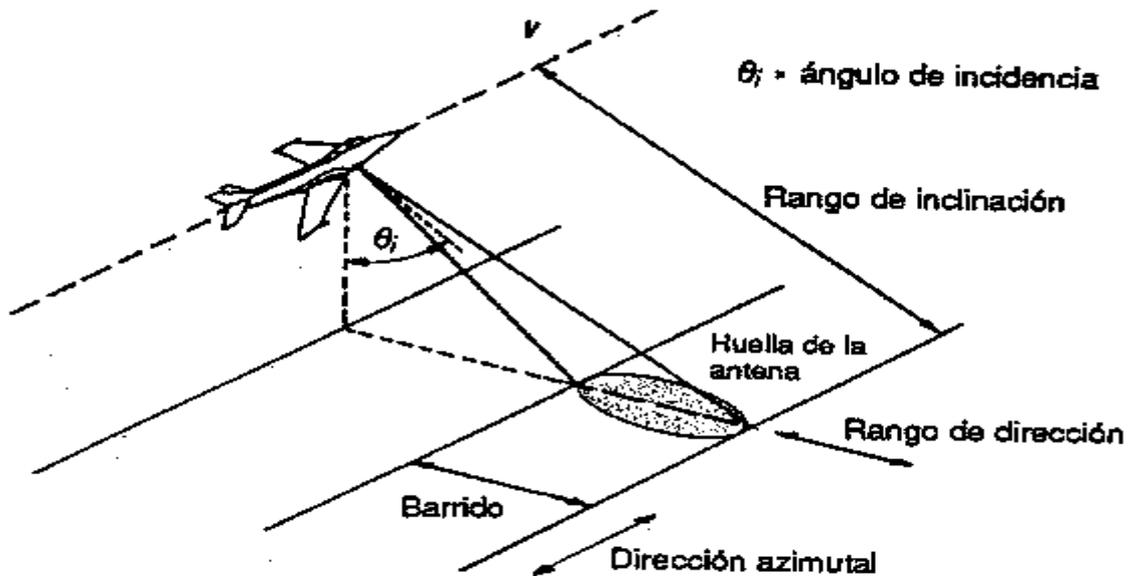


Figura 2.2. Esquema de funcionamiento de un radar de apertura sintética [9].

Los sensores de un SAR funcionan mediante el envío de pulsos modulados (*chirps*). Dichos pulsos mantienen una amplitud constante durante el período de emisión del mismo ( $\tau$ ), mientras que su frecuencia instantánea varía de forma lineal acorde a una tasa de chirp ( $k_r * t$ ), de donde se deduce que obtenemos un ancho de banda  $\mathbf{B} = k_r * \tau$ . A continuación, al tiempo de emisión le sucede el *tiempo de ventana de eco*, en el cual el radar “escucha” los ecos recibidos de los objetos iluminados y los almacena para su posterior reconstrucción. Todo este proceso es repetido cada PRI segundos, donde PRI son las siglas de *Pulse Repetition Interval* o *Período de Repetición de Pulso*, que a su vez es el recíproco de la *Frecuencia de Repetición de Pulso* o PRF [9].

En la figura superior, podemos ver la típica geometría que utiliza un SAR. La plataforma o vehículo que monta el SAR se mueve en dirección *azimutal* o *along-track* (esto es, a lo largo), mientras que la *huella de la antena* sigue la dirección perpendicular a la de movimiento. Por último, el *ancho del swath* representa la extensión en longitud del área que es iluminada por el haz emitido por la antena, y fundamentalmente su duración vendrá determinada por el tiempo que el radar esté encendido para la adquisición de datos.

En cualquier instante temporal, es posible conocer la distancia entre el radar móvil a velocidad constante y el punto que se está iluminando mediante la aplicación del teorema de Pitágoras:

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + (vt)^2} \approx r_0 + \frac{(vt)^2}{2r_0}, \text{ para todo } \frac{vt}{r_0} \leq 1 \quad (1)$$

Del ancho de banda B, podemos obtener entonces la resolución de la huella de la antena mediante la relación:

$$\delta_r = \frac{c}{2B} \quad (2)$$

En un radar de imaging como en el que es nuestro objeto de estudio, es necesario que la resolución del mismo tenga dos dimensiones. Vamos a hablar ahora, por tanto, de la resolución en azimuth  $\delta_a$ .

La resolución en azimuth viene dada por el tamaño de la apertura sintética, esto es, por la longitud del camino recorrido en la dirección azimutal mientras el radar está recibiendo los ecos del objeto que ha iluminado. El ancho de rayo de una antena  $d_a$  puede ser aproximado por la relación  $\theta_a = \frac{\lambda}{d_a}$ , mientras que la longitud de la apertura sintética la podemos obtener como  $L_{sa} = \theta_a * r_0 = \frac{\lambda r_0}{d_a}$ . De aquí podemos deducir entonces que una gran longitud de la apertura va a redundar en una mejor resolución en azimuth [9], que, combinando las expresiones anteriores, resulta:

$$\delta_a = \theta_{sa} * r_0 = r_0 * \frac{\lambda}{2 L_{sa}} = \frac{d_a}{2} \quad (3)$$

De lo cual se concluye que una antena de longitud pequeña da la mejor resolución posible en azimuth. Esto puede parecer contradictorio con lo que se afirma más arriba, pero se explica teniendo en cuenta que una antena de menor longitud es capaz de iluminar un punto durante más tiempo, lo que se traduce en tener una longitud de antena virtual mayor y una resolución más alta.

Hablaremos, por último, de cómo se procesa la imagen en un radar SAR. La señal recibida se puede considerar como una matriz bidimensional de muestras complejas, donde cada una consta de su parte real y su parte imaginaria. La primera dimensión corresponde a la dirección en rango y la segunda muestra a la dimensión en azimuth. Las muestras, una vez obtenidas, son procesadas digitalmente y almacenadas para su posterior reconstrucción como imagen. En la figura siguiente, se muestra un ejemplo del procesado de la señal recibida por el radar, utilizando para ello Transformadas de Fourier y productos complejos. [10]

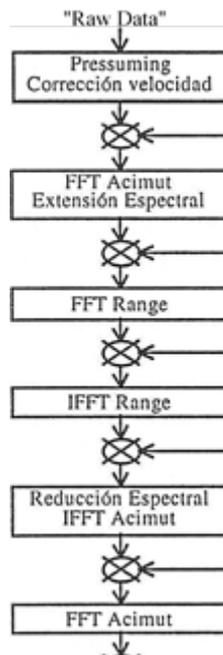


Figura 2.3. Esquema del procesado de las muestras obtenidas en un Radar SAR [10].

Se puede ver como primero existe sobre los datos crudos una compensación del movimiento y una corrección de velocidad, debida a las desviaciones que pueda sufrir el sistema montado (viento, irregularidades del terreno iluminado) [10]. Posteriormente, se efectúa la TF sobre la componente en azimuth, ensanchando su espectro. A continuación, se hace la TF y la TFI<sup>4</sup> sobre la resolución en rango, se reduce previamente con otra TFI el espectro de la componente en azimuth, se combinan y sobre esa combinación se hace otra TF que da la imagen reconstruida.[10]

## 2.2. Radar de apertura sintética con analizador de redes

Dado que en nuestro trabajo hemos empleado un analizador de redes, es interesante comentar los aspectos más relevantes de esta mejora del sistema, desarrollada por Burki y Arshad.[11]

Dicho analizador de redes es conectado mediante cables RF a las bocinas de las antenas, tanto transmisora como receptora. Para controlar la interfaz del analizador mediante el PC, la misma es conectada mediante un bus GPIB (Interfaz de Bus de Propósito General) y mediante cables Ethernet. Las bocinas a su vez se montan sobre un sistema de posicionamiento lineal que mide alrededor de 1.5 m de largo. El sistema en sí consiste de un carril con unos pedestales donde se

<sup>4</sup> Acrónimos de Transformada de Fourier y de Transformada de Fourier Inversa

sitúan las antenas y que a su vez se van desplazando por el mismo, junto con un material aislante entre el transmisor y el receptor para evitar el problema de aislamiento.<sup>5</sup>

Conforme se van desplazando por el carril, las antenas van adquiriendo los distintos cambios de fase que detectan en el objeto que iluminan (los cambios de fase son debidos a la iluminación desde diferentes posiciones). La antena transmisora, por último, se conecta al puerto 1 del analizador de redes y la receptora al puerto 2. [11]

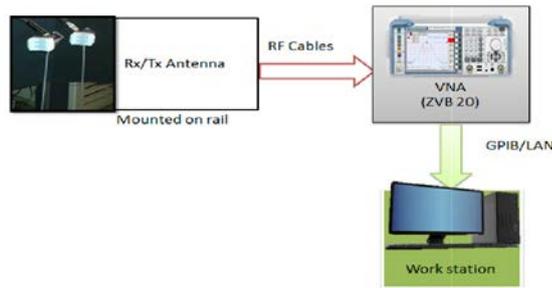


Figura 2.4. Diagrama de bloques de la conexión de un SAR a un analizador de redes

En este sistema, la matriz de scattering enlaza las ondas incidentes  $a_1$  y  $a_2$  con la salida de acuerdo a la siguiente relación matricial:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

En dicha ecuación matricial, los parámetros  $a_1$  y  $a_2$ , corresponden a las ondas de potencia incidente en el puerto 1 y en el puerto 2, respectivamente. Todo ello acorde a la red eléctrica ideal de dos puertos vista en la asignatura de Microondas. De modo análogo, los parámetros  $b_1$  y  $b_2$  corresponden a las ondas de potencia reflejada en el puerto correspondiente.

Los parámetros S son los parámetros de scattering (ya definidos en el capítulo 1, nota 2) y cada uno de ellos identifica:

- $S_{11}$ : Coeficiente de reflexión de la tensión en el puerto de entrada
- $S_{12}$ : Ganancia de la tensión en inversa
- $S_{21}$ : Ganancia de la tensión en directa
- $S_{22}$ : Coeficiente de reflexión de la tensión en el puerto de salida

<sup>5</sup> El aislamiento consiste en que parte de la onda transmitida se introduce en el receptor cuando están demasiado cerca el uno del otro. Puede evitarse con materiales aislantes, o en radares de aplicación real, introduciendo una separación suficiente entre transmisor y receptor.

Donde el coeficiente  $S_{21}$  es lo que va a medir nuestro analizador de redes y se define como la relación entre la salida  $b_2$  y la entrada  $a_1$ , pudiendo ser expresado como:

$$S_{21} = F_0(k_x(\omega, k_u), k_y(\omega, k_u)) = \frac{S(\omega, k_u)}{P(\omega)} \quad (5)$$

Para la captura de datos, el sistema mueve las antenas en la dirección across-track de forma que el radar pueda adquirir los datos en la dimensión de rango. Hecho esto, se desplaza a la siguiente posición y adquiere nuevamente la dimensión de rango de dicha posición. Esto se repite hasta que el sistema ha recorrido todo el carril. La geometría de la captura de datos se ilustra en la figura 2.5 [11].

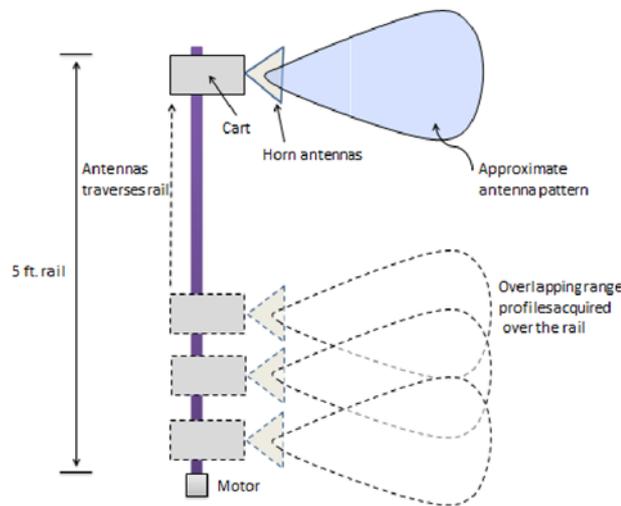


Figura 2.5. Esquema de adquisición de datos en el sistema SAR conectado a un analizador de redes [11]

En el capítulo 4 se podrá comprobar el verdadero montaje realizado para la toma de las medidas en la campaña realizada.

### 2.3. Imaging mediante la Transformada Dispersa de Fourier (SFT)

Pese a que las técnicas de imaging implementadas en la actualidad son capaces de obtener imágenes con gran precisión y fidelidad sobre el terreno iluminado, todavía presentan dos grandes inconvenientes:

- Son técnicas basadas en algoritmos que son muy complejos computacionalmente hablando y requieren un gran número de puntos a muestrear, lo que provoca un coste muy elevado en tiempo de procesado. (En nuestro algoritmo, el tiempo de procesado de

la imagen estudiada oscilaba entre 1 hora y 2 horas y media). El orden de complejidad es exponencial.

- El rendimiento de dichas técnicas en aplicaciones que necesiten un escaneo del terreno en tiempo real es muy pobre, lo que las hace prácticamente inútiles en ese sentido. Por otro lado, los algoritmos empleados tienen una sensibilidad muy alta al ruido.

Para solucionar estos inconvenientes, X. Yang y A. Petropulu [12] proponen un algoritmo basado en la dispersión de los objetivos a iluminar en la dirección de azimuth, a fin de reducir la cantidad de muestras utilizadas. El orden de complejidad de este algoritmo se reduce a tiempo logarítmico, siendo el número de muestras tomadas en la dirección de rango  $O(K \log_2 N_r)$  y en la dirección de azimuth  $O(K \log_2 N_a)$ , siendo  $K$  el orden de dispersión de los objetivos y  $N_r, N_a$  el número de muestras a tomar en cada dirección.

El algoritmo tradicionalmente usado utilizaba la Transformada Rápida de Fourier para implementar las compresiones en la dirección de rango y la dirección de azimuth. Esto hacía que los picos de la TF en cada dirección estuvieran relacionados con las frecuencias espaciales, de las cuales puede llegar a haber un gran número según el área que hayamos iluminado. Con el algoritmo Yang-Petropulu, sin embargo, si el número de muestras dispersas es más pequeño que el número de muestras a tomar en cada dirección, entonces solamente hemos de determinar un número muy pequeño de frecuencias espaciales. Esto requiere menor complejidad computacional que el uso de la FFT<sup>6</sup>, ya que la SFT únicamente va a actuar sobre esas muestras dispersas. En la figura 2.6 se muestra el esquema propuesto por los investigadores. [12]

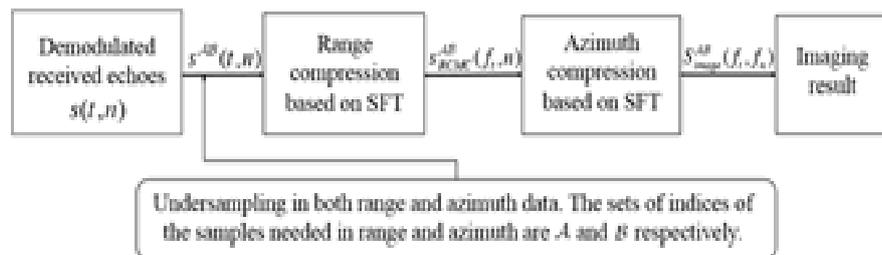


Figura 2.6. Esquema propuesto por Yang y Petropulu para la implementación de la SFT sobre algoritmos RD [12]

Como se puede observar en el esquema, la localización de las muestras necesarias en ambas direcciones puede calcularse *a priori* y ser enviada hacia el sensor del radar. Entonces, si se hace

<sup>6</sup> Acrónimos de Fast Fourier Transformade (Transformada Rápida de Fourier) y Spread Fourier Transformade (Transformada Dispersa de Fourier)

esto, es posible conseguir la reconstrucción de los datos antes de que se inicie el proceso de recepción de los ecos en la dirección de rango.

En cuanto al funcionamiento del algoritmo, el basado en SFT emplea un funcionamiento iterativo. En primer lugar, se identifican las frecuencias espaciales y se estiman sus coeficientes. Posteriormente, se reconstruye una aproximación de la señal que se compara con la señal que se quiere evaluar. Este proceso se repite para mejorar la estimación de la señal hasta que la señal reconstruida coincida o sea lo más parecida posible a la señal evaluada. [12]

En cuanto a la identificación de las frecuencias espaciales, SFT utiliza un sistema de puntos seleccionados de manera pseudo-aleatoria. Para la identificación de las muestras en la dirección de azimuth, se escoge de manera aleatoria un número impar en un rango que oscila desde 1 hasta N-1 muestras ( $\sigma^-$ ), y para la estimación de las mismas también se escoge de manera aleatoria un número desde 0 hasta N-1 muestras. Por tanto, las funciones de identificación y estimación se pueden escribir como:

$$\bar{I} = \cup_{k=0}^{K-1} (\bar{t} + \sigma^-(k-1) + I_0) \text{ mod } N \quad (6)$$

$$\hat{I} = \cup_{k=0}^{K-1} (\bar{t} + \sigma^-(k-1)) \text{ mod } N \quad (7)$$

Donde  $I_0$  corresponde a la frecuencia a la salida de cada filtro, y que es identificada mediante un proceso llamado *bit-testing*. La figura 2.7. muestra el esquema usado en el sistema de identificación.

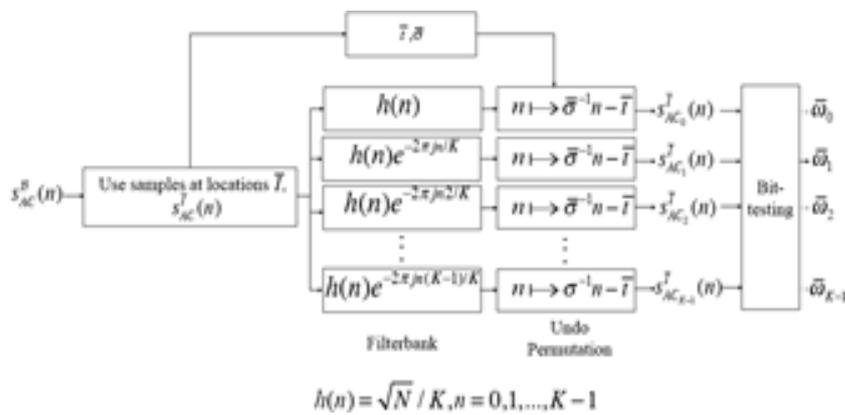


Figura 2.7. Esquema del sistema de identificación usado en el algoritmo Yang-Petropulu [12]

El funcionamiento de este sistema puede describirse del siguiente modo: Para identificar las frecuencias espaciales, las muestras que conforman la función de estimación (6), son filtradas por un banco de filtros cuya respuesta al impulso es la propia respuesta al impulso multiplicada por una exponencial. La señal obtenida por este filtrado deshace la permutación inicial, y

entonces, en un punto determinado, es posible calcular el valor de la señal como el producto de las muestras de la señal de entrada por el filtro. [12]

Los resultados obtenidos mediante el empleo de esta técnica demuestran que los puntos iluminados se observan bien definidos en las imágenes, en comparación al uso del algoritmo tradicional, el cual muestra los puntos más difuminados. (Figura 2.8) Por tanto, esta técnica puede ser utilizada en sistemas que necesiten precisión del terreno en tiempo real (Por ejemplo, posibles mapas GPS militares en zona de combate).

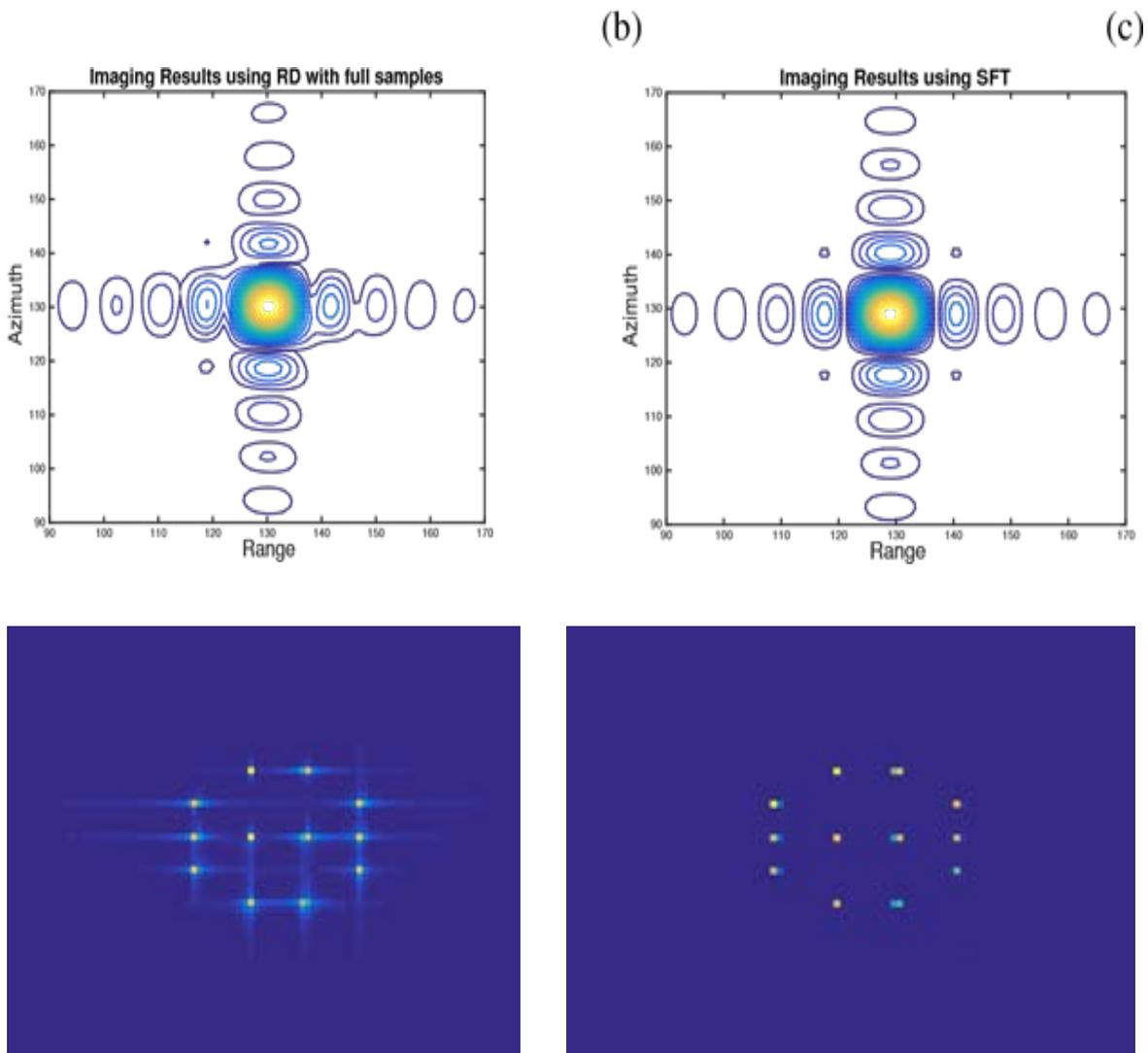


Figura 2.8. Comparativa de los resultados obtenidos utilizando la FFT y la SFT. Se puede observar como la imagen resulta más nítida y definida con el uso de la técnica SFT. [12]

## 2.4. Imaging en 3-D de alta resolución a 300 GHz con stand-off.

Hasta el momento, hemos descrito muy por encima qué es el imaging, en qué sistemas se emplean y una técnica mejorada. Pero todas esas técnicas se basan en radiaciones cuya frecuencia está por encima de las utilizadas para este trabajo, o en fase experimental. ¿Es realmente posible conseguir una buena resolución de imagen a una frecuencia que está en el límite inferior (300 GHz)?

Esto es lo que Grajal *et al.* [13] se plantearon. Para conseguir una buena resolución mediante el uso de ondas milimétricas, diseñaron un pequeño radar de apertura sintética mediante la técnica de detección por alejamiento (*standoff*).

La técnica de imaging mediante standoff surgió como respuesta a la necesidad de poder realizar inspecciones de equipajes y paquetes en lugares sensibles como aeropuertos, dado que las técnicas tradicionales de escaneo mediante rayos X pueden resultar perjudiciales a largo plazo al tratarse de radiaciones ionizantes. Dichas radiaciones pueden tener efectos adversos sobre la salud a largo plazo y, además, requieren que el objeto iluminado esté muy próximo a la fuente emisora, lo que incrementa la vulnerabilidad del sistema.

Con la técnica de stand-off, es posible detectar a una mayor distancia con una buena calidad de imagen objetos ocultos (armas, drogas...) sin exponerse a radiación peligrosa. El esquema del sistema radar empleado por Grajal *et al.* se muestra en la figura 2.9.

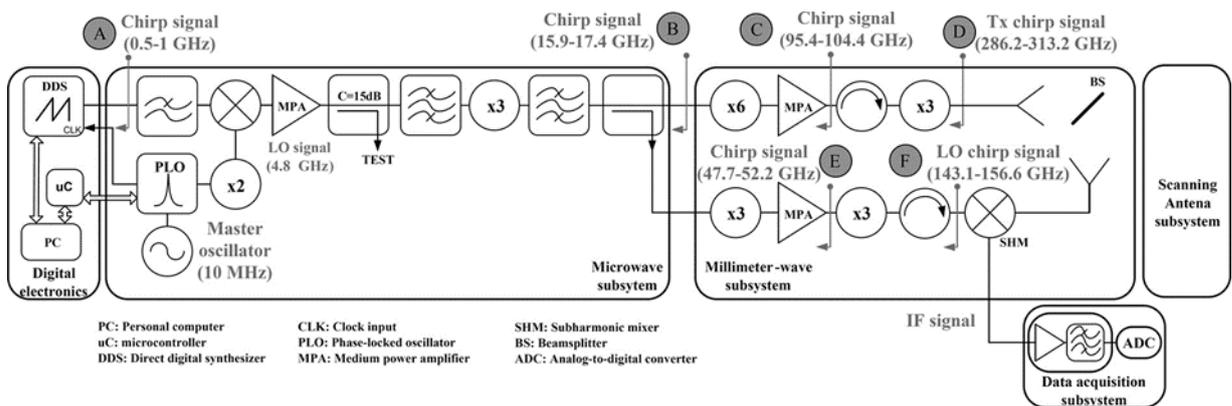


Figura 2.9. Esquema electrónico del radar empleado por Grajal para la implementación de la técnica de stand-off. Se puede apreciar que las señales chirps empleadas tienen una frecuencia de pocos gigahertzios en comparación a otros sistemas que hemos descrito en otros apartados [13]

En un radar de tan pequeño tamaño que implementa una frecuencia relativamente baja (y que tiene la dificultad de que es muy difícil de penetrar en la piel debido a la capacidad de absorción del agua sobre las frecuencias de ondas milimétricas), la imagen se forma de la siguiente manera [13]:

- La FFT del  $i$ -ésimo chirp se asocia con las coordenadas  $(x_i, y_i)$  del objetivo sobre el plano, el cual guarda relación con el patrón de escaneo.
- A cada FFT se le aplica un algoritmo de detección de picos, el cual ayuda a prevenir falsas alarmas.
- Dos juegos de puntos 3-D son construidos y utilizados para identificar la capa externa y la capa interna del objeto iluminado. La capa externa únicamente considera la primera detección de cada período de cada chirp, mientras que la capa interna se asocia a la última detección
- El punto espacial es comprimido en la dirección vertical de forma que pueda compensarse la diferencia en la granularidad de los puntos disponibles en la horizontal y la vertical, que son causadas por el patrón de escaneo
- Por último, se utiliza un algoritmo *alpha-hulls* para generar las superficies interna y externa del objeto iluminado basado en los juegos de puntos 3-D. Las superficies son usadas para identificar tanto los objetos visibles como los ocultos.

Los resultados obtenidos mediante el uso de esta técnica demuestran que los sistemas radar que la implementen tienen un gran potencial para ser usados como sistemas de detección fiables y seguros en instalaciones sensibles, aunque pueden adolecer de cierta falta de calidad de imagen (si bien es suficiente para el uso requerido, en el que no se busca tener una imagen diáfana).

### 2.5. Imaging con escaneo usando la técnica fan-beam

Continuando con el repaso a las técnicas de imaging con frecuencias en el límite de terahertzio existentes, otra técnica que posee un gran potencial es el uso de imaging utilizando el escaneo mediante haces de ondas en fan-beam (o en abanico).

Esta técnica, desarrollada por Gu *et al.* [14] se presenta en líneas generales como la obtención de la imagen del objeto escaneado aprovechando la estrechez del abanico en la componente horizontal y la anchura del mismo en la componente vertical. Un ejemplo gráfico del sistema empleado se puede encontrar en la figura 2.10.

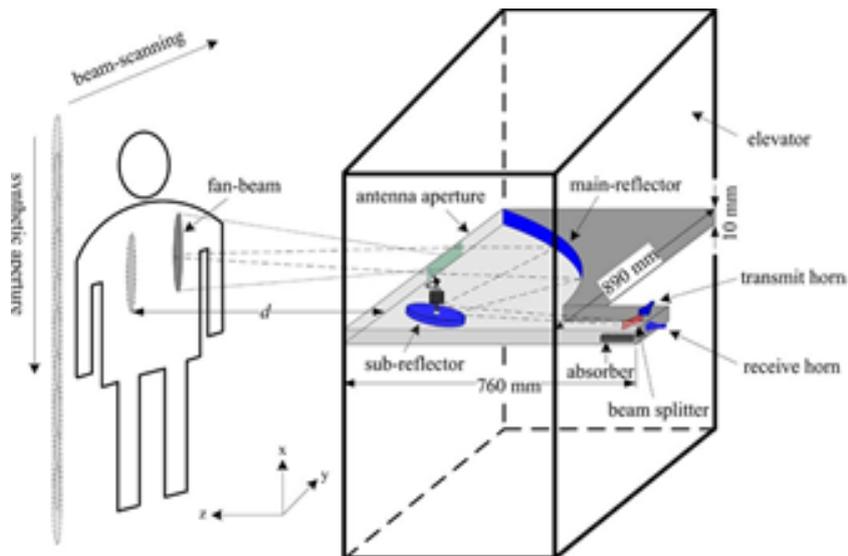


Figura 2.10. Descripción gráfica de la técnica de imaging mediante fan-beam a frecuencias límite desarrollada por Gu et al [14].

El sistema descrito emplea una antena emisora con apertura estrecha (similar a un pastillero) para lograr que el haz generado se emita en forma de abanico, de tal forma que el lado ancho permanezca colocado a lo largo de la dirección vertical y el lado estrecho, en la dirección horizontal. Esta disposición va a permitir que la imagen que se obtenga no sufra pérdida de calidad al sufrir el efecto de *no-uniformidad* que se hace presente en radares que iluminan el objeto utilizando un rayo que gira. [14]

La rápida rotación de un pequeño espejo reflector permite que el haz en abanico se mueva rápidamente en la dirección horizontal. Esto, combinado con el escaneo realizado en la dirección vertical mediante el movimiento posible por un motor, hace que sea posible obtener la amplitud y la fase de la señal retransmitida sobre una apertura larga en 2-d a fin de reconstruir la imagen del objeto iluminado. Si se quiere obtener una mayor resolución, puede conseguirse mediante la aplicación de técnicas de apertura sintética (en la vertical) o enfocando hacia al reflector principal (en la horizontal). [14]

También en el experimento desarrollado por Gu *et al.* se utilizó un analizador vectorial de redes a fin de poder simular un tranceptor heterodino a frecuencia de 200 GHz. El esquema se muestra en la figura 2.11.

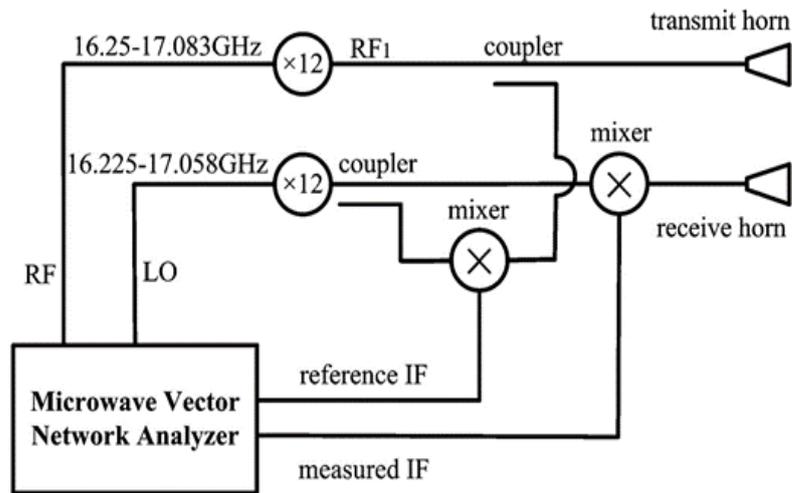


Figura 2.11. Esquema del transceptor heterodino de 200 GHz utilizado por el equipo de Gu [14]

Dicho transceptor utiliza un ancho de banda de 10 GHz donde la señal en banda  $K_u$  y el oscilador local que genera la onda continua son provistos por el analizador de redes. La señal de radiofrecuencia es multiplicada por 12 y convertida a la banda de 200 GHz. Tanto la señal RF como el oscilador local son separados por un ancho de banda de 25 MHz y divididos. Una de las partes se mezcla con la señal multiplicada y convertida para generar la frecuencia intermedia de referencia, mientras que la otra parte se mezcla con la señal recibida para formar la frecuencia intermedia que se mide. Ambas señales se demodulan en fase y cuadratura en el analizador y posteriormente son enviadas al PC para su tratamiento. [14]

En cuanto al algoritmo de imaging empleado en esta técnica, Gu propone dos, uno para imaging en 2-D y otro en 3-D. Para ello, considera la siguiente geometría (Figura 2.12)

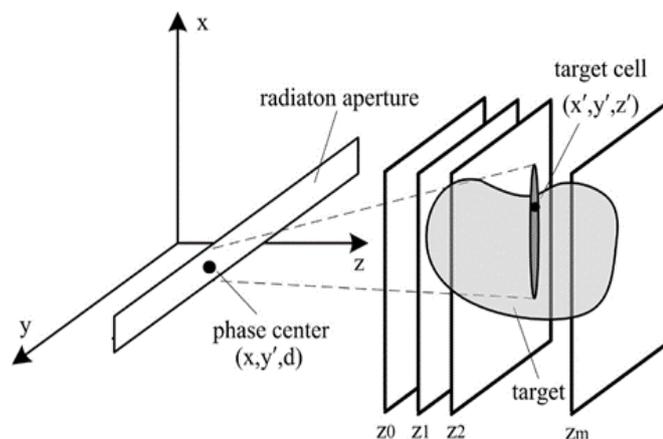


Figura 2.12. Geometría considerada por Gu para la técnica de imaging con fan-beam [14]

Se asume entonces que hay un objetivo situado en una posición  $(x', y', z')$  con una función de reflectividad  $(x', y')$  donde  $z'$  es un valor constante. Sabiendo que se radia una señal en frecuencia única de onda continua que se puede expresar como una exponencial  $e^{-j\omega t}$ , desde la apertura de la antena (donde  $\omega$  es la frecuencia de la portadora). Entonces, cuando el rayo en abanico está dirigido hacia la posición  $x'$ , es cuando se captura por la misma antena la señal reflejada por el objeto. La señal en banda base reflejada entonces se puede expresar como la integral de la función de reflectividad por la señal recibida (que está desplazada). Dicho desplazamiento se debe a que el objetivo está localizado en la región de campo lejano, de tal manera que la fase se encuentra centrada en  $(x', y', d)$  [14].

$$S(x, y') = \int f(x, y) e^{-j2k_0 \sqrt{(x-x')^2 + (z'-d)^2}} dx' \quad (8)$$

Siendo  $k_0$  el número de onda. Después, si efectuamos la transformada de Fourier 1-D mediante el método de la fase estacionaria sobre la variable  $x$ , se obtiene:

$$S(k_x, y') = \int f(x, y) e^{-j \sqrt{4k^2 - 4kx^2} (z'-d) - jkx x'} dx' \quad (9)$$

Donde  $k_x$  es la frecuencia espacial de la variable  $x$  y el ancho de banda soportado se puede expresar como:

$$\Delta k_x = 4k_0 \sin\left(\frac{\theta_x}{2}\right) \quad (10)$$

Siendo  $\theta_x$  el ancho del rayo en abanico disponible en la dirección  $x$  (ángulo de iluminación)

Utilizando la transformada de Fourier e introduciendo términos exponenciales para reconstruir la imagen, el algoritmo de imaging puede ser matemáticamente definido como:

$$f(x', y') = FT_{kx(1D)}^{-1} \{ FT_{kx(1D)}[S(x', y')] e^{-j \sqrt{4k^2 - 4kx^2} (z'-d)} \} \quad (11)$$

En 2-D la imagen reconstruida presenta el problema de que sólo funcionará si el objeto tiene un grosor muy pequeño, ya que sólo es posible reconstruirla bien si se centra el foco sobre el objeto. El algoritmo 3-D se expresa matemáticamente de forma similar al 2-D, con la diferencia de que utiliza además la Transformada de Fourier 2D y no presenta el problema de tener que centrar el foco en el objeto.

Los resultados obtenidos con esta técnica han demostrado ser muy positivos, ya que han podido detectar armas y objetos ocultos por un ser humano y si hablamos de 2-D consiguen reproducir

una imagen del objeto bastante clara, pero con el inconveniente de no ser capaz de perfilar los detalles y con una resolución algo más pobre que con la técnica de Grajal. (Es posible que influya la frecuencia utilizada, como después comprobaremos en el capítulo 5 en la presentación de nuestros resultados).

## 2.6. Imaging con modelado SAR mediante ondas milimétricas.

Para implementar el algoritmo principal de análisis, como se verá en el capítulo 3, se empleó una variante de la técnica de *Bi-Focusing* aplicada sobre un array de antenas, dado que era el modelo que más se ajustaba a la configuración de los equipos a la hora de efectuar las medidas. En este apartado, efectuamos una descripción general de la técnica de imaging con modelado SAR, y después se analizará de forma más concreta (en el capítulo siguiente), la formulación del algoritmo con la variante *Bi-Focusing*.

Según Hu, Karim *et al.* [15], la técnica de imaging con ondas milimétricas (en adelante, MMW) utiliza las frecuencias electromagnéticas en un rango de 30 a 300 GHz, por lo que resultan adecuadas para este trabajo. Adicionalmente, los descubrimientos recientes en la tecnología MMW, junto con la habilidad que tienen estas ondas de penetrar en materiales dieléctricos, las hacen especialmente útiles en aplicaciones de seguridad (escáneres corporales, p.ej).

Por norma fundamental, las aplicaciones MMW que se utilizan son activas, ya que se basan en que el objeto sea iluminado por un haz de pulsos, los refleje, y sean esas ondas reflejadas las que detecte el radar. Las aplicaciones pasivas se basan en detectar la radiación que el propio objeto pueda emitir, y no son objeto de estudio de este trabajo. Nuestro algoritmo pues, se basará en la utilización de una técnica activa.

En general, el modelado SAR mediante MMW puede escribirse como sigue [15]: Asumiendo que la antena de nuestro sistema SAR sólo puede moverse en las direcciones  $x$  e  $y$ , ilumina un punto cuyas coordenadas espaciales son  $(x,y,z)$ . La distancia entre la antena  $A_{ij}$  y el objeto  $T(x,y,z)$  podemos denotarla como  $d$ . Por consiguiente, el retardo de ida y vuelta entre la antena y el objeto se puede expresar como:

$$\tau(A_{ij}, T) = \frac{2d(A_{ij}, T)}{c} \quad (12)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz<sup>7</sup>. Esto es, como en todo radar, el retardo medido será lo que tarda en recorrer el camino de ida y el de vuelta dividido por la velocidad de la luz. La señal que la antena transmite la podemos denominar como  $s_{ij}(t)$ , por tanto, el eco recibido de dicha señal se puede transcribir como:

---

<sup>7</sup>  $3 \cdot 10^8$  m/s

$$r_{ij}(t) = \sigma_T S_{ij}(t - \tau(A_{ij}, T)) \quad (13)$$

donde  $\sigma_T$  es el coeficiente de reflexión del objetivo. Este eco recibido es a su vez procesado en el dominio del tiempo con un filtro previamente asignado, donde se elige el centro de la escena que se observa como el centro de referencia. La salida del filtro, que denotamos como  $g_{ij}(t)$ , se expresa matemáticamente como:

$$g_{ij}(\tau) = \sigma_T \int S_{ij}(t - \tau(A_{ij}, T)) S_{ij}^*(t) dt \quad (14)$$

O lo que es lo mismo, la integral del eco recibido por la señal transmitida conjugada. Esta integral, a su vez, representa función de autocorrelación de la señal transmitida y se puede escribir como  $R_{ij}(t)$ . Por último, aparte de asignar los filtros que procesarán cada eco, se puede también asignar la respuesta con todas las antenas que son capaces de recibir la señal del objetivo, para así poder mejorar la resolución angular. [15] Matemáticamente, esta respuesta se denota como:

$$\sigma_T = \sum_i \sum_j g_{ij}(\tau + \Delta\tau_{ij}) \quad (15)$$

siendo  $\Delta\tau_{ij}$  el retardo de la señal en recorrer el camino de ida y vuelta desde la antena al centro de referencia.

Mediante el uso de esta técnica, podemos obtener una mejor resolución angular que con las técnicas tradicionales, y, por consiguiente, una mejor relación señal a ruido de salida. En otras palabras, que es posible obtener una imagen con una resolución coherente en un entorno de baja potencia.

## 2.7. Resumen del capítulo

En este capítulo se ha abordado el estudio del arte sobre las técnicas de Imaging existentes que puedan ser más relevantes para nuestro proyecto, ya sea por las frecuencias utilizadas, el material empleado, o simplemente por el interés que pudieran presentar en un futuro desarrollo a nivel computacional (véase la SFT). Por otro lado, se describe también como funciona *grosso modo* la técnica de imaging. Se hace, además, especial hincapié en describir los radares de apertura sintética, dado que son la aplicación principal para las técnicas de Imaging y no es posible poder comprender el desarrollo de las mismas si no se sabe primero cómo funciona su principal aplicación.



# Capítulo 3

## METODOLOGÍA

Pasamos a continuación en el presente capítulo, a describir la metodología empleada para la realización del proyecto. En este trabajo, básicamente, lo que se ha hecho ha sido emplear dos algoritmos realizados mediante el lenguaje de programación MATLAB para el análisis de las medidas realizadas en los diversos objetos. En este capítulo, pues, nos centraremos en el análisis y explicación de dichos algoritmos.

### 3.1. Técnica de Imaging Bi-Focusing en banda estrecha. Formulación matemática [16]

Hablaremos en primer lugar, de la técnica de Bi-Focusing en banda estrecha, puesto que es la que contiene la formulación general matemática de la que después obtendremos la variante en banda ancha que hemos elegido para implementar los algoritmos. En esta variante, a la hora de reconstruir la imagen se debe de tener en cuenta la imagen centrada en el objeto tanto al emitir el haz, como al recibir el eco. Las dos imágenes se superponen en el analizador y se obtiene la imagen reconstruida.

La formulación analítica para esta técnica, según los trabajos de Kim, Jofre *et al.* [16], se describe bajo estas líneas tal y como sigue:

- En primer lugar, se obtiene una matriz de medidas  $N_n \times N_m$ , siendo  $N_m$  el número de antenas del array receptor, y  $N_n$  el número de antenas del array transmisor. Para ello, primero se efectúa un escaneo del objeto con el array receptor y posteriormente se repite el proceso con el array transmisor. En términos prácticos, esto implica que la longitud de la antena vertical debe ser mucho mayor que la dimensión transversal del área de enfocado.
- Aplicando el principio de compensación electromagnética, la iluminación mediante haces de ondas milimétricas de un objeto induce una distribución de corriente eléctrica superficial que denotamos como  $\mathbf{J}_{eq}(x_0, y_0, z_0)$ . Dicha distribución es que la obtiene la imagen electromagnética del objeto que se está iluminando, que posteriormente se reconstruye mediante su tratamiento por el algoritmo. Por regla general, esto se hace con un tratamiento numérico sobre la matriz de medidas.
- El campo incidente en un punto del objeto  $\mathbf{r}_i(x_i, y_i)$ , cuando nos centramos en el punto de enfocado del transmisor  $\mathbf{r}_{Tn}(x_{tn}, y_{tn})$  sobre el punto de reconstrucción  $\mathbf{r}_f(x_f, y_f)$  se puede expresar como:

$$E_i(x_i, y_i) = \sum_{n=1}^n I_{Tn}(x_f, y_f) \times H_0^{(2)}(k_e|r_{Tn} - r_i|) \quad (16)$$

- Donde  $H_0$  es la función de Hankel de orden 2 (su argumento es proporcional a la distancia de la fuente al punto de observación),  $k_e$  es el número de onda del material del objeto iluminado e  $I_{Tn}$  es el operador de centrado, que se expresa como la inversa del producto de la función de Henkel por la distancia al objeto.

$$I_{Tn}(x_f, y_f) = \frac{1}{H_0^{(2)}(k_e|r_{Tn}-r_i|)} \quad (17)$$

- El campo disperso medido en el punto de recepción  $\mathbf{r}_{rm}$  ( $x_{rm}, y_{rm}$ ) del objeto situado en  $\mathbf{r}_0(x_0, y_0)$  lo podemos expresar a su vez como:

$$E_s(x_{rm}, y_{rm}) = E_i(X_0, Y_0) \times I_{obj} \times H_0^{(2)} \times (k_e|r_{rm} - r_0|) \quad (18)$$

- Donde  $I_{obj}$  es una constante propia de cada material que contiene sus propiedades eléctricas macroscópicas.
- Cuando nuevamente nos centramos en el punto de enfocado en el campo recibido sobre dicho punto, la imagen electromagnética del mismo se puede expresar como:

$$E_f(X_f, Y_f) = \sum_{m=1}^{N_m} E_s(x_{rm}, y_{rm}) \times I_{Rm}(x_f, y_f) \quad (19)$$

- Donde el operador de centrado  $I_{Rm}(x_f, y_f)$  se puede expresar de la misma manera que su homólogo  $I_{Tn}$ , sólo que esta vez la distancia es la del punto reflejado a la del objeto:

$$I_{Rm}(x_f, y_f) = \frac{1}{H_0^{(2)}(k_e|r_{Rm}-r_f|)} \quad (20)$$

- Y finalmente, el proceso entero se puede resumir del siguiente modo: La imagen electromagnética reconstruida se expresa como el producto matricial del array de puntos de centrado del haz transmisor por la matriz de campo disperso para cada antena (tanto transmisora como receptora), y éste a su vez, multiplicado por el array de puntos de centrado del haz reflejado, tal como sigue en (21):

$$E_f(X_f, y_f) = [I_{T1} \quad \dots \quad I_{Tn}] \times \begin{bmatrix} E_{s,T1R1} & \dots & E_{s,T1Rm} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{s,TnR1} & \dots & E_{s,TnRm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{R1} \\ \vdots \\ I_{Rm} \end{bmatrix} \quad (21)$$

El uso de la técnica de bi-focusing permite, por tanto, alcanzar una resolución del orden de la longitud de onda en ambas direcciones (tanto transversal como longitudinalmente) en un medio dieléctrico. Esto supone una mejora bastante clara de la resolución con respecto a los sistemas mono-focusing.

### 3.2. Algoritmo MMW Bi-Focusing en banda ancha ISAR FQ (100 y 300 GHz)

A continuación, vamos a proceder a analizar el algoritmo de procesado. Las diferencias principales con la técnica descrita en el apartado anterior son dos: En primer lugar, la variante utilizada por Molina y Martínez Inglés [4] es en banda ancha, y, en segundo lugar, el entorno donde se aplica es esférico en vez de cilíndrico como en [16]. El algoritmo se ha realizado utilizando el lenguaje de programación de alto nivel MATLAB, debido a que tiene una gran versatilidad (cercana al lenguaje humano escrito) y permite emplear todo tipo de funciones matemáticas necesarias para el correcto funcionamiento del código. Asimismo, también permite ejecutar el programa y comprobar en tiempo real el correcto funcionamiento del mismo.

Previamente, describiremos la formulación matemática de esta variante, acorde a lo realizado por Molina y Martínez Inglés en [4]. La idea básica de este sistema es configurar una apertura sintética plana mediante la combinación de un sistema solidario de transmisión-recepción, en el cual se explora el escenario de medida mediante movimientos horizontales en el eje x y verticales en el eje y (ya sean del blanco o del propio sistema). Este sistema, por consiguiente, ilumina el escenario estando el blanco localizado a una cierta distancia según el eje z. Tiene la particularidad de que es a la vez biestático (ya que el transmisor y el receptor están separados), y al mismo tiempo se puede ver como monoestático, ya que la distancia entre ellos es siempre fija.

Acorde a [4], la formulación matemática empleada en esta variante es:

- Por el principio de compensación electromagnética [16], la iluminación de un elemento transmisor en un punto  $\vec{r}_{Ti}$  a una frecuencia  $f$  producida por un campo  $\vec{E}(\vec{r}, f; \vec{r}_{Ti})$  induce en el objeto iluminado una distribución de corriente proporcional al contraste eléctrico  $c(\vec{r})$ , que se puede expresar como:

$$\vec{J}_{eq}(\vec{r}, f; \vec{r}_{Ti}) = j\omega\epsilon_b c(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}, f; \vec{r}_{Ti}) \quad (22)$$

- De acuerdo con (22), la corriente inducida en cada punto del objeto va a depender para cada frecuencia tanto del valor del contraste eléctrico como del valor del campo iluminante del elemento transmisor. Dicha corriente podemos considerarla como la fuente del campo disperso producido por el objeto (traza del objeto original)
- El cabezal Tx-Rx se desplaza a través de un conjunto de posiciones  $(N_x, N_y)$  en los ejes x e y, recopilando una matriz bidimensional de medidas monoestáticas.
- El campo disperso creado por la corriente equivalente  $\vec{J}_{eq}(\vec{r}_t, f; \vec{r}_{Ti})$  en cada punto  $\vec{r}_t$  del blanco y medido para cada posición del receptor puede expresarse como:

$$\vec{E}_s(\vec{r}_{Rj}, f; \vec{r}_{Ti}) = -j\omega\mu_0 \int_{V_0} \vec{J}_{eq}(\vec{r}_t, f; \vec{r}_{Ti}) G(|\vec{r}_{Rj} - \vec{r}_t|, f) dV \quad (23)$$

- Donde G es la función de Green para la geometría correspondiente. En el caso de geometrías 3D como las que usaremos en las medidas, dicha función resulta:

$$G(r) = \frac{e^{-jk_b r}}{r} \quad (24), \text{ con } k_b = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_b}$$

- Utilizando la hipótesis de Born, el campo iluminante en el interior del blanco se puede aproximar como el campo incidente, y si se utilizan antenas de baja directividad que iluminen el blanco de forma uniforme, el campo disperso en cada punto de la antena receptora se puede expresar como:

$$\vec{E}_s(\vec{r}_{Rj}, f; \vec{r}_{Ti}) = -k_b^2(f) A_d \int_{V_0} c(\vec{r}, f) G(|\vec{r}_t - \vec{r}_{Ti}|, f) G(|\vec{r}_{Ri} - \vec{r}_t|, f) dV \quad (25)$$

- $A_d$  se considera una constante compleja que engloba los parámetros constantes de Tx y Rx. Por último, el proceso de reconstrucción de la imagen se basa en la técnica bi-focusing descrita en [16], extendiéndola al caso de frecuencias múltiples. Para ello, se expresa el factor de contraste promediado sobre el conjunto del margen frecuencial y sobre el espacio de reconstrucción como:

$$c(\vec{r}) = A_i \sum_{f_{min}}^{f_{max}} \sum_{i=1}^{N_{T-R}} \frac{\vec{E}_s(\vec{r}_{Rj}, f; \vec{r}_{Ti})}{k_b^2(f)} e^{jk_b(f)} (|\vec{r}_t - \vec{r}_{Ti}| + |\vec{r}_{Ri} - \vec{r}_t|) \quad (26)$$

- $A_i$  vuelve a ser otra constante compleja que tiene en cuenta los factores de la cadena Tx-Rx del sistema. La utilización de la FFT para la realización de los dos sumatorios de (26) permite una reducción muy significativa en el tiempo de cálculo.

Una vez realizada la formulación, procedemos a explicar el funcionamiento del algoritmo. Para ello, de forma previa definiremos de manera conceptual las variables y parámetros utilizados en el código mediante el siguiente esquema de variables:

- *Variables que delimitan el rango de frecuencia* → Son aquellas variables que establecen la frecuencia inicial y la frecuencia final del rango en el que estamos trabajando. Se denotan como *freq\_init* y *freq\_finl*.
- *Variables de posición* → Establecen parámetros tales como la posición del objeto en cada eje (*x\_ob*, *y\_ob*) o la posición inicial del área de enfocado (*x\_fc\_init*, *y\_fc\_init*)
- *Variables cuantificadoras* → Con estas variables se establecen los parámetros que toman el número de puntos a medir en el eje horizontal (*N\_ms\_x*), el número de puntos de frecuencia sobre el que se mide (*N\_fq*) y el número de puntos de enfocado en cada eje (*N\_fc\_x*, *N\_fc\_y*).
- *Variables de medida* → Permiten establecer la separación entre cada muestra (*d\_fq*), el paso del eje longitudinal (*d\_ms\_x*) o el paso del área de enfocado (*d\_fc\_x*, *d\_fc\_y*).

- *Variables de offset* → Establecen la separación entre las cabezas transmisora y receptora tanto en el eje x ( $x\_offs$ ) como en el campo enfocado en cada eje ( $x\_focused$ ,  $y\_focused$ )
- 1) Previamente, se carga un archivo de datos que contiene las medidas tomadas a cada objeto, en diversas posiciones y en diversos momentos distintos. Dependiendo de la frecuencia con la que trabajemos, por norma general para 100 GHz será '*medidas240\_xxxx*' y si es a 300 GHz, '*medidas150\_xxxx*'. Es importante hacer esta distinción, porque según sea una u otra, algunos parámetros deberán variar para que el código funcione correctamente.
  - 2) Del parámetro '*matrizH*' de ese archivo de medidas, obtenemos los puntos de frecuencia a medir (8192, por lo general). Para efectuar el procesado, tomamos los puntos de 5 en 5. Esto se hace así para reducir el tiempo de ejecución del programa, ya que en pruebas anteriores podía llegar a tardar alrededor de 12 horas en los casos en los que trabajamos a 300 GHz. Tomar 1 de cada 5 puntos es suficiente para obtener la imagen de forma adecuada sin que afecte a la calidad de la misma al reducir el tiempo de procesado.
  - 3) Las frecuencias inicial y final, para el caso de 100 GHz, estarán en un rango de 75 a 110 GHz, y para el caso de 300 GHz, entre 220-330 GHz. Esto se verá con más detalle en el capítulo relativo a la campaña de medidas. Del array de puntos de frecuencia  $E\_sc$  obtenemos la variable donde se guardan los puntos de frecuencia, como un array bidimensional de 1 fila y 1639 columnas.  $D\_fq$ , por último, es la distancia entre cada punto y se obtiene de dividir la diferencia entre las frecuencias por el número de puntos. En este caso, cada punto está separado unos 27.5 MHz.
  - 4) Las posiciones de los objetos, sobre todo en la posición y van a venir dadas por el punto donde el PDP sea mayor (se verá más adelante cómo se obtiene este punto). En 100 GHz no tiene excesiva importancia, pero en 300 GHz es vital para poder obtener la mejor resolución de la imagen. El parámetro  $N\_ms\_x$  contiene el número de puntos de medida y será 151 o 241 según el archivo de medidas haya sido obtenido trabajando a 300 o a 100 GHz, (más adelante, en el capítulo 4, se verá porque estos valores son fijos) mientras que el parámetro  $d\_ms\_x$  contiene el paso de medida entre cada punto a lo largo del eje  $x$ . El valor del mismo se obtiene dividiendo la longitud de la medida horizontal (21.1 cm si 100 GHz, 24.5 cm si 300 GHz)<sup>8</sup> entre el número de puntos de medida. Es de suma importancia configurar bien este parámetro o la imagen nos saldrá distorsionada.
  - 5) Los puntos de medida iniciales  $x$  e  $y$  se obtienen cogiendo la mitad menos 1 de los puntos de medida y multiplicándolos por la diferencia del paso de área menos el offset partido por 2 (para  $x$ ). Para  $y$ , basta con multiplicar por el paso de área de enfocado. Los parámetros  $N\_fc\_zzz$  y  $d\_fc\_zzz$  contienen el número de puntos de enfocado y el paso de área entre los mismos (Para 100 GHz, 256 y 0.001 m. Para 300 GHz, el número de puntos se multiplica por 2 y el paso de área se reduce a la mitad [512, 0.0005 m]). Esto se hace

---

<sup>8</sup> En el capítulo 4 veremos el porqué de estos valores al realizar el resumen de la campaña de medidas

para mantener el área de enfocado constante y poder enfocar bien el objeto, ya que  $d_{fc\_zzz}$  se obtiene dividiendo la longitud de onda de la frecuencia entre 2.

- 6) Con la posición inicial de enfocado, el número de puntos de enfocado y el paso de área, se obtiene la distancia de offset necesaria entre el array transmisor y el array receptor.
- 7) Para el cálculo del campo centrado, se va partiendo de una posición inicial que asumimos como centro de coordenadas. Los puntos de enfocado se van barriendo en cada eje según el valor del paso de área y se almacenan en una matriz bidimensional. Después, para cada muestra de frecuencia tomada al principio de la ejecución del algoritmo, se calculan su frecuencia y su número de onda. Por último, para cada punto de medida en cada muestra de frecuencia, se obtiene la distancia al objeto operando con la raíz cuadrada de la diferencia de los puntos de medida con los puntos de enfocado de la matriz bidimensional, y se obtiene el valor del campo eléctrico en cada punto mediante la suma del valor original del campo con el campo para cada muestra. Al ser el entorno en el que estamos trabajando esférico, aquí se produce la gran diferencia con la técnica vista en [16]. Donde ellos utilizaban las funciones de Hankel para calcular el campo disperso (al ser su entorno cilíndrico), aquí lo que hacemos es multiplicar cada muestra por una exponencial en frecuencia (las retardamos en el dominio temporal)
- 8) El resto del código se utiliza para representar gráficamente en MATLAB los resultados obtenidos.

### 3.3. Algoritmo auxiliar para el cálculo del PDP

El perfil de retardo de potencia o PDP [17] calcula la distribución de la potencia de señal recibida sobre un canal multicamino como función de los retardos de propagación. Se obtiene como la media espacial de la respuesta al impulso de las señales complejas en banda base, mediante la siguiente expresión:

$$p(\tau) = R_{hh}(0, \tau) = E[|h(t, \tau)|^2] \quad (27)$$

Y, ¿qué nos puede aportar el PDP en este trabajo? Pues básicamente, lo que hace es indicarnos como llega la energía de cada muestra en función del retardo que le hayamos aplicado. Gracias a ello, podemos hacernos una idea de la representación del objeto que estamos iluminando, aunque no podremos enfocarlo debido a la apertura del haz. (Cosa que sí podemos hacer con el algoritmo visto en el apartado anterior). A tal fin, y utilizando los conocimientos obtenidos en la asignatura de Comunicaciones Móviles, se ha desarrollado utilizando MATLAB el siguiente algoritmo auxiliar que permite obtener el mapa de potencia del objeto iluminado, y de ahí, obtener datos tan valiosos como la posición o la potencia que es capaz de reflejar el objeto.

En este caso, el algoritmo es muy sencillo. Las únicas variables necesarias son el ancho de banda (que puede obtenerse con la simple diferencia entre la frecuencia inicial y la final de cada rango) y el número de puntos de frecuencia. Con estas dos variables, obtener el parámetro  $\tau$  resulta trivial (Simplemente obtener un array donde cada muestra esté separada el ancho de banda entre cada una) y en cuanto al parámetro  $d$ , otro array donde cada punto de medida esté separado la distancia en centímetros indicada en los epígrafes anteriores. Una vez obtenidos esos dos parámetros, calcular el PDP es simplemente traducir a lenguaje MATLAB la expresión (27).

El funcionamiento del algoritmo se resume a continuación:

- 1) Se carga el archivo .mat que contiene las medidas que vamos a evaluar. Dependiendo de la frecuencia con la que estemos trabajando (100 o 300 GHz), tendremos que modificar el parámetro BW que nos indica el ancho de banda. Sabemos por el algoritmo anterior que dicho ancho de banda será la diferencia entre 75 y 110 GHz (si la frecuencia de trabajo es 100 GHz) o entre 220 y 330 GHz (si la frecuencia de trabajo es 300 GHz).
- 2) Posteriormente se toman todas las muestras de frecuencia que contiene el archivo evaluado y se almacenan en la variable N. A continuación, se obtiene la variable  $\tau$  como un vector donde las muestras están separadas  $\frac{(N-1)}{BW}$ , desde la primera muestra hasta la última.
- 3) Mediante la transformada inversa de Fourier sobre la matrizH del archivo evaluado se saca la función h, a la que posteriormente se le aplica una selección mediante valor absoluto al cuadrado de las muestras necesarias. Por último se calcula el vector distancia como un vector donde los puntos de medida están separados la distancia de la medida horizontal.
- 4) Se obtiene la respuesta en frecuencia pasando a decibelios los valores existentes en la matrizH. Posteriormente, se representa de manera gráfica las muestras positivas, quedando dibujado un mapa donde el color amarillo representa la máxima potencia existente, y que, por consiguiente, nos permite detectar el objeto.

### 3.4. Resumen del capítulo

En este capítulo, se ha presentado la técnica de imaging bi-focusing para ondas milimétricas (a frecuencia del orden de GHz) y se ha procedido a presentar los algoritmos empleados para el análisis de las medidas. Asimismo, se ha explicado el funcionamiento de ambos algoritmos.



# Capítulo 4

## *CAMPAÑA DE MEDIDAS*

En el presente capítulo cuarto, se va a proceder a realizar la descripción de los montajes y del procedimiento seguido a la hora de realizar las campañas de medidas que fueron, posteriormente, objeto de este estudio.<sup>9</sup>

El principal instrumento a la hora de realizar esta campaña ha sido un analizador de redes vectorial comercial (R&S ZVA 67), así como unas cabezas extensoras de frecuencia que trabajan en los rangos descritos en capítulos anteriores (75-110 GHz y 220-330 GHz) [4]. La figura inferior muestra cómo son estos instrumentos.



*Figura 4.1. Muestra del analizador de redes empleado en la toma de las medidas. Se trata de un analizador Rohde&Schwarz, que puede trabajar con frecuencias de hasta 67 GHz. [18]*

---

<sup>9</sup> El autor no estuvo presente en la toma de dichas medidas, dado que no era labor principal en su investigación. Sin embargo, es conveniente describirlas para mayor comprensión del trabajo realizado. A tal fin, nos basamos en las obras citadas [3] y [4].



*Figura 4.2. Muestra de cabeza extensora de frecuencia R&S ZC330. Utilizada para permitir trabajar con ondas de frecuencia hasta 330 GHz. [18]*

Como fue descrito en el capítulo 2 al hablar sobre el estado del arte, el funcionamiento del analizador de redes es el siguiente [3]:

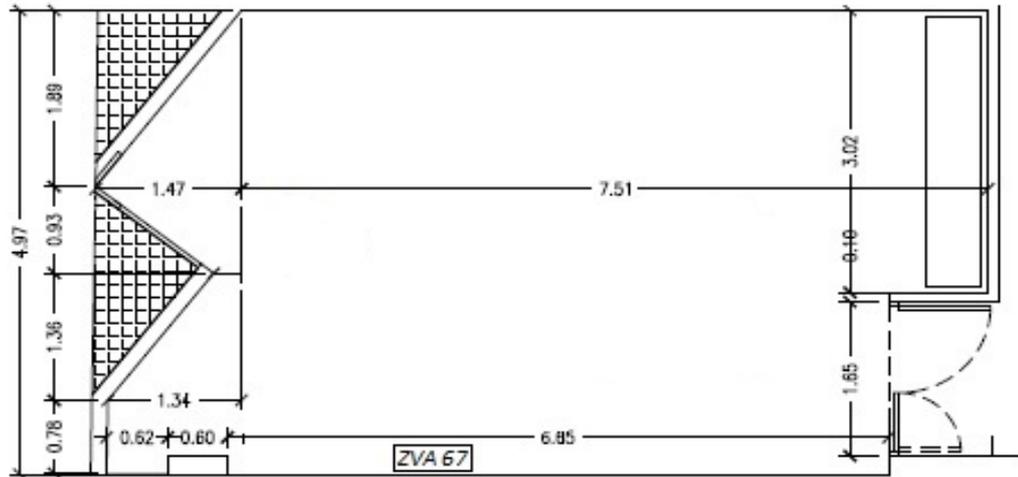
- Para cada frecuencia, el equipo de test de parámetros S transmite un impulso conocido a través de un puerto y mide la señal recibida por otro.
- Lo que resulta en la medición del coeficiente de transmisión  $S_{21}$  en el dominio de la frecuencia, al que posteriormente, mediante la aplicación de la Transformada Inversa de Fourier discreta, se pasa al dominio temporal, a fin de obtener los resultados deseados.

La principal ventaja de esta técnica consiste en que se obtiene la información de la amplitud y de la fase de la onda a medir, a la vez que se logra abarcar un gran rango dinámico. Pero a su vez, incurre en dos importantes limitaciones. Una de ellas es que la calibración del dispositivo ha de ser sumamente cuidadosa, y el transmisor y el receptor deben estar perfectamente sincronizados y a una distancia pequeña. La otra limitación es que las medidas no son instantáneas. El canal puede haber sufrido variaciones importantes mientras el sistema procesa las medidas, lo que puede dar lugar a grandes diferencias entre una medida y otra. Por consiguiente, es necesario, efectuar un barrido temporal mucho más rápido que el espacial, pero esto supone un empeoramiento de la resolución. También es de suma importancia que el canal permanezca estático durante el tiempo en el que se están tomando las medidas.[3]

Pero dado que estamos trabajando en interiores (dentro del laboratorio) estas desventajas desaparecen, ya que el canal es de variación lenta, permaneciendo estático a efectos prácticos y la distancia entre el transmisor y el receptor es lo suficientemente pequeña como para no afectar a las medidas.

#### 4.1. Descripción del campo de trabajo [3]

Según Albaladejo [3], el laboratorio donde se ha realizado el trabajo de medición es muy similar al que aparece en la figura 4.3



*Figura 4.3. Representación esquemática del laboratorio donde se realizaron las medidas. [3]*

Este laboratorio se ubica en la 1ª planta del edificio ELDI, perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena. La campaña de medidas se ha realizado utilizando un pequeño rincón del mismo cercano a una ventana y apuntando hacia una pared recubierta por un material absorbente electromagnético de color azul, a fin de minimizar las reflexiones y la energía electromagnética reflejada en la pared. Por tal motivo, no ha sido necesario cerrar puertas ni tocar nada del mobiliario, ya al realizarse las medidas en el dominio del tiempo, lo que hacemos es quedarnos con la energía que llega en un momento dado y obviar el resto.

La figura 4.4 ilustra este hecho.



*Figura 4.4. Localización de los equipos de medidas dentro del laboratorio.*

#### 4.2. Esquema de las medidas [4]

Según el artículo de Molina García-Pardo y Martínez Inglés [4], las medidas se han desarrollado acorde a la siguiente configuración: El objeto sobre el que se realiza la medición es colocado sobre un trípode de carbono, colocado a una distancia de un metro del equipo. Las cabezas, a su vez, están separadas una distancia de 11.2 cm (la propia existente entre ellas por defecto, aunque es posible separarlas hasta 14 cm). Dichas cabezas se montan posteriormente sobre un soporte cuyo movimiento es solidario respecto a un posicionador lineal o carril, tal como se explica en el capítulo 2. La figura 4.5 ilustra el montaje real efectuado.



*Figura 4.5. Montaje real de los equipos de medidas, acorde al esquema presentado en el capítulo 2.*

### 4.3. Configuraciones de las medidas [4]

Las mediciones se realizaron mediante barridos de las bandas de frecuencias de 75 a 110 GHz y de 220 a 330 GHz, utilizando dos cabezas extensoras diferentes. Para la primera banda, se utilizó el modelo R&S ZVA-Z110 E Converter, W-Band WR-10, y para la segunda banda, se utilizó el modelo R&S ZVA-Z325 Converter, J-Band WR-03. Ambos modelos son similares al mostrado en la figura 4.2. [18]

En las siguientes tablas se muestran los valores de configuración del analizador de redes para cada una de las frecuencias de estudio. Para 100 GHz, los valores son:

<i><b>Parámetro</b></i>	<i><b>Valor</b></i>
<i><u>Frecuencia inicial</u></i>	75 GHz
<i><u>Frecuencia final</u></i>	110 GHz
<i><u>Número de puntos</u></i>	8192
<i><u>Ancho de banda filtro de frecuencia intermedia</u></i>	1 kHz
<i><u>Potencia de salida</u></i>	0 dBm
<i><u>Pasos</u></i>	240
<i><u>Grados por paso</u></i>	8

*Tabla 1. Configuración del analizador de redes para trabajar con la frecuencia de 100 GHz.*

Mientras que, para la frecuencia de 300 GHz, los valores a utilizar aparecen en la tabla inferior, y son los siguientes:

<i><b>Parámetro</b></i>	<i><b>Valor</b></i>
<i><u>Frecuencia inicial</u></i>	220 GHz
<i><u>Frecuencia final</u></i>	330 GHz
<i><u>Número de puntos</u></i>	8192
<i><u>Ancho de banda filtro de frecuencia intermedia</u></i>	30 Hz
<i><u>Potencia de salida</u></i>	0 dBm

<u>Pasos</u>	En función del objeto medido
<u>Grados/paso</u>	En función del objeto medido

Tabla 2. Configuración del analizador para trabajar con frecuencias de la banda de 300 GHz.

En un documento que resume la campaña de medidas [19], Molina efectúa la observación de que la tensión provocada por el peso y los cables de los convertidores hace imposible determinar un paso fijo en milímetros, ya que la longitud horizontal recorrida será menor que la distancia para los mismos parámetros a 100 GHz. De ahí que, a 300 GHz, el paso y los grados que se deben tomar dependan del objeto que estemos midiendo en ese momento.

En cuanto a las bocinas transmisoras y receptoras que se han usado, para trabajar con la frecuencia de 100 GHz se han empleado bocinas comerciales Flann Microwave [20], modelo 27240-20, con los siguientes parámetros:

<b><i>Parámetro</i></b>	<b><i>Valores</i></b>	
<u>Rango de frecuencias</u>	73.8-112 GHz	
<u>Ganancia</u>	18.12 dBi	21.41 dBi
<u>Ancho de haz plano E</u>	22.9°	15.1°
<u>Ancho de haz plano H</u>	22.3°	14.7°

Tabla 3. Parámetros de las bocinas transmisora y receptora a 100 GHz.

Para la frecuencia de 300 GHz se utilizó el modelo 32240-25, de la misma compañía y que cuenta con los siguientes parámetros:

<b><i>Parámetros</i></b>	<b><i>Valores</i></b>	
<u>Rango de frecuencias</u>	217-330 GHz	
<u>Ganancia</u>	23.70 dBi	26.99 dBi

<u>Ancho de haz plano E</u>	11.9°	7.8°
<u>Ancho de haz plano H</u>	11.9°	7.8°

*Tabla 4. Parámetros de las bocinas transmisora y receptora a 300 GHz.*

La figura 4.6 ilustra un ejemplo de una de las bocinas utilizadas:



*Figura 4.6. Bocina transmisora y receptora utilizada en el montaje de la campaña de medidas. Se puede apreciar su conexión a las cabezas extensoras de frecuencia, y el pequeño tamaño de las mismas en comparación. El modelo aquí visible es el 32240-25, usado para las medidas a 300 GHz [4]*

#### 4.4. Objetos a medir

Los objetos que actúan como blancos a identificar son cuatro: Un cilindro verde, un paquete de post-it cúbico, una caja de cartón vacía, y la misma caja con una pelota esférica dentro. Se realizaron aparte otras mediciones con varios elementos de formas diversas, que se mostrarán más adelante.

Para cada objeto, se recorre una distancia  $d$  y el número de posiciones (240/150) según la frecuencia a la que estemos trabajando. En las medidas con varios elementos este número se eleva a 1715 (para 100 GHz) y 3515 (para 300 GHz)

##### 4.4.1. Cubo verde

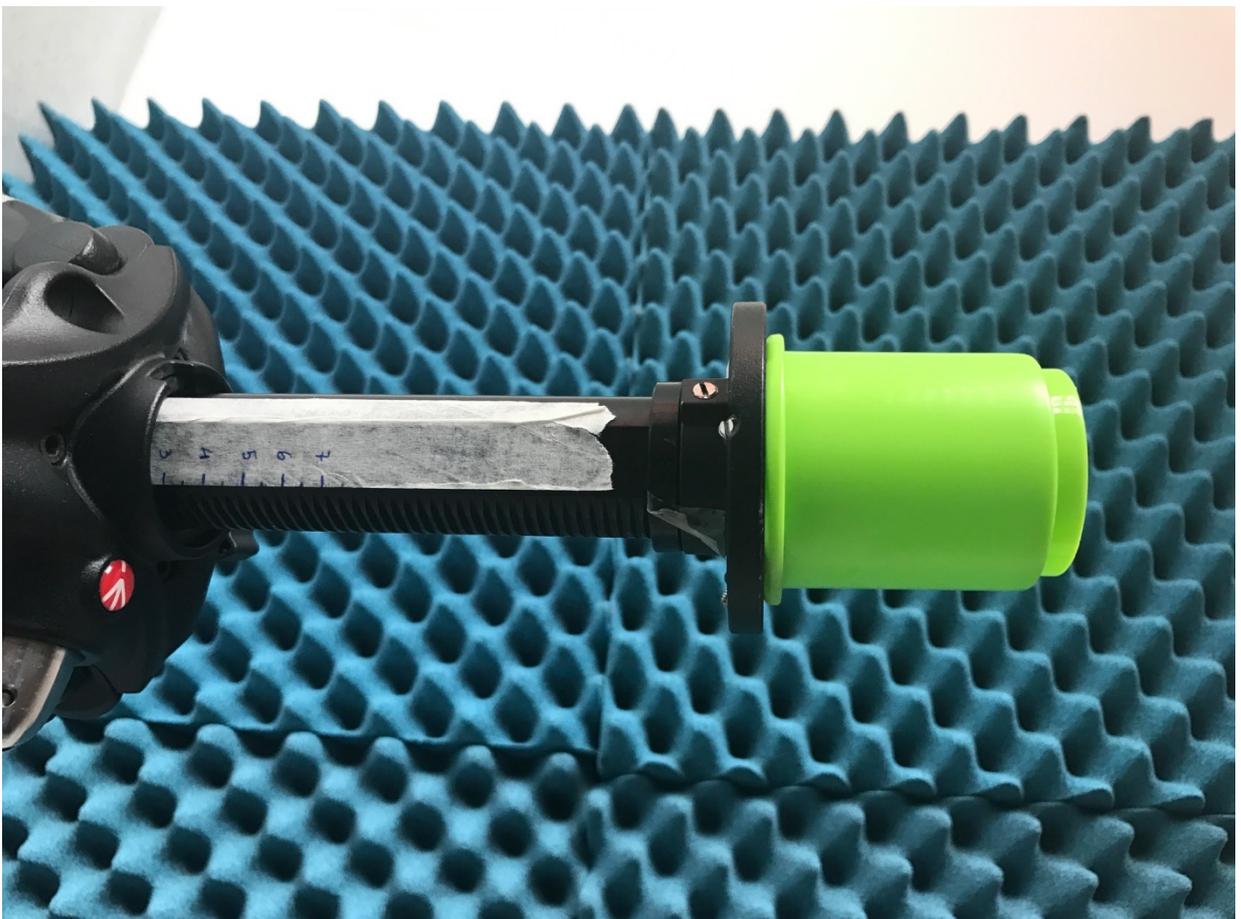
- Distancia (cm) -> 21.1 (100 GHz)/ 24.5 (300 GHz)
- Dimensiones del objeto -> 7 cm (alto) x 7 cm (largo)
- Número de medidas tomadas para cada frecuencia -> 5



*Figura 4.7.a. Posición inicial del equipo para medir el cubo verde*



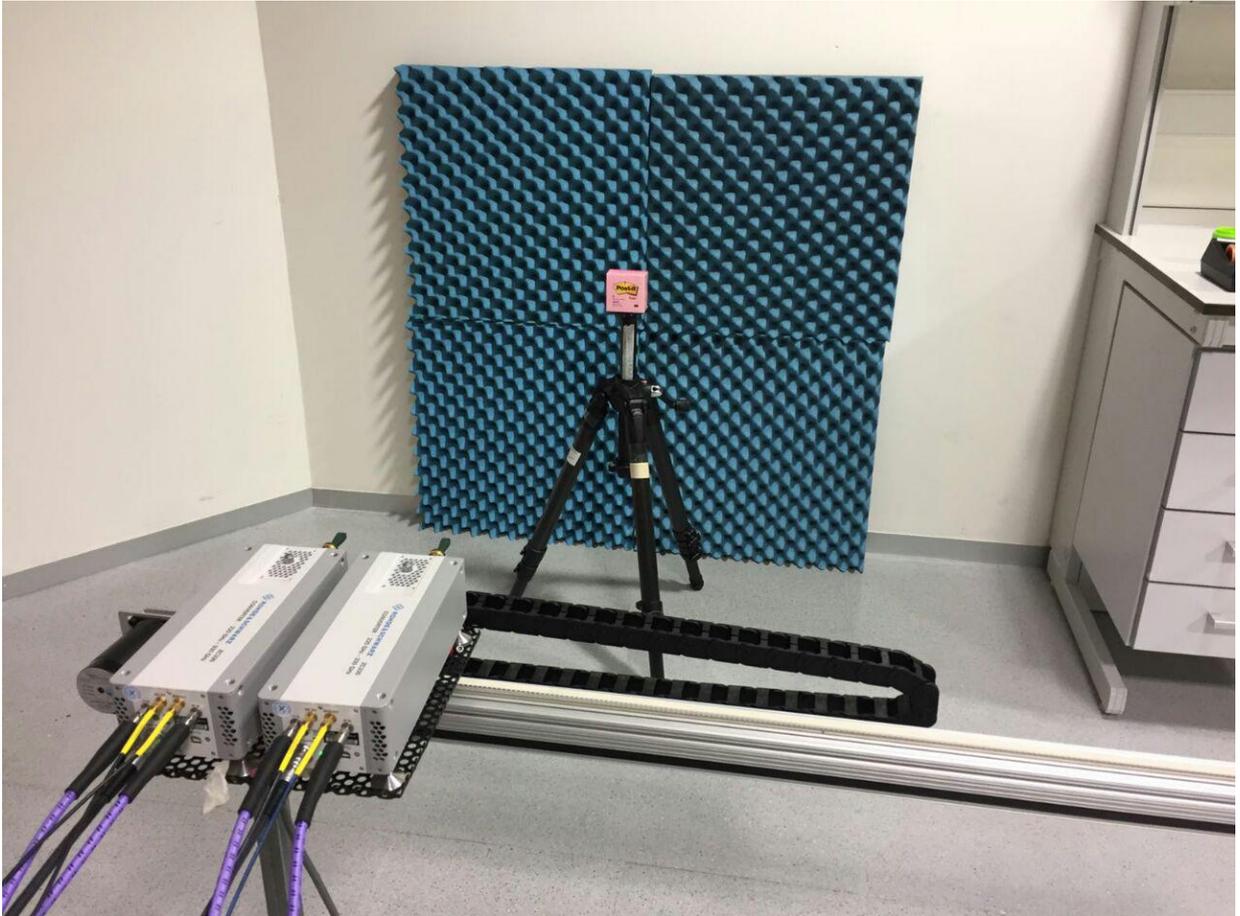
*Figura 4.7.b. Medición del cubo verde a poca distancia de las cabezas*



*Figura 4.7.c. Se aprecia la medida de las dimensiones del cubo*

#### **4.4.2. Paquete de post-it**

- Distancia (cm) -> 21.1 (100 GHz) / 24.5 (300 GHz)
- Dimensiones del objeto -> 7.8 cm (alto) x 7.8 cm (largo)
- Número de medidas tomadas para cada frecuencia -> 5



*Figura 4.8.a. Posición inicial del equipo para medir el paquete de post-its*

En la figura 4.8.b se puede apreciar que el grosor del paquete es bastante importante, ya que uno de los objetivos del trabajo es poder comprobar si las ondas milimétricas pueden atravesar objetos gruesos y obtener una imagen coherente de los mismos.

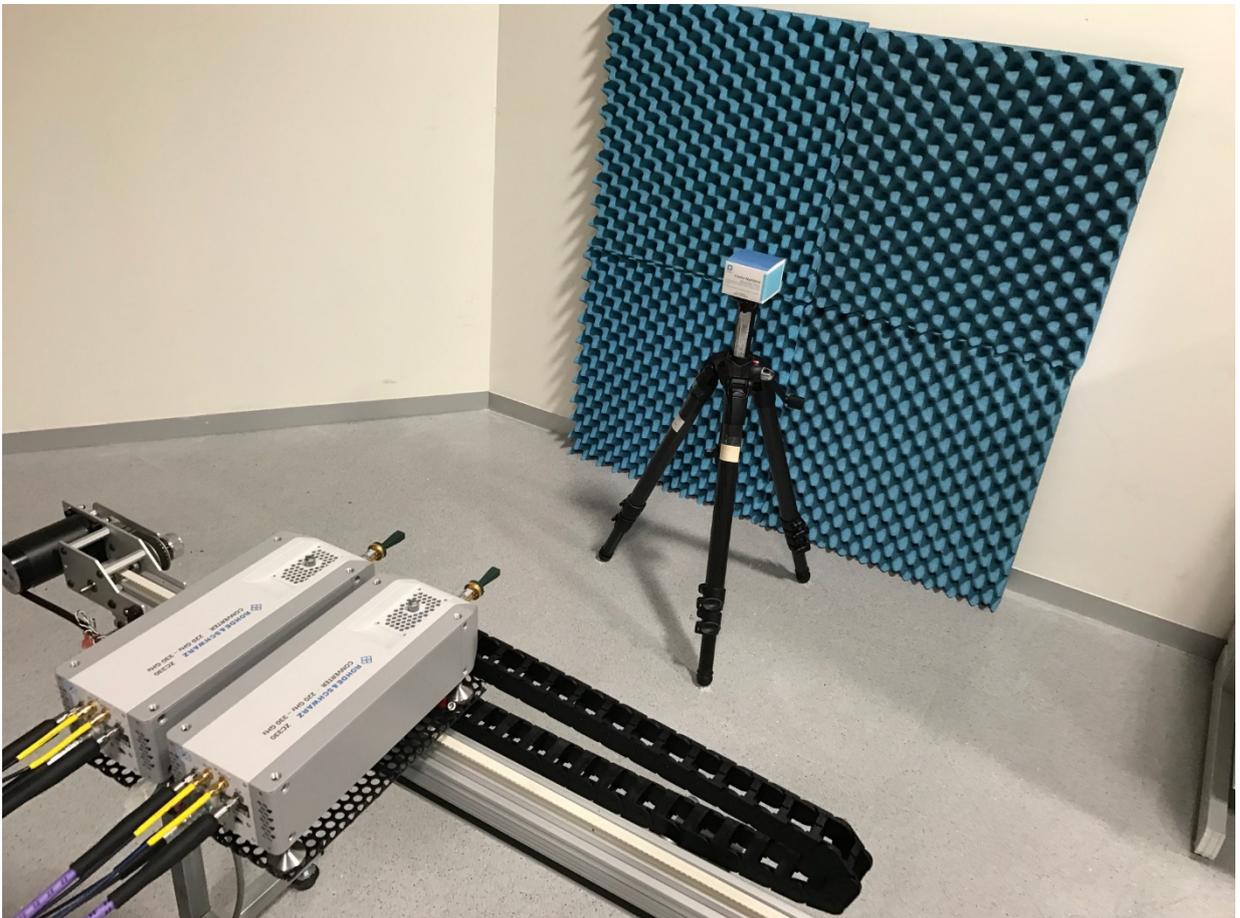


*Figura 4.8. b. Primer plano del paquete de post-its. Se aprecia que tiene un grosor considerable.*

#### **4.4.3. Caja de cartón vacía**

- Distancia (cm) -> 21.1 (100 GHz)/ 24.5 (300 GHz)
- Dimensiones del objeto -> 6.5 cm (alto) x 8.8 cm (largo)
- Número de medidas tomadas para cada frecuencia -> 9/4

La caja de cartón vacía se puede considerar como el objeto de control de este estudio experimental, dado que ha sido el objeto al que más mediciones se le han realizado, un total de 13 considerando ambas frecuencias. Se ha elegido este objeto por tener una geometría sencilla de poder identificar y ser un material prácticamente opaco a la radiación electromagnética visible.



*Figura 4.9. Posición inicial para medir la caja vacía*



*Figura 4.9.b. Primer plano de la caja donde se aprecia con claridad que está vacía*

#### **4.4.4. Caja con pelota**

- Distancia (cm) -> 21.1 (100 GHz)/ 24.5 (300 GHz)
- Dimensiones del objeto -> 6.5 cm (alto) x 8.8 cm (largo)
- Número de medidas tomadas para cada frecuencia -> 9/3

Para la caja con la pelota en su interior solamente se realizaron 3 mediciones a la frecuencia de 300 GHz. Se ha utilizado también como objeto de control, en este caso buscando comprobar si sería capaz de detectar la pelota dentro de la caja, a fin de demostrar que este tipo de ondas pueden detectar objetos ocultos dentro de otros.



*Figura 4.10.a. Posición inicial de los equipos para medir la caja llena*



*Figura 4.10. b. Primer plano de la pelota utilizada en el experimento.*

#### **4.4.5. Varios elementos**

- Distancia (cm) -> 89.5 para ambas frecuencias [19]
- Dimensiones del objeto -> Indeterminado. Objetos múltiples [19]
- Número de medidas tomadas para cada frecuencia -> 1/1

Finalmente, como prueba final del experimento se intentó realizar mediciones sobre una ristra de objetos de diversas formas variadas. Particularmente, los objetos eran un cartón rectangular de leche, y varios cuerpos cilíndricos de distintas alturas. La figura 4.11. da una ilustración del montaje realizado para estas mediciones.



*Figura 4.11. Montaje para las mediciones sobre elementos de forma variada. Se puede apreciar que la gran mayoría son cilindros, aunque también hay un cartón de leche a la izquierda que actúa como forma rectangular.*

#### 4.5. Resumen del capítulo

En este capítulo cuarto, se han descrito los sistemas utilizados para la toma de las medidas durante la campaña (analizador de redes y bocinas transmisora y receptora), así como los diversos objetos utilizados para el experimento, que son fácilmente apreciables en las imágenes que se adjuntan. Dichas medidas fueron realizadas durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, en los laboratorios del ELDI de la Universidad Politécnica de Cartagena.



# Capítulo 5

## *RESULTADOS Y ANÁLISIS*

Pasamos a continuación, a mostrar y describir los resultados obtenidos tras el análisis de los archivos de mediciones con los algoritmos MATLAB explicados en el capítulo 3. La presentación de dichos resultados se hará con arreglo al siguiente orden:

- En primer lugar, para cada frecuencia (primero a 100 GHz y después a 300 GHz), dado que los parámetros no varían demasiado, se mostrará una única tabla con la configuración de los mismos para todas las medidas.
- Posteriormente se tabularán los picos de potencia obtenidos en cada medida para cada objeto y el rango de longitudes entre los que está el PDP para comprobar que coinciden con las dimensiones presentadas en el capítulo 4. En un anexo posterior se mostrarán algunos de los mapas de potencia obtenidos. En este caso, la resolución de los píxeles en el eje y va a ser  $\frac{c}{BW}$ . La técnica vista en [16] ofrece una resolución mejor.
- Dado que el dibujo del objeto se encuentra en el mapa de amplitud del campo enfocado, (Imaging) se pondrá la imagen del mismo correspondiente a cada medida, para todas las medidas existentes. Las imágenes se muestran de izquierda a derecha y siguen el orden en el que aparecen tabulados sus respectivos archivos de medida.
- Finalmente, se comentarán los aspectos más relevantes de los resultados.

Siguiendo este orden, podemos conseguir que todo quede bien explicado y el capítulo no resulte ni farragoso por el exceso de imágenes ni repetitivo por incluir una y otra vez los mismos datos. No obstante, aunque pueda resultar pesado, sí es conveniente poner el campo enfocado en todas las medidas efectuadas, ya que las medidas se han realizado para diversas alturas y lo que buscamos es extraer si existen diferencias entre una y otra, y, en definitiva, poder comprobar si somos capaces de dibujar el objeto de forma completa.

Las imágenes que se mostrarán en este capítulo se han obtenido tras la ejecución de la parte gráfica de los algoritmos MATLAB que aplican la técnica de imaging mostrados en el capítulo 3. Aparecen extraídas de archivos *.fig*, o de imágenes JPEG, dado que se ha utilizado indistintamente ambos formatos para guardarlas.

Hay que destacar, además, que se intentó realizar aparte estudio de Imaging utilizando la técnica del beamforming, pero las imágenes obtenidas no mostraban ningún resultado concluyente, y por eso finalmente se descartó incluirlo en este proyecto. En otro anexo posterior también se mostrarán algunas de esas imágenes como contraejemplo.

### 5.1. Medidas realizadas a la frecuencia de 100 GHz

En la siguiente tabla, recogemos los parámetros de configuración del algoritmo para cada medida realizada. Son muy similares entre todas ellas, por lo que queda mejor recogerlos en una única tabla. En total, a 100 GHz se realizaron 29 medidas, tal como se explica en el capítulo 4.

	$x_{ob}$	$y_{ob}$	$N_{ms\_x}$	$d_{ms\_x}$	$x_{offs}$	$N_{fc\_x}$	$d_{fc\_x}$	$N_{fc\_y}$	$d_{fc\_y}$
Para todos los objetos medidos	0.05	1.05	241	$8.7904 \times 10^{-4}$	0.112	256	0.001	256	0.001
Varios elementos	0.05	1.05	1715	$5.2 \times 10^{-4}$	0.112	300	0.003	256	0.001

Tabla 5. Configuración de los parámetros del algoritmo de Imaging para medidas a 100 GHz.

#### 5.1.1. Cubo verde

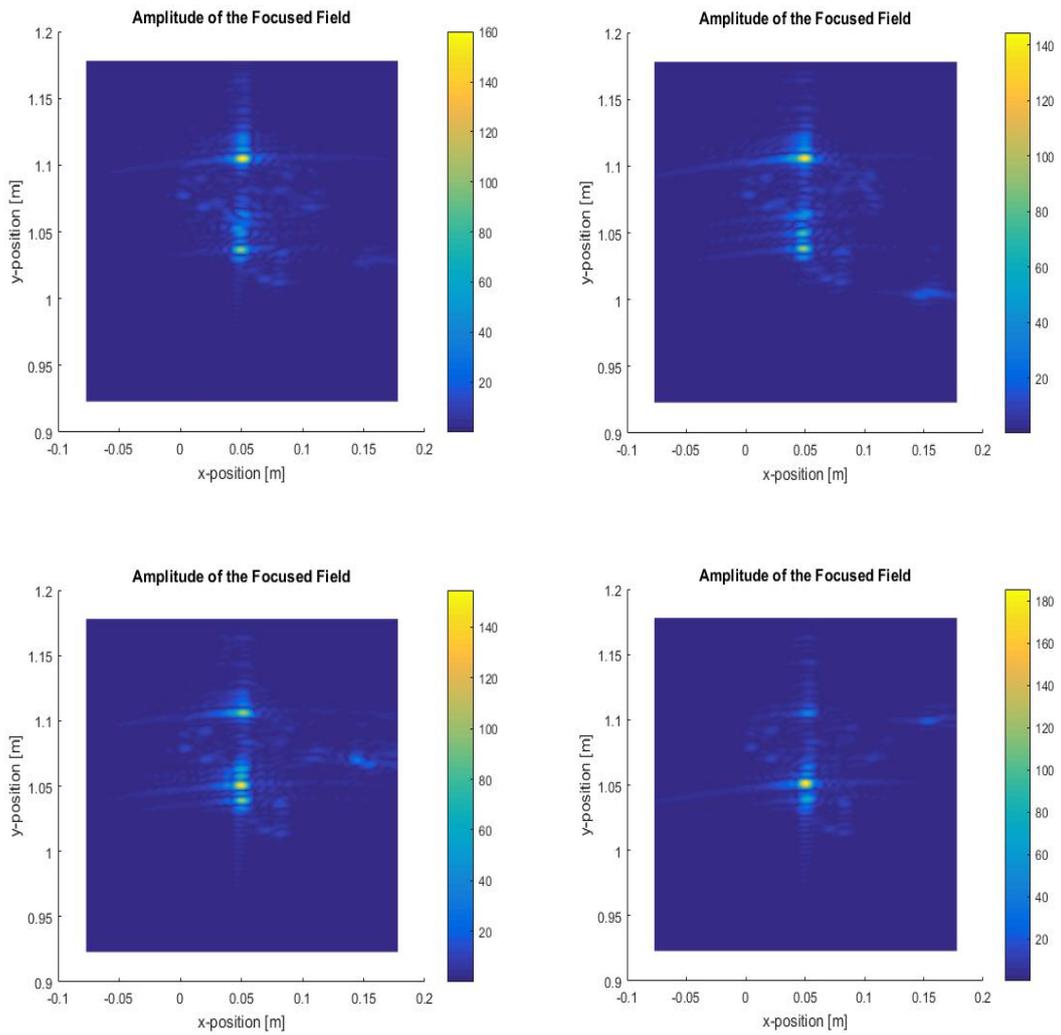
Empezamos describiendo las medidas realizadas en el cubo cilíndrico verde. En la tabla 6 se encuentra un resumen de sus PDP obtenidos y las dimensiones que ocupa. El valor *Rango de dimensiones* (para todas las tablas) señala cuál es la longitud sobre el eje x por la que se dispersa el PDP, suponiendo que el centro está en 1.05 m, y se utiliza para comprobar si la diferencia entre la ubicación de los picos de potencia (donde estaría la parte del objeto que detectamos) coincide con las dimensiones del objeto expuestas en el capítulo 4 y en [19].

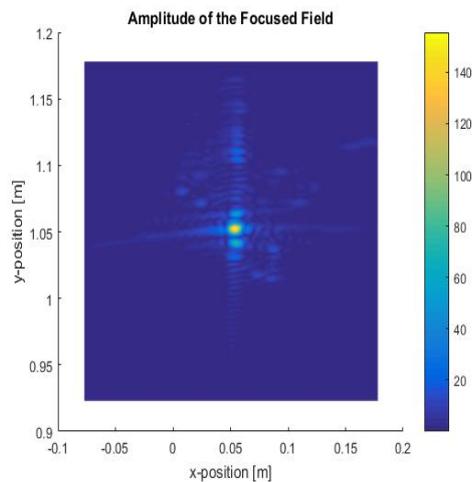
<b>Archivo de medidas</b>	<b>Máximo valor PDP</b>	<b>Rango de dimensiones</b>
<i>Medidas240__8192-2016-24-11-182326.mat</i>	-76 dBm	1.03-1.145 m
<i>Medidas240__8192-2016-24-11-200820.mat</i>	-76 dBm	1.045-1.135m
<i>Medidas240__8192-2016-24-11-214121.mat</i>	-76 dBm	1.035-1.14m

<i>Medidas240__8192-2016-25-11-103927.mat</i>	-75 dBm	1.04-1.125m
<i>Medidas240__8192-2016-25-11-213239</i>	-76 dBm	1.035-1.14m

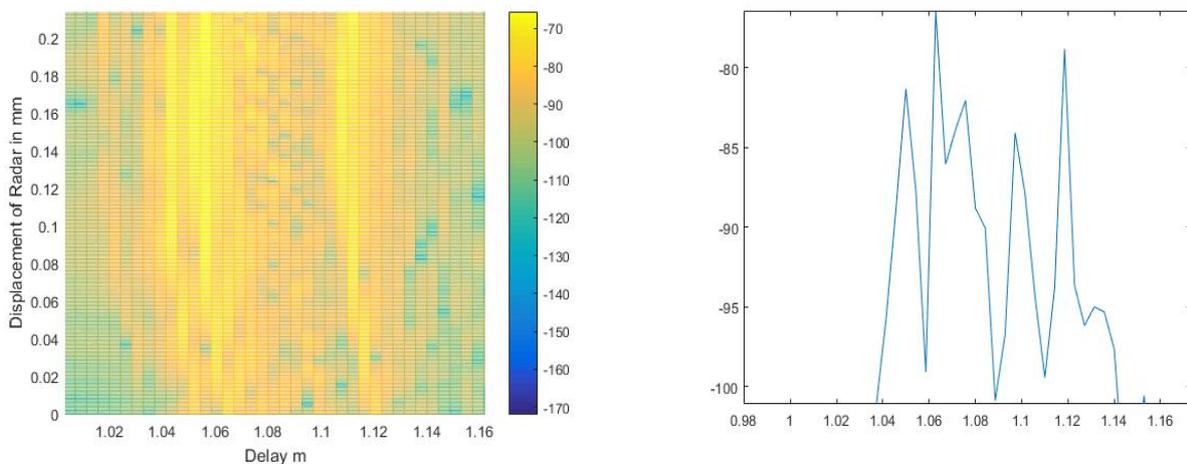
*Tabla 6. PDP obtenido en cada medida tomada sobre el cubo verde.*

Pasamos a mostrar a continuación las imágenes del campo enfocado para cada medida:





*Figura 5.1. Campo enfocado para el cubo verde a 100 GHz. Las primeras 4 figuras (pág.ant) corresponden, de izquierda a derecha y empezando por la parte superior, a las correspondientes medidas que aparecen en la Tabla 6. La figura de esta página corresponde a la quinta medida.*



*Figura 5.2. Ejemplo de PDP para el cubo verde. Éste corresponde a la tercera medida. Se puede observar cómo la distancia entre los picos principales coincide con las dimensiones del objeto.*

Como se puede observar por la imagen anterior, en casi todas las medidas se pueden ver pequeños picos de potencia más allá de lo que correspondería a las dimensiones del objeto. La principal explicación para esto tiene que ver con la geometría del mismo. Al ser un cilindro, su sección recta radar es diferente a la de un objeto rectangular, y esto se traduce en que la energía electromagnética se dispersa siguiendo la forma del objeto, lo que provoca una reflexión de baja

intensidad en la arista central paralela al eje x. Esto concuerda con lo que se ve posteriormente en el campo disperso con detecciones de potencia a los laterales del objeto. También es posible que influya el ángulo con el que se ilumina el objeto al irse desplazando el equipo sobre el carril. La reflexión provocada por la sección recta radar junto con el ángulo del haz con respecto al centro del objeto es lo que provoca la aparición de dichos picos. Esto cobra mayor sentido al observar la cuarta medida, que suponemos que incide en el centro del objeto, y, por consiguiente, apenas presenta dispersión lateral. No obstante, las líneas dibujadas son demasiado suaves y no es posible apreciar con rotundidad la forma del objeto, si no de forma muy vaga.

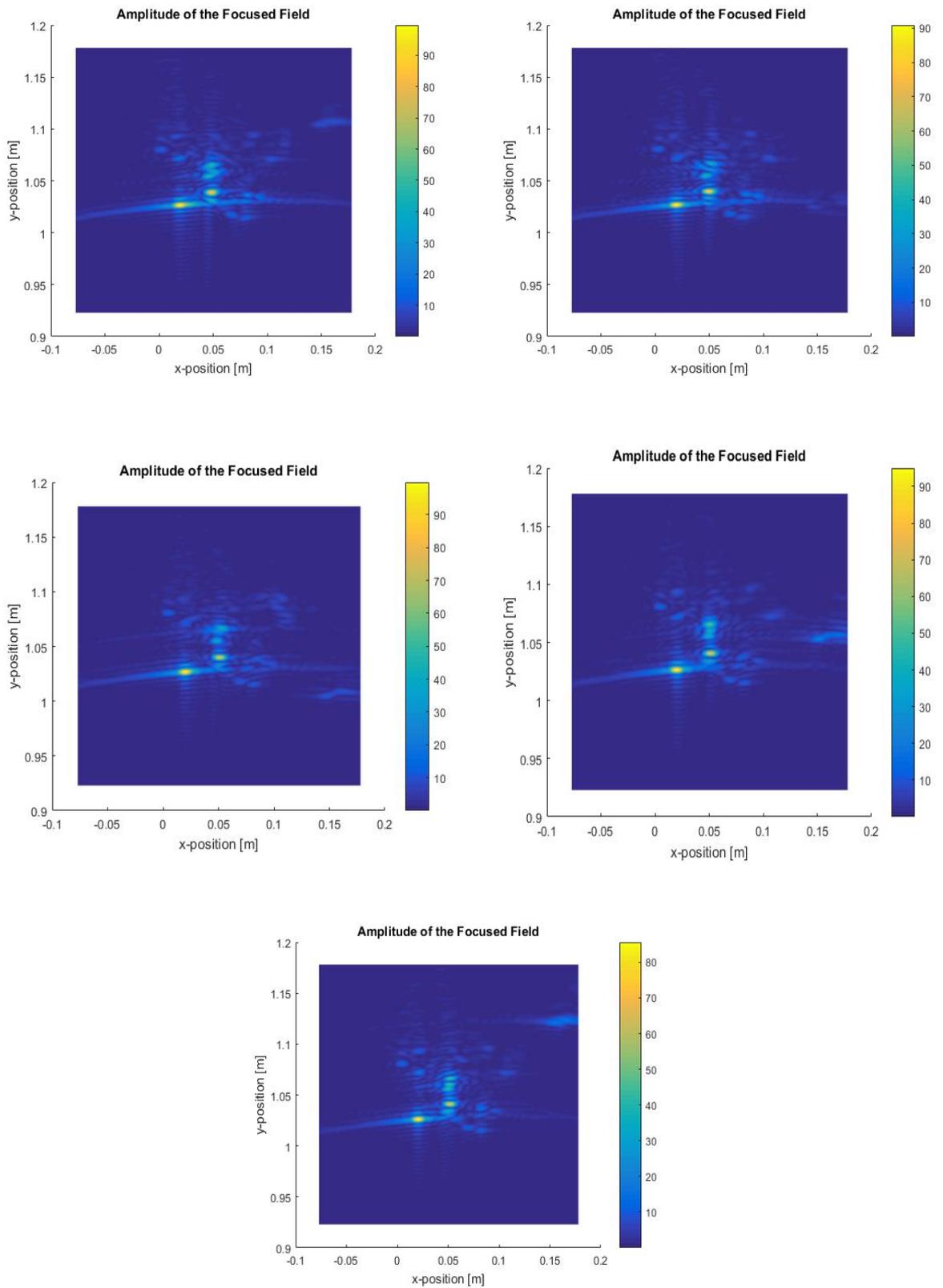
### 5.1.2. Paquete de post-it

El siguiente objeto a analizar es el paquete de post-it, al cual también se le han efectuado otras 5 medidas. La tabla 7 muestra los valores obtenidos como PDP

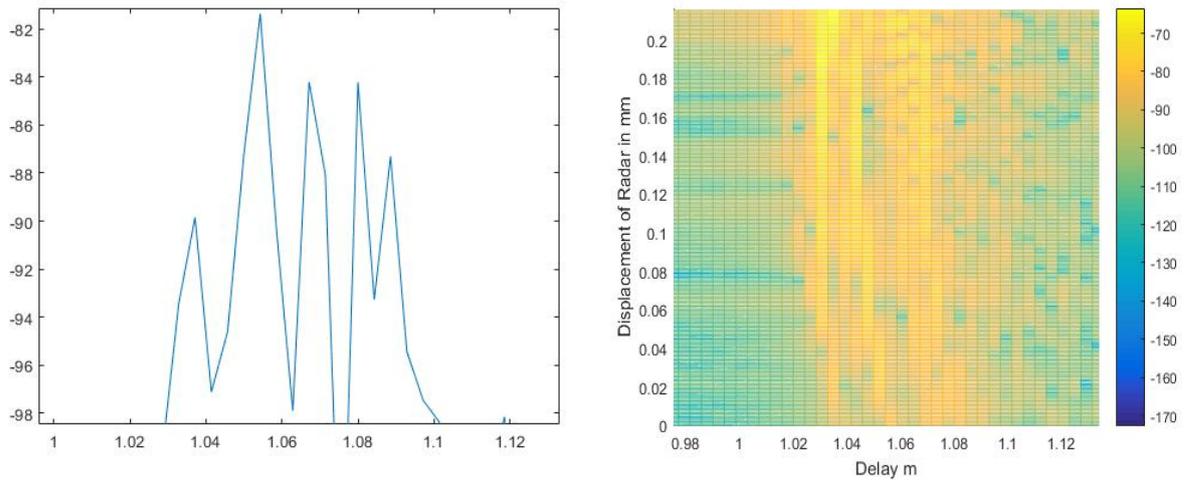
<b>Archivo de medidas</b>	<b>Máximo valor PDP</b>	<b>Rango de dimensiones</b>
<i>Medidas240__8192-2016-12-01-133348.mat</i>	-80 dBm	1.025-1.12 m
<i>Medidas240__8192-2016-12-01-152629.mat</i>	-82 dBm	1.025-1.12m
<i>Medidas240__8192-2016-12-01-164236.mat</i>	-80 dBm	1.03-1.1m
<i>Medidas240__8192-2016-12-01-182624.mat</i>	-82 dBm	1.03-1.09m y 1.175-1.19m
<i>Medidas240__8192-2016-12-02-133047</i>	-84 dBm	1.03-1.175m

*Tabla 7. PDP y rango de dimensiones obtenido para el paquete de post-its a 100 GHz.*

Y las imágenes del campo centrado son las siguientes:



*Figura 5.3. Campo centrado del paquete post-it a 100 GHz. Empezando por la parte superior y de izquierda a derecha, se muestran las medidas de la 1 a la 5 de la tabla 7.*



*Figura 5.4. Ejemplo de PDP para el paquete de post-it. Corresponde a la tercera medida de la tabla 7. Aquí sólo se aprecia un único pico intenso, que coincide con la cara frontal. Se detecta menor PDP que con respecto al objeto anterior.*

En este caso, a la vista de las imágenes, parece que sí somos capaces de detectar el objeto con cierta nitidez. La forma de la imagen nos muestra únicamente la cara frontal del objeto. Esto es debido, por un lado, a que el objeto está recubierto de plástico fino (aislante), como parece apreciarse en las figuras 4.8. a y 4.8.b., y, por otro, a que posee un grosor importante entre cara y cara, por lo que la potencia se atenúa y no es capaz de llegar a la cara posterior. Esto explica también el valor más pequeño de PDP obtenido en comparación con el cubo cilíndrico. Asimismo, esto también explica el porqué de los rangos de longitudes que no coinciden con las dimensiones del objeto, y es que parece que en el procesado se suma tanto la longitud de lateral que es capaz de detectar el haz, como la de la cara frontal, de ahí que el rango exceda las dimensiones del objeto.

### 5.1.3. Caja vacía

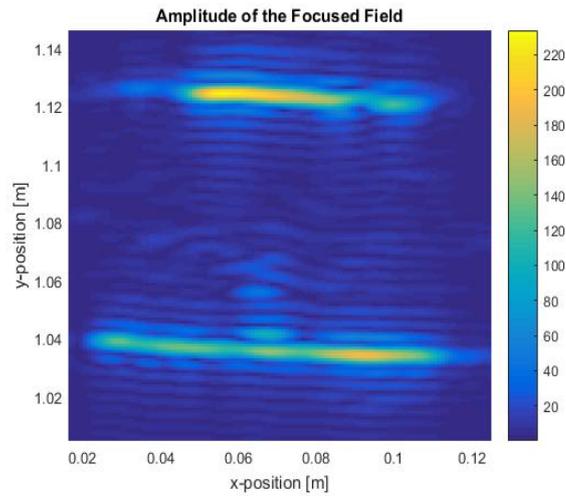
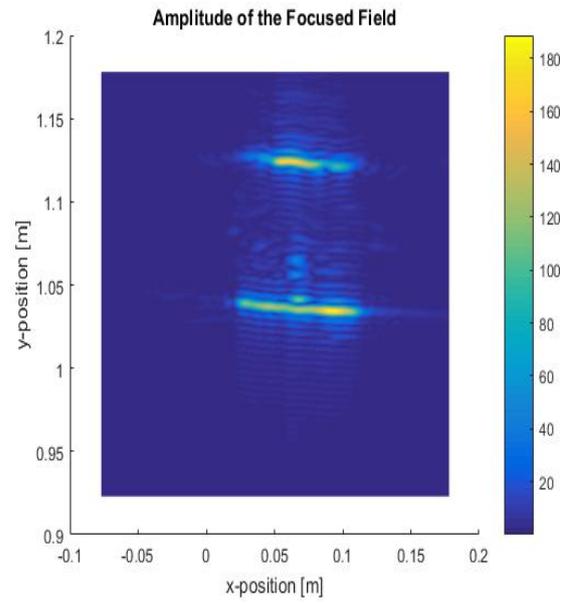
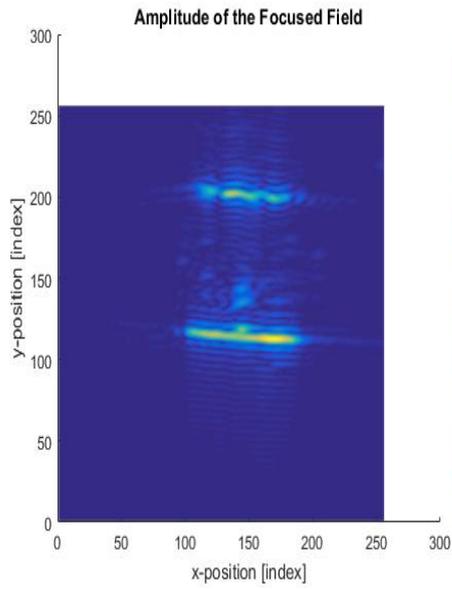
A continuación, el siguiente objeto a analizar es la caja de cartón vacía. Dicho objeto fue el utilizado como objeto de control del estudio, ya que en él fueron efectuadas todas las comprobaciones previas a generalizar los algoritmos y proceder con el resto de objetos. Para el análisis de este objeto se realizaron 9 medidas, a distintas alturas.

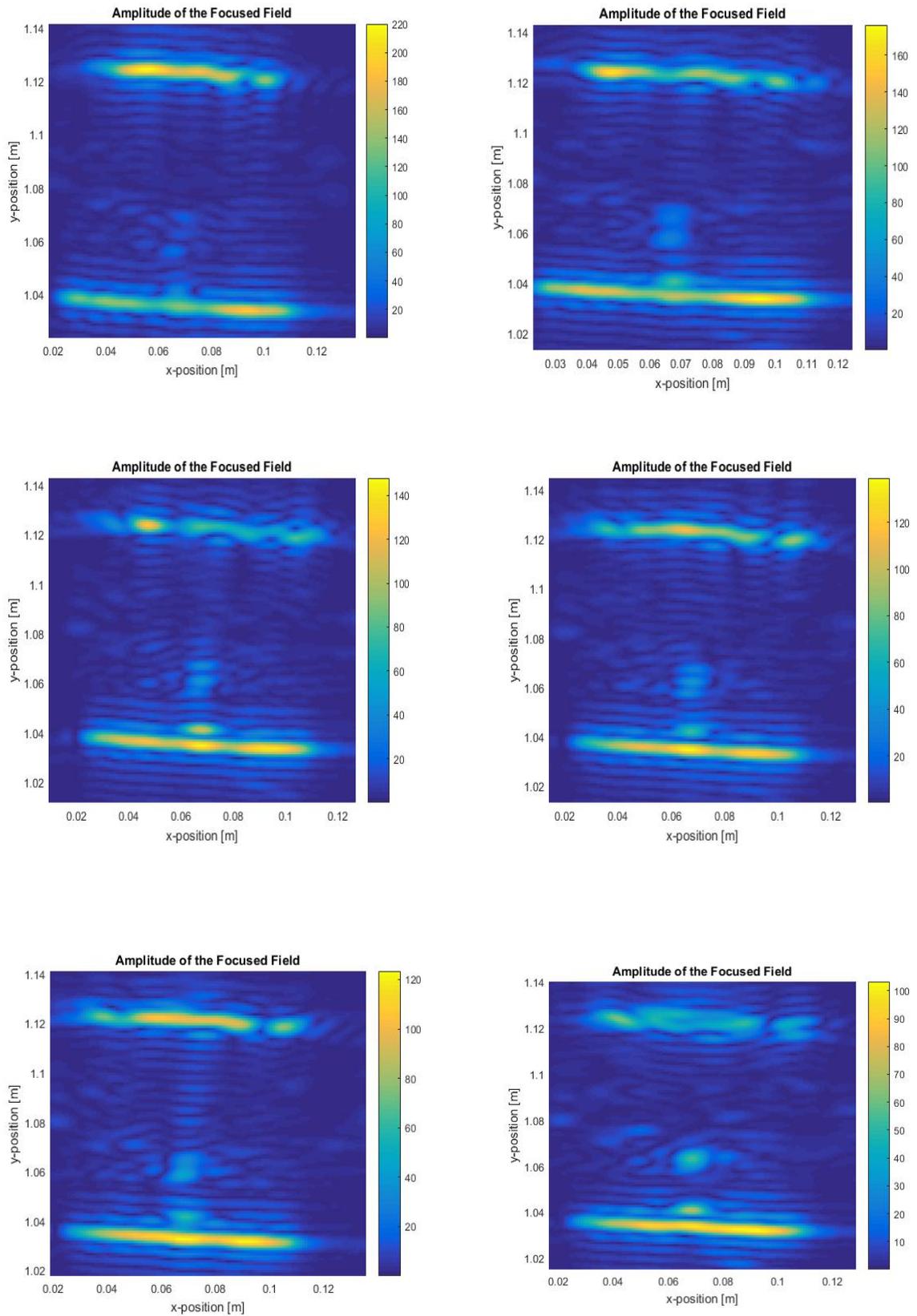
La tabla de PDP se muestra a continuación:

<b>Archivo de medidas</b>	<b>Máximo valor PDP</b>	<b>Rango de dimensiones</b>
<i>Medidas240__8192-2016-11-11-141035.mat</i>	-74 dBm	1.04-1.13m
<i>Medidas240__8192-2016-11-11-155223.mat</i>	-70 dBm	1.05-1.14m
<i>Medidas240__8192-2016-11-14-131031.mat</i>	-70 dBm	1.05-1.14m
<i>Medidas240__8192-2016-11-14-152518.mat</i>	-72 dBm	1.05-1.14m
<i>Medidas240__8192-2016-11-15-104802.mat</i>	-76 dBm	1.05-1.14m
<i>Medidas240__8192-2016-11-15-124044.mat</i>	-75 dBm	1.05-1.14m
<i>Medidas240__8192-2016-11-15-142221.mat</i>	-75 dBm	1.05-1.14m
<i>Medidas240__8192-2016-11-15-155656.mat</i>	-78 dBm	1.05-1.14m
<i>Medidas240__8192-2016-11-16-103934.mat</i>	-84 dBm	1.04-1.13m

*Tabla 8. PDP y rango de dimensiones para las medidas de la caja vacía*

Seguidamente se muestran las imágenes de los mapas de potencia para la caja vacía





Figuras 5.5. (página anterior) y 5.6. Campo enfocado para la caja vacía a 100 GHz. En la figura 5.5. se muestran de izquierda a derecha, y empezando por arriba, las medidas 1 a 3 de la tabla 8. En la 5.6., en el mismo orden, las medidas 4 a 9 de la misma tabla 8.

A la vista de los resultados, vemos que la caja vacía se detecta perfectamente e incluso la forma se dibuja de manera muy perceptible. Todas las imágenes se han tomado centradas en el objeto, lo que provoca que únicamente se vea la cara frontal y la posterior, dado que ahora entre las dos caras frontales hay aire, y el material es fino (cartón), por lo que se absorbe menos potencia y podemos detectar también la cara posterior de la caja, a diferencia de lo ocurrido con el paquete de post-it.

El PDP (cuyas imágenes se mostrarán en el anexo A) abarca más rango del aquí tabulado. Esto es así porque al estar en posición centrada, el haz también ilumina en cierta medida las caras laterales, aunque no con la suficiente potencia como para que se lleguen a mostrar en la imagen (al ser perpendiculares al eje x), pero sí lo justo como para que el PDP las detecte y las alinee en el eje X junto a la cara frontal (Como pasaba en el paquete post-it) lo que provoca que se vea potencia más allá de las dimensiones de la caja. Los picos de potencia corresponden a las caras de la caja.

#### 5.1.4. Caja con pelota

Por último, se ha vuelto a analizar y medir la misma caja, pero ahora con una pequeña pelota de plástico en su interior. El objetivo que se persigue es comprobar si somos capaces de detectar la pelota oculta tras la caja.

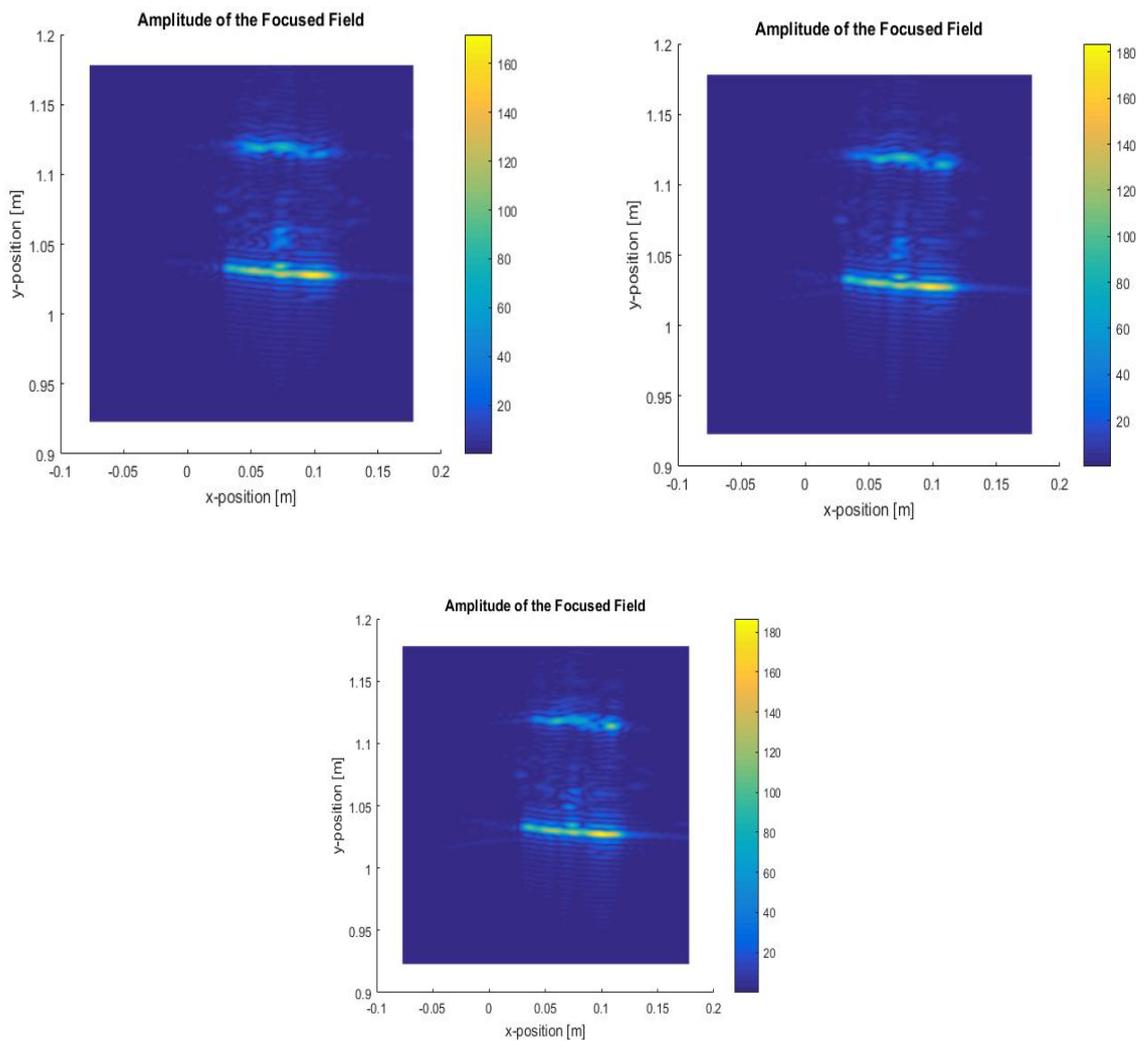
Los valores de PDP, así como el rango de longitudes obtenido en este caso, se encuentran en la tabla 9:

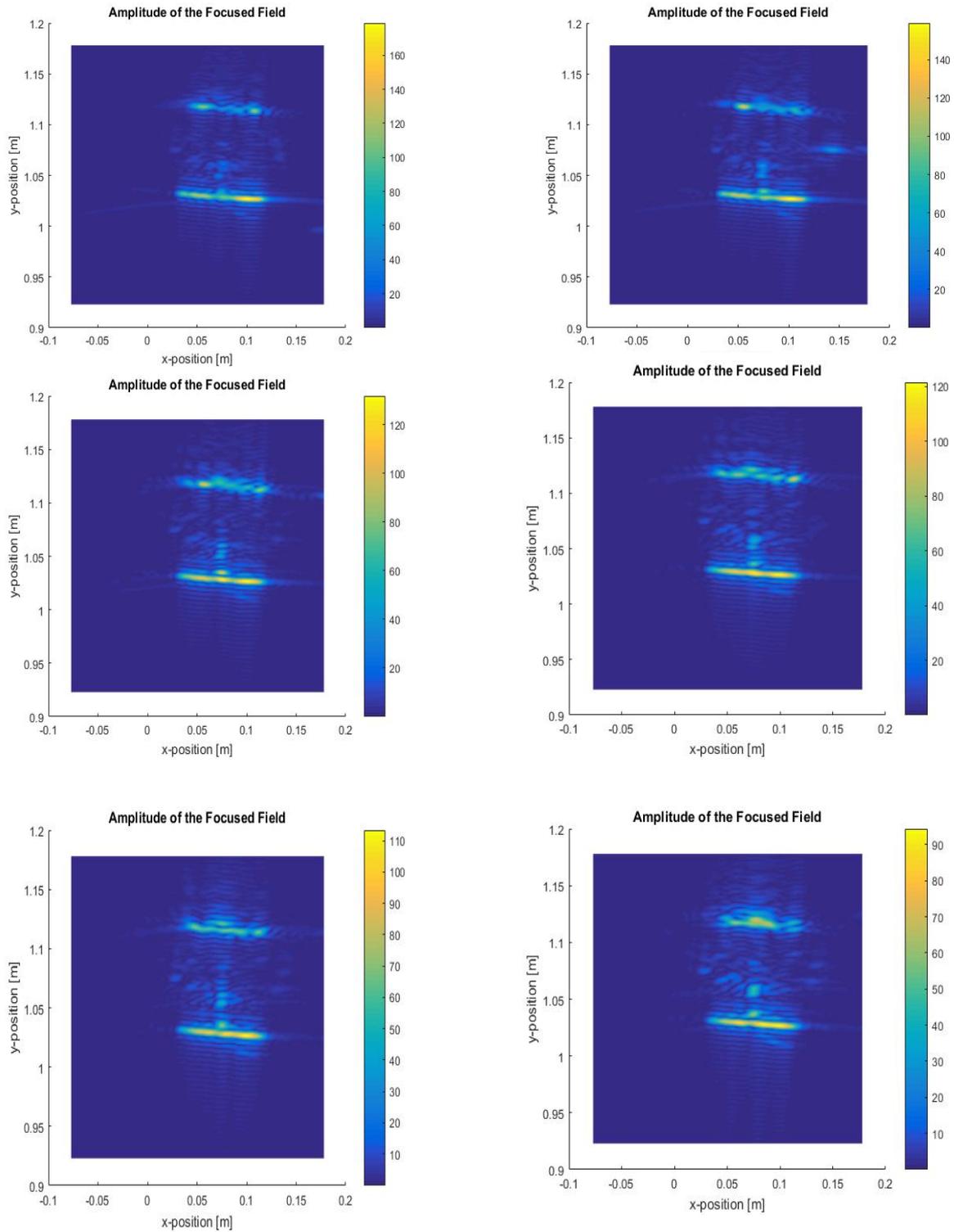
<b>Archivo de medidas</b>	<b>Máximo valor PDP</b>	<b>Rango de dimensiones</b>
<i>Medidas240__8192-2016-11-16-131509.mat</i>	-72 dBm	0.98-1.175 m
<i>Medidas240__8192-2016-11-16-151015.mat</i>	-70 dBm	1.01-1.17 m
<i>Medidas240__8192-2016-11-17-104107.mat</i>	-70 dBm	0.99-1.15 m
<i>Medidas240__8192-2016-11-17-121355.mat</i>	-70 dBm	1-1.17 m
<i>Medidas240__8192-2016-11-17-153944.mat</i>	-75 dBm	1.03-1.145 m

<i>Medidas240__8192-2016-11-18-103807.mat</i>	-77 dBm	1.01-1.16 m
<i>Medidas240__8192-2016-11-18-124556.mat</i>	-78 dBm	1.02-1.16 m
<i>Medidas240__8192-2016-11-18-153033.mat</i>	-82 dBm	1.025-1.175 m
<i>Medidas240__8192-2016-11-21-104429.mat</i>	-84 dBm	1.03-1.17 m

*Tabla 9. Valores del PDP y rango de longitudes para la caja con la pelota.*

Y los mapas de potencia resultan:





*Figuras 5.7. (pág.ant) y 5.8. Campo enfocado de la caja con pelota a 100 GHz. La figura 5.7. muestra, empezando por la imagen superior y de izquierda a derecha, las medidas 1 a 3 de la tabla 9. La figura 5.8. muestra, en el mismo orden, las medidas 4 a 9 de la antedicha tabla.*

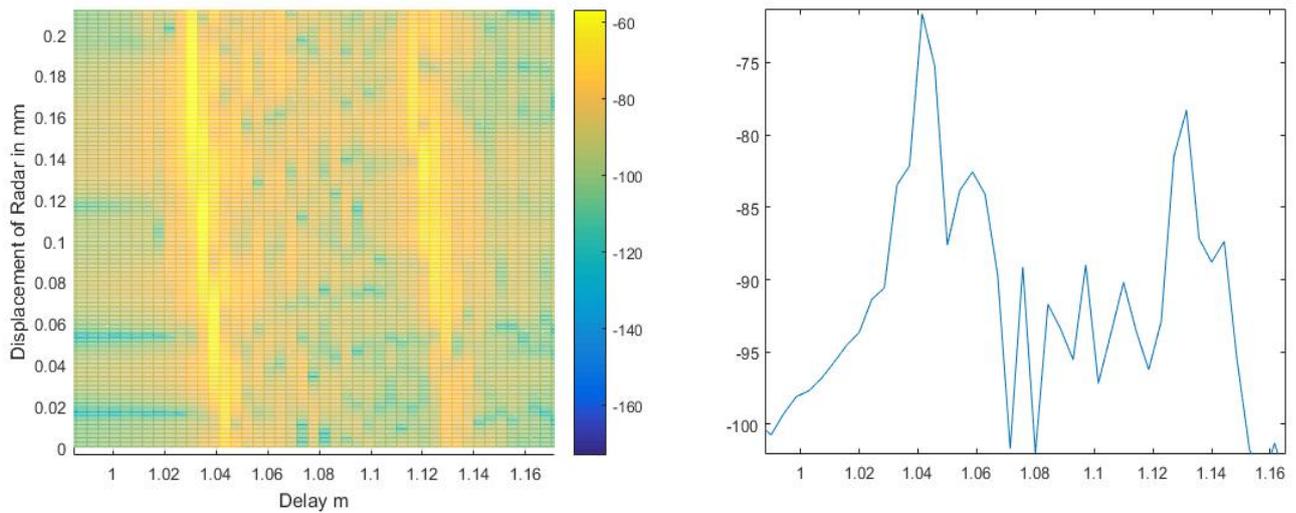


Figura 5.9. Ejemplo de PDP para la caja con pelota. Corresponde a la tercera medida de la tabla 9.

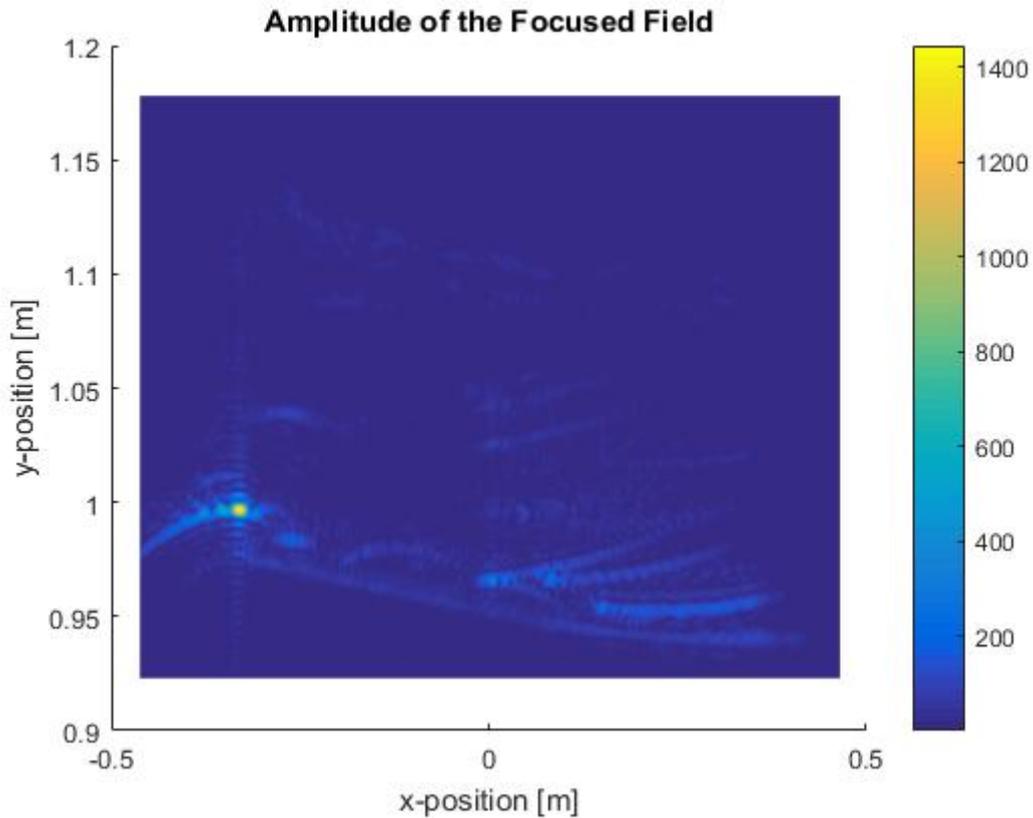
A la vista de los resultados, podemos concluir que somos capaces de detectar la forma de la caja, tomando aquellas paralelas con el eje x (anterior y posterior), pero no aquellas que van con el eje y. Se puede ver además que la distancia entre los dos laterales coincide con las dimensiones de la caja. El PDP, tal y como ocurría en los dos ejemplos anteriores, sí detecta potencia por los laterales, pero no lo suficiente como para poderlos reconstruir, lo que hace que se sumen a la potencia de los detectados y la pelota y excedan el rango previsto. En cuanto a la pelota, se detecta una mancha alrededor del centro de la imagen que corresponde con ella, aunque aparece con menos potencia debido a la dispersión provocada por su sección recta radar al ser un objeto esférico y sólo podemos captar aquella que es reflejada de vuelta al equipo. En los cortes de los mapas de potencia del anexo, se verá como las líneas de más potencia coinciden con los laterales y dimensiones de la caja.

#### 5.1.5. Varios elementos

Por último, analizaremos ahora el archivo '*medidas1715\_\_8192-2016-11-05-110729.mat*'. Este archivo contiene la información relativa a los elementos variados del epígrafe 4.4.5, y tal como puede verse, consta de un cartón rectangular y varios objetos de forma cilíndrica. Dado que sólo se ha tomado una medida para los mismos, no es necesario tabularlo. Los parámetros de configuración van a variar ahora un poco, tal como se ve en la tabla 5. El paso de área cambia porque tenemos muchos más puntos a analizar (1715) y la longitud a lo largo del eje x aumenta (89.5 cm). Esto implica que debemos cambiar también el número de puntos de enfocado, al menos en el eje x, para poder visualizar correctamente la longitud entera. También varía  $d_{fc_x}$ , puesto que hay que modificarlo en consecuencia para que al multiplicarlo por el número de puntos de enfocado, obtengamos un valor igual o superior a la longitud del eje x. En este caso, se ha optado por  $300 * 0.003$ , siendo 0.003 la longitud de onda a 100 GHz. Se ha elegido este valor dado que también hay que buscar un compromiso para que el algoritmo no tarde demasiado

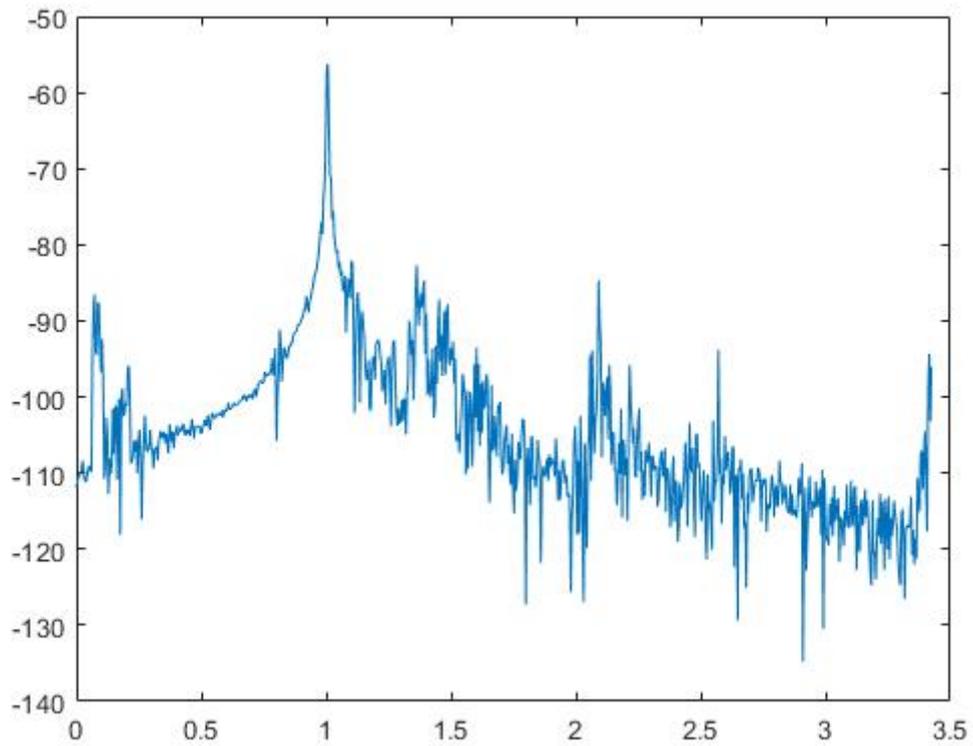
en completar la ejecución, ya que, por lo visto en medidas experimentales, a mayor número de puntos de enfocado (mayor área), más tardaba el algoritmo en ejecutarse. En este caso, el tiempo de ejecución ha sido de unas seis horas y media.

La imagen obtenida ha sido la siguiente:



*Figura 5.10. Campo enfocado para varios elementos a 100 GHz.*

Como puede observarse, existe un pico de potencia en la esquina izquierda del eje x (que corresponde a la caja de cartón rectangular) y el resto de objetos cilíndricos dibuja unas líneas más suaves debido a la mayor dispersión. Esto es coherente con lo visto en los apartados anteriores, y la intensidad de las líneas cilíndricas va a depender también del tamaño, material y grosor del objeto, aunque debido a la gran dispersión que introducen, no vamos a ser capaces de ver con claridad qué tipo de objeto son (como pasaba con el cubo verde). Por su parte, el PDP obtenido corrobora esta hipótesis, siendo la imagen obtenida en este caso:



*Figura 5.11. PDP para varios elementos a 100 GHz.*

Es fácil ver que alrededor de un metro en el eje x se concentra el pico de potencia, dado que ha sumado la potencia de todos los objetos, obteniendo un valor mucho mayor a los de los objetos por separado.

## 5.2. Medidas realizadas a la frecuencia de 300 GHz

Pasamos ahora a mostrar y describir los resultados obtenidos con la frecuencia de 300 GHz. En este epígrafe van a existir algunas diferencias con el anterior, ya que:

- No hemos tenido en cuenta ahora el PDP más que para poder determinar la posición exacta en el eje y del objeto (Parámetro  $y_{ob}$ ).
- Algunos parámetros del algoritmo deben ser modificados para poder mostrar correctamente las imágenes. En experiencias previas, al no modificar al paso de área, las imágenes salían distorsionadas, por tanto, hay que mostrar las modificaciones realizadas.
- Los archivos de medidas a 300 GHz van a tener un menor número de puntos de medida. La mayor variación se da en la caja con pelota, que pasa a tener sólo 3 medidas realizadas con 300 y 500 puntos de medida

Empezamos en primer lugar mostrando los cambios en los parámetros:

	$x_{ob}$	$N_{ms_x}$	$d_{ms_x}$	$x_{offs}$	$N_{fc_x}$	$d_{fc_x}$	$N_{fc_y}$	$d_{fc_y}$
Caja con pelota	0	301	$8.13 \times 10^{-4}$	0.112	512	0.0005	512	0.0005
		501	$4.89 \times 10^{-4}$					
Resto de objetos		151	$1.62 \times 10^{-3}$					
Varios elementos	0	1715	$5.2 \times 10^{-4}$	0.112	900	0.001	512	0.0005

*Tabla 10. Configuración de los parámetros del algoritmo para las medidas a 300 GHz*

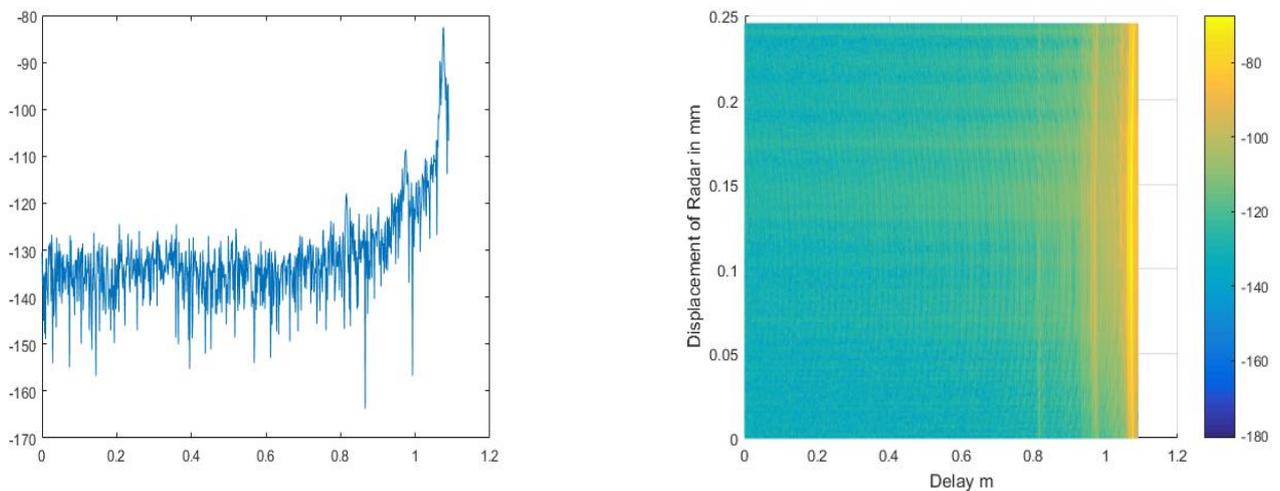
El parámetro  $y_{ob}$  no se muestra en esta tabla debido a que lo hemos hecho variar para cada medida mediante la obtención del PDP. Lo hemos seleccionado teniendo en cuenta la posición donde se detecta el pico de potencia de cada medida

5.2.1. Cubo verde

Archivo de medidas	Posición y_ob
<i>Medidas150__8192-2016-10-26-152945.mat</i>	1.075
<i>Medidas150__8192-2016-10-26-164354.mat</i>	1.075
<i>Medidas150__8192-2016-10-26-174126.mat</i>	1.0637
<i>Medidas150__8192-2016-10-26-183919.mat</i>	1.0637
<i>Medidas150__8192-2016-10-26-193654.mat</i>	1.0637

*Tabla 11. Posición y\_ob para las medidas del cubo verde a 300 GHz*

En la siguiente página, a su vez, se muestran las imágenes correspondientes al cubo verde a 300 GHz. Los comentarios se harán al final, una vez se hayan mostrado todas las imágenes de todas las medidas. Se irá poniendo, para cada objeto, su tabla de posición y\_ob y sus correspondientes imágenes, así como una muestra del PDP obtenido en algunas de ellas para efectuar una comparativa con el obtenido a 100 GHz.



*Figura 5.12. PDP y corte transversal del mismo obtenidos para el archivo de medidas del cubo verde a 300 GHz, 'Medidas150\_\_8192-2016-10-26-152945.mat'*

Se puede observar fácilmente que el PDP es muy distinto al de 100 GHz. Ahora sólo se nos muestra un pico de potencia que coincide con el centro del objeto alineado con el haz iluminante. Este dato es de gran utilidad para posteriormente, introducir el parámetro  $y_{ob}$  y obtener la mejor calidad de imagen posible. Esta diferencia se puede explicar con la menor resolución obtenida en la frecuencia superior al tener a su vez una menor longitud de onda.

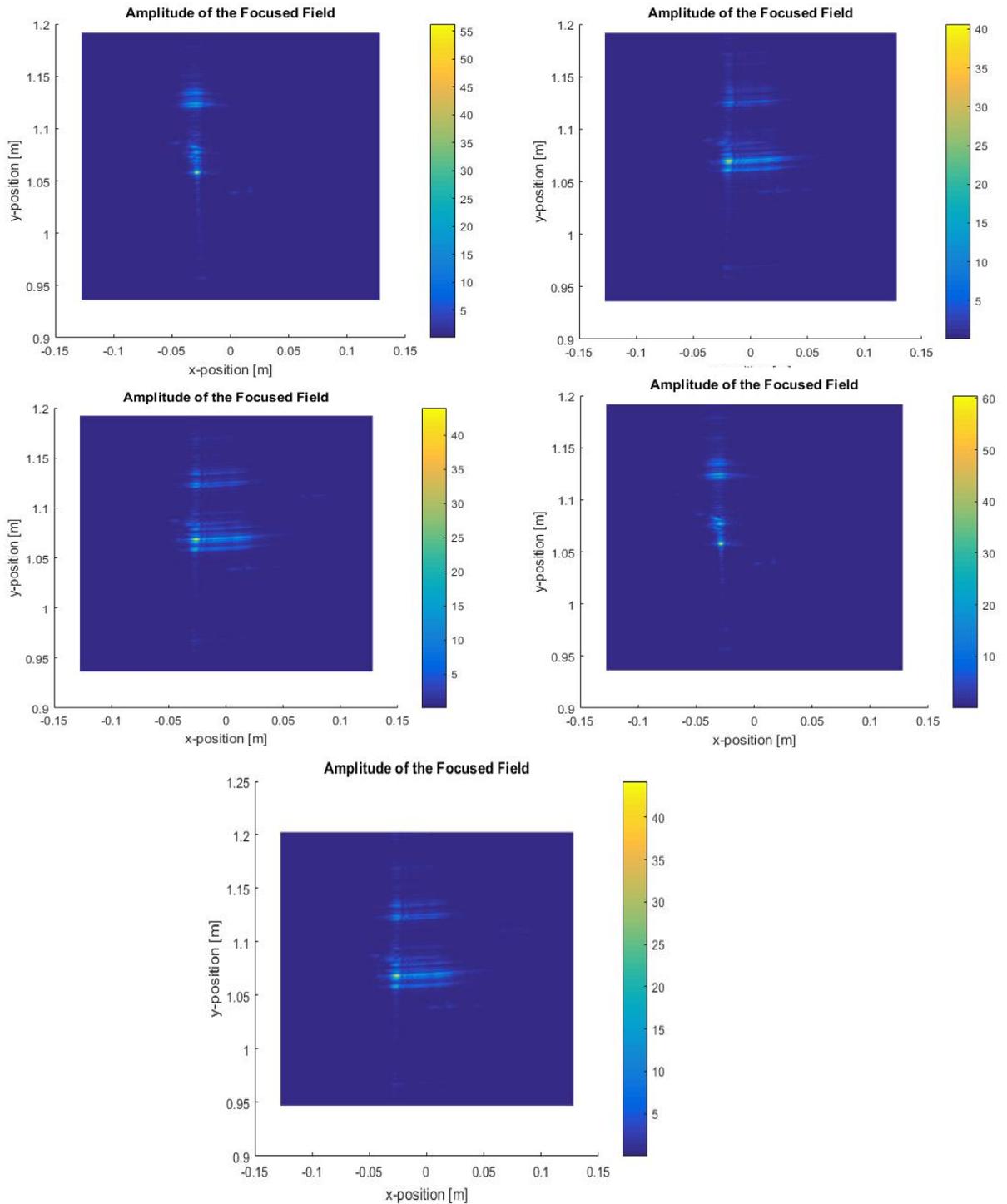
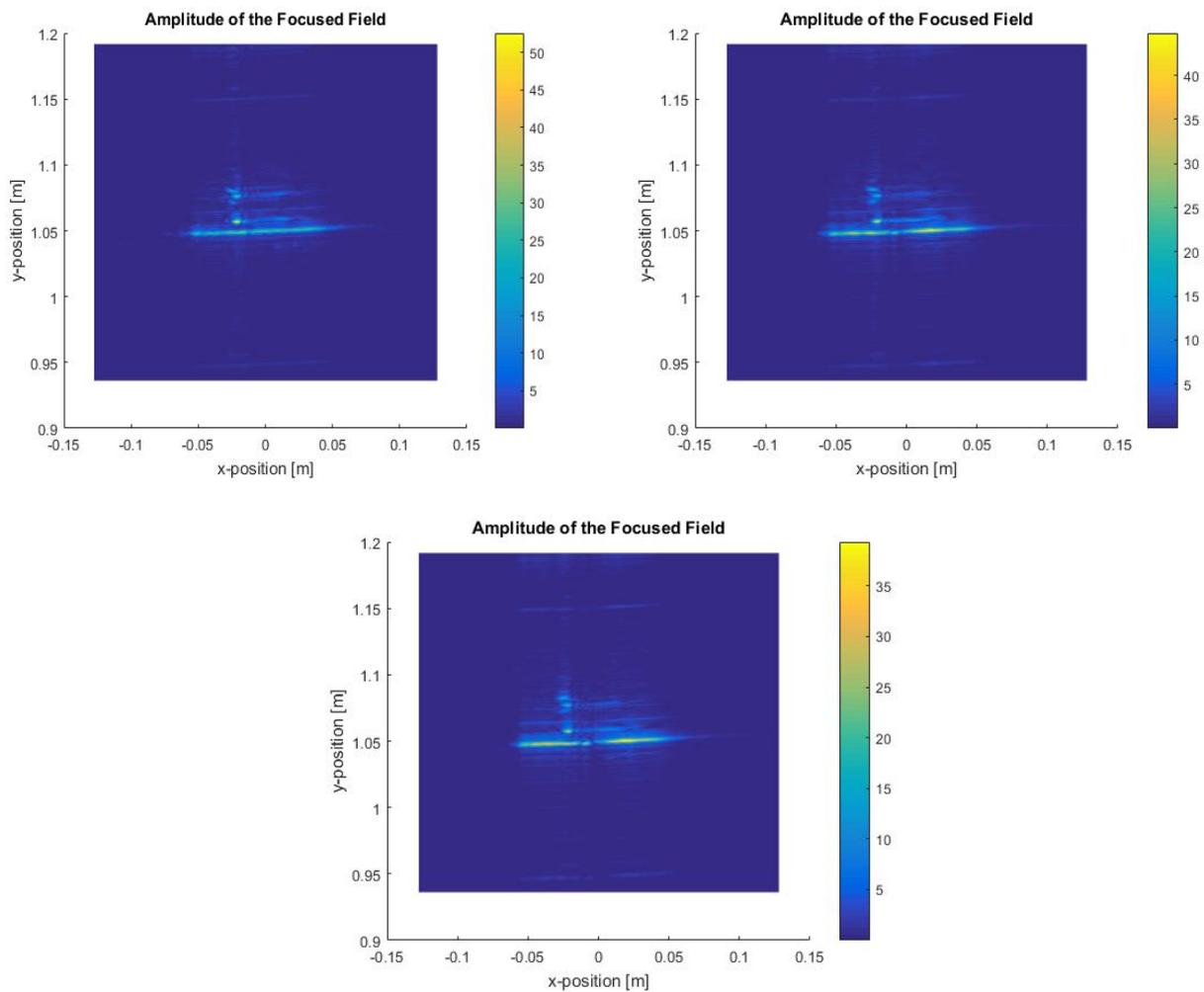


Figura 5.13. Campo enfocado del cubo verde a 300 GHz. Empezando por la parte superior y de izquierda a derecha, se muestra el resultado obtenido para las medidas 1 a 5 de la tabla 11

5.2.2. Paquete de post-its

Archivo de medidas	Posición $y_{ob}$
<i>Posicion1.mat</i>	1.075
<i>Posicion2.mat</i>	1.075
<i>Posicion3.mat</i>	1.0637
<i>Posicion4.mat</i>	1.0637
<i>Posicion5.mat</i>	1.0637

Tabla 12. Posición  $y_{ob}$  para el paquete de post-its a 300 GHz



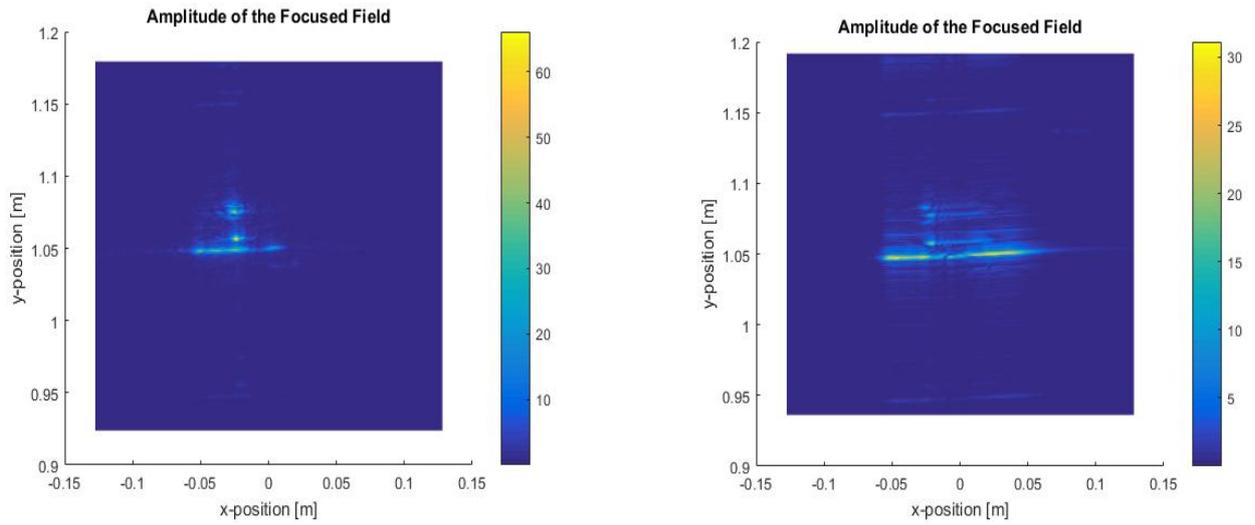


Figura 5.14. Campo enfocado del paquete de post-it a 300 GHz. En la página anterior, de izquierda a derecha y empezando por arriba, las medidas 1 a 3 de la tabla 12. En la página actual, las medidas 4 y 5 de la antedicha tabla.

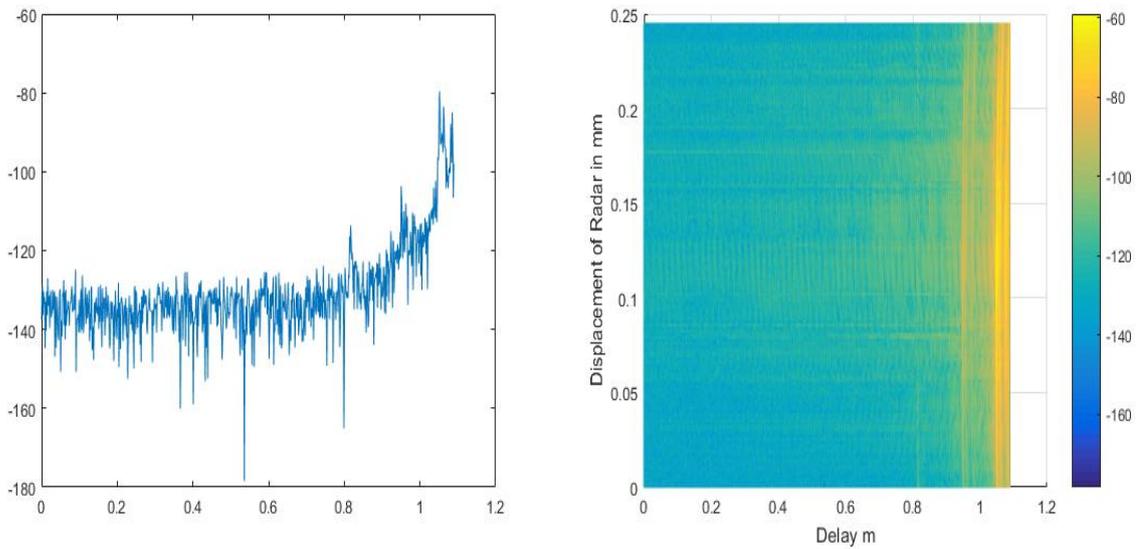


Figura 5.15. PDP y corte transversal obtenido para el archivo de medidas del paquete post-it a 300 GHz, perteneciente al archivo de medidas 'Posicion1.mat'

5.2.3. Caja vacía

Archivo de medidas	Posición y_ob
<i>Medidas150__8192-2016-10-26-204059.mat</i>	1.05821
<i>Medidas150__8192-2016-10-26-213907.mat</i>	1.0664
<i>Medidas150__8192-2016-10-27-101222.mat</i>	1.0664
<i>Medidas150__8192-2016-10-27-111111.mat</i>	1.0675

Tabla 13. Posición y\_ob para la caja vacía a 300 GHz.

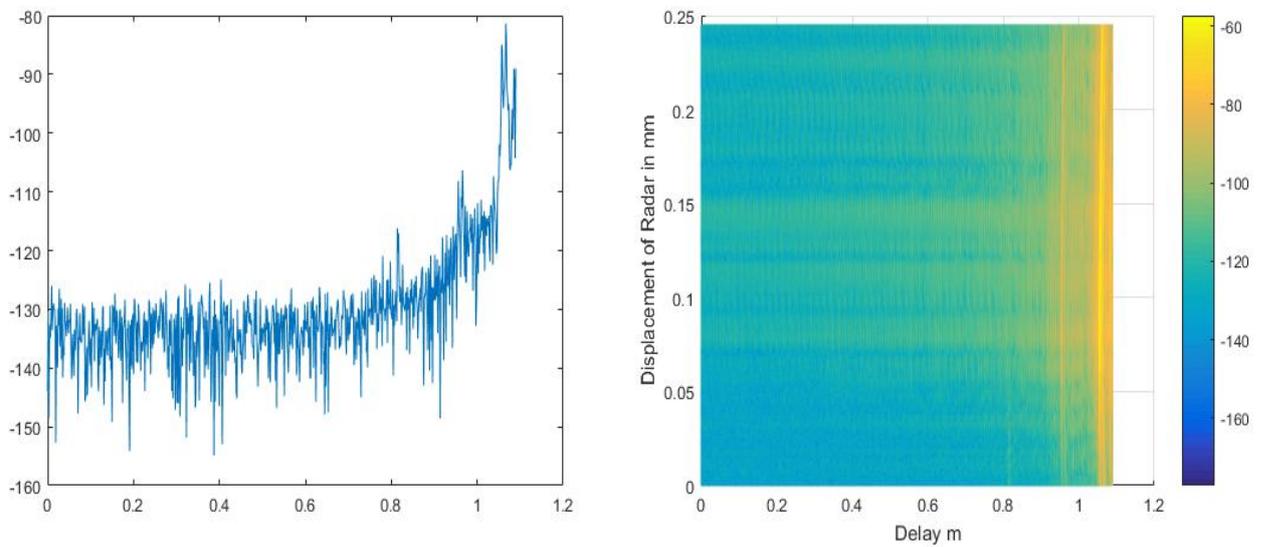


Figura 5.16. PDP y corte transversal obtenido para el archivo de medidas de la caja vacía a 300 GHz 'Medidas150\_\_8192-2016-10-26-213907.mat'

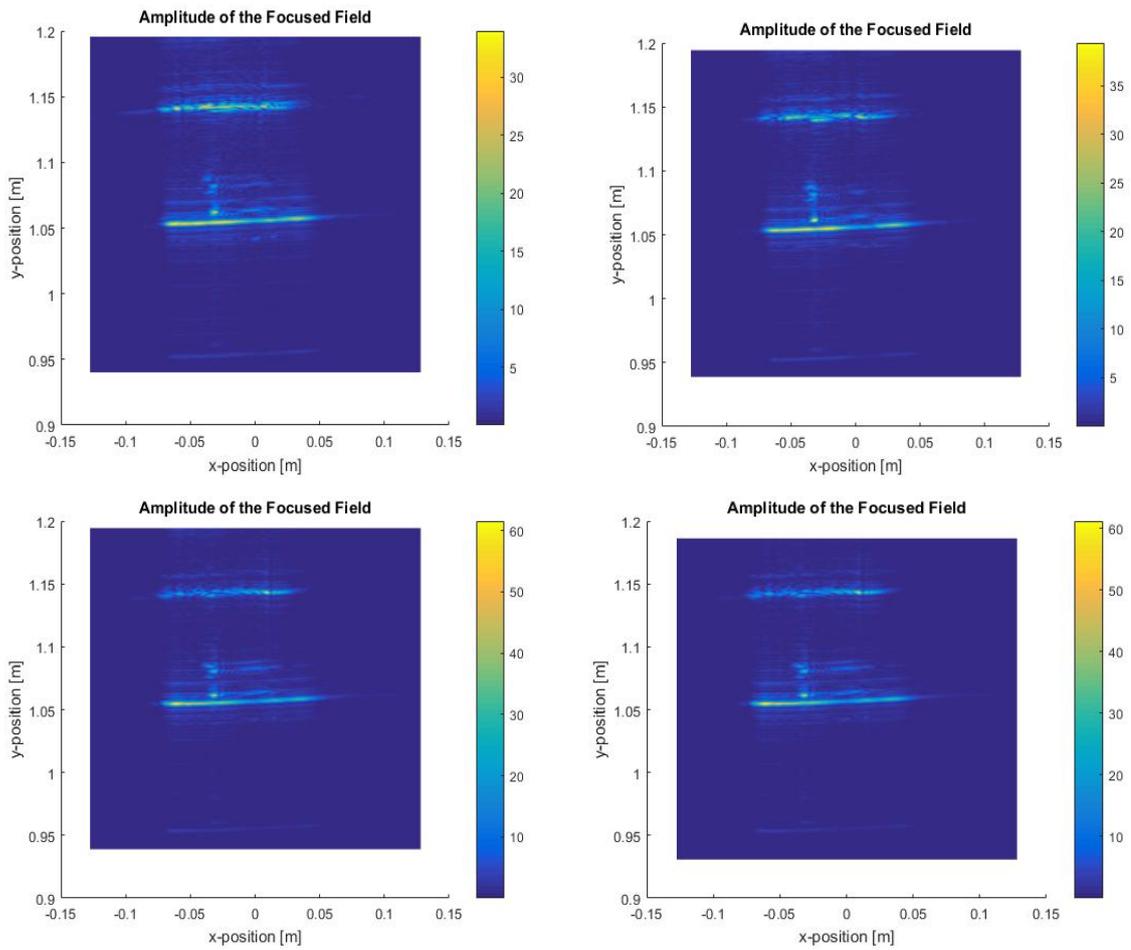
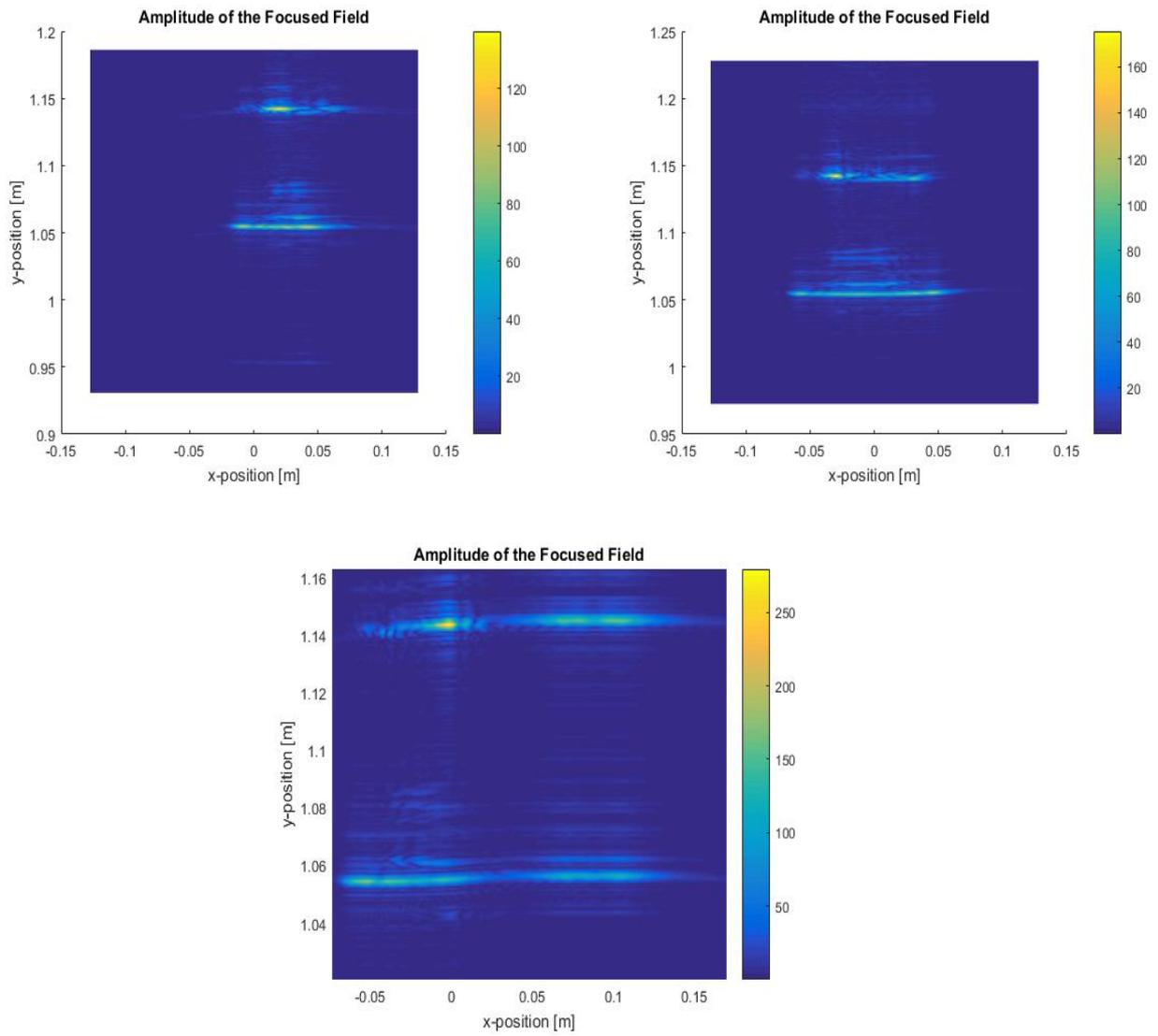


Figura 5.17. Campo enfocado de la caja vacía a 300 GHz. De izquierda a derecha, y empezando por arriba, resultados correspondientes a las medidas 1 a 4 de la tabla 13.

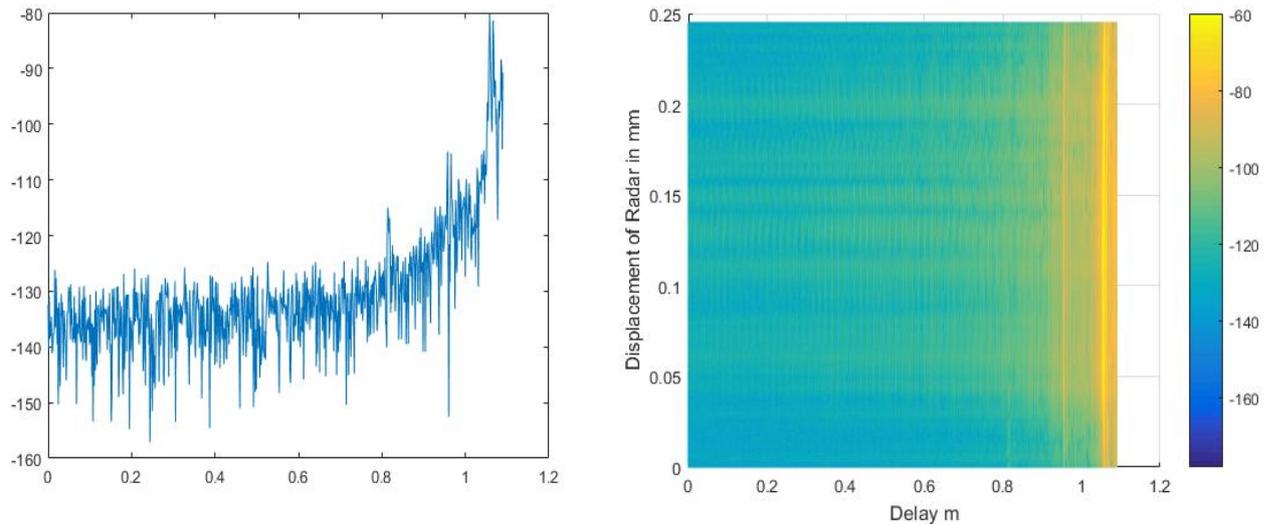
#### 5.2.4. Caja con pelota

Archivo de medidas	Posición $y_{ob}$
<i>Medidas300__8192-2016-10-27-163703.mat</i>	1.0582
<i>Medidas500__8192-2016-10-27-204347.mat</i>	1.058175
<i>Medidas500__8192-2016-10-28-001552.mat</i>	1.0582

Tabla 14. Posición  $y_{ob}$  para la caja con pelota a 300 GHz.



*Figura 5.18. Campo enfocado de la caja con pelota a 300 GHz. De izquierda a derecha y empezando por la parte superior, resultados obtenidos para las medidas 1 a 3 de la tabla 14.*



*Figura 5.19. PDP y corte transversal para el archivo de medidas de la caja con pelota a 300 GHz 'Medidas500\_\_\_8192-2016-10-27-204347.mat'*

La principal diferencia apreciable con las imágenes obtenidas trabajando con la frecuencia de 100 GHz, es que la resolución es mucho menor y por tanto la imagen se obtiene con mayor nitidez, haciendo la forma de los objetos más claramente identificable. Esto se debe a que cuando la frecuencia es 300 GHz, la longitud de onda es menor.

Tal y como ocurría a la frecuencia de 100 GHz, en el caso de los objetos rectangulares se reconstruyen perfectamente las líneas paralelas al eje x (no así las paralelas al eje y), y en el caso del cubo cilíndrico verde, la mitad superior. Para este último objeto, además, se aprecia mucho mejor la forma y el lateral iluminado, ya que al existir una menor resolución la potencia dispersada por la sección recta radar es mucho menor y, por tanto, el objeto se identifica con más facilidad.

También dentro del cubo verde, aparecen en esta frecuencia dos imágenes que recuerden vagamente a una especie de torbellino y que suponemos puedan ser una muestra del lateral del cubo al ser enfocado por el equipo en un determinado ángulo.

En cuanto al paquete de post-its, sólo podemos enfocar con nitidez la cara más cercana al equipo de medidas, mientras que la otra cara se presenta muy borrosa. Esto es debido al gran grosor existente entre las mismas, que tal y como se explicó en las medidas de 100 GHz, absorbe gran parte de la potencia e impide la visión nítida de la cara posterior. Esta vez, además, se aprecia que todas las medidas fueron tomadas con el equipo alineado con el centro de la caja, dado que no se aprecia ninguna cara lateral.

En lo relativo a la caja, tanto llena como vacía, no existen más diferencias con respecto a las medidas de 100 GHz que la nitidez de las imágenes y el área que ocupa la mancha que representaría la pelota, que ahora se ve con una forma ligeramente rectangular, quizá debido a la potencia que es capaz de devolver al equipo a esta nueva frecuencia. Aunque realmente, en todas las imágenes se aprecia la mancha, lo cual provoca que sea difícil discernir si realmente se hizo alguna medida con la caja vacía.

Finalmente, respecto al PDP obtenido, las imágenes, a diferencia de lo ocurrido a 100 GHz, muestran un único pico de potencia, que coincide con la posición donde está centrado el objeto. Posiblemente, se deba, como ya se dijo, a la menor resolución al tener una menor longitud de onda a 300 GHz, lo que provoca que ahora mediante el PDP no seamos capaces de averiguar las dimensiones del objeto.

### 5.2.5. Varios elementos

Procedemos, por último, a analizar las medidas tomadas para Varios elementos. El archivo es el mismo que el empleado en las medidas a 100 GHz, por lo que ahora sólo hemos de cambiar las frecuencias por el rango utilizado para medir a 300 GHz, y aumentar el número de puntos de enfocado en el eje x lo suficiente para poder enfocar correctamente los 89.5 cm. Pero esto va a introducir un retardo muy importante en la ejecución del algoritmo, por lo que se ha optado por disminuir el número de puntos de enfocado en el eje y, y tomar la distancia entre punto y punto ( $d_{fc}$ ) como  $\lambda = 0.001$  m. Aun así, el tiempo de ejecución con los parámetros de la tabla 10 rondaba las 24 horas.

La imagen obtenida es esta:

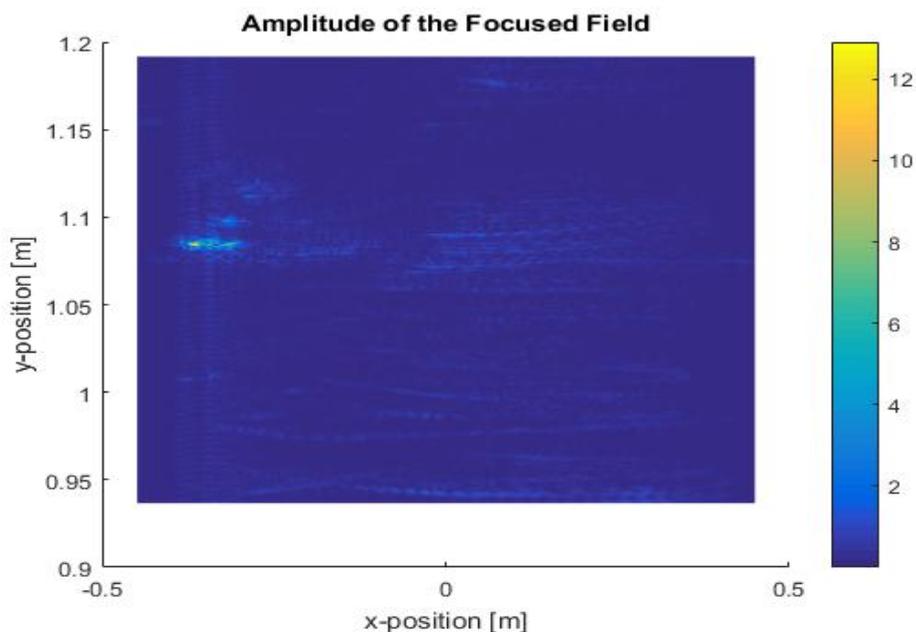
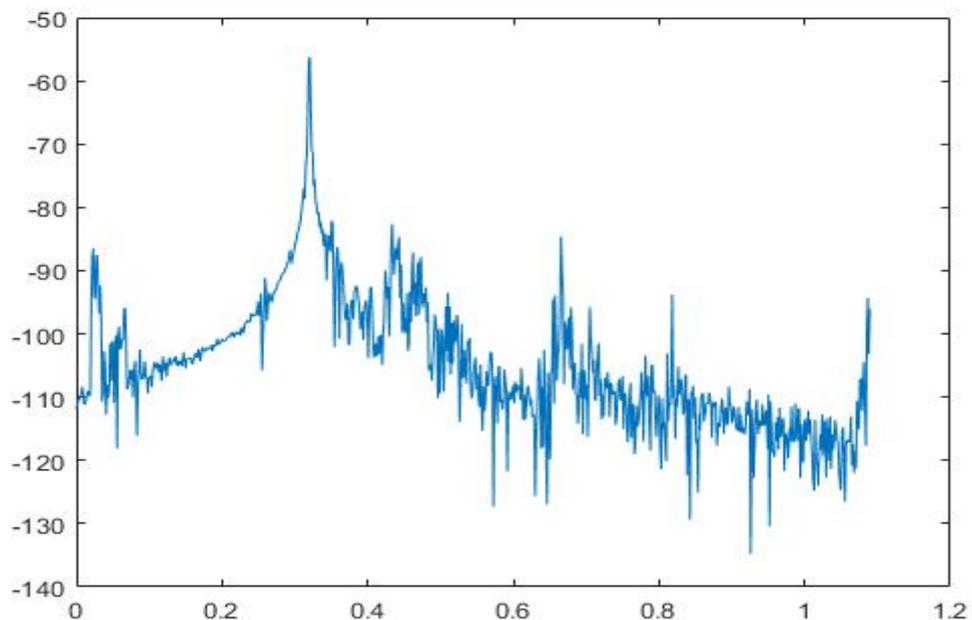


Figura 5.20. Campo enfocado para varios elementos a 300 GHz

Tal como se aprecia, a duras penas se detecta un pico de potencia en el extremo izquierdo de los objetos y unas líneas extremadamente suaves que corresponden a los objetos de forma cilíndrica, tal y como ocurría a 100 GHz. Lo novedoso es que no parece detectar con coherencia la forma de los objetos. Esto posiblemente se deba o bien a la menor resolución de la frecuencia superior, o bien a algún tipo de problema al establecer el área de enfocado. En futuros proyectos, además, aparte de esto es necesario mejorar y optimizar el algoritmo para evitar tiempos de ejecución tan altos.

En cuanto al ejemplo del PDP, se muestra en la figura 5.21. En la misma se aprecia el pico de potencia en la posición donde estaría el cartón rectangular, y la menor potencia que presentan los objetos cilíndricos



*Figura 5.21. PDP para varios elementos a 300 GHz.*

### Resumen del capítulo

En este capítulo, se han presentado las imágenes y dimensiones obtenidas tras la ejecución de los algoritmos MATLAB sobre los archivos de medida en ambas frecuencias. Se comentan, asimismo, dichos resultados y se hace una comparativa entre los mismos, resultando que las imágenes y la detección de formas son mejores a la frecuencia superior.



# Capítulo 6

## *CONCLUSIONES*

Como cierre de este trabajo, es hora de comprobar si para cada una de las dos frecuencias estudiadas, hemos cumplido los objetivos propuestos en el capítulo 1.

- ¿Qué se ha realizado en este trabajo?

En este trabajo, se ha implementado mediante algoritmos en MATLAB una técnica de Imaging a altas frecuencias para el análisis de unas medidas realizadas a 100 y 300 GHz sobre una serie de objetos de forma variada.

- ¿Qué resultados se obtienen?

Tanto a 100 GHz como a 300 GHz se ve claramente que somos capaces de reconstruir las líneas de los objetos paralelas al eje x, pero no las del eje y (aunque sí se detecta potencia en los laterales correspondientes a esas paralelas, tal y como muestran los PDP del anexo A). Dependiendo de la forma del objeto y de la frecuencia que estemos empleando, se podrán ver imágenes con menor o mayor nitidez. Para según qué aplicaciones puede ser más recomendable el uso de la frecuencia de 300 GHz, al ser ésta la que obtiene la mejor calidad de imagen y detección de formas que no sean rectangulares. En Varios elementos, no obstante, apenas somos capaces de discernir las formas de los objetos (1 rectangular y 6 cilíndricos). Es probable que se deba, como ya se dijo, a la dispersión que introducen, o a problemas al establecer el campo de enfocado

- ¿Son los resultados esperados? ¿Qué aplicaciones podría tener la técnica usada en concreto?

Podemos concluir a la vista de las imágenes y los conocimientos teóricos que los resultados obtenidos son los que debían de ser. Analizando además los artículos empleados en el capítulo 2 a la hora de hablar del estado del arte, la aplicación más importante para esta técnica en concreto se resume en escáneres de seguridad en puertos y aeropuertos, así como en detección y visión a través de objetos en paquetería o en operaciones policiales. No podría ser válida para aplicaciones médicas, dado que ni aun aplicando la frecuencia de 300 GHz conseguiríamos una nitidez que cumpla con los importantes requisitos necesarios para tal fin (Poder distinguir bien tumoraciones de los órganos, correcto discernimiento de los distintos órganos, etc.).

- ¿Qué líneas de investigación pueden derivarse de este trabajo?

Las líneas que se pueden derivar de éste trabajo son básicamente dos: Investigación de cómo mejorar la nitidez de las imágenes obtenidas y optimización de los algoritmos de análisis, así como mejora de los set-ups de las medidas. El algoritmo empleado posee la gran desventaja de que, a la frecuencia superior, tardaba mucho en completar el análisis de cada archivo de mediciones (entre 1:30-3 horas, 6 horas para elementos variados y 24 horas en el caso de los 300 GHz para varios elementos, debido a la necesidad de aumentar el área de enfocado), lo cual en aplicaciones críticas es inaceptable. En futuros trabajos, se podría hacer especial hincapié en investigar en aplicación de una técnica que reduzca el tiempo de análisis y optimice el algoritmo.

- ¿Se han alcanzado los objetivos? ¿Qué ha supuesto la realización de éste trabajo?

A la vista de los resultados obtenidos, podemos decir que los objetivos perseguidos en la realización de este trabajo se han alcanzado con creces. El equipo utilizado para las medidas ha funcionado como se esperaba, y tanto la obtención de las imágenes como el análisis de los resultados cumplen con lo esperado y predicho por otros artículos. Básicamente, lo que se buscaba era ver si estas frecuencias eran capaces de mostrar la forma de todo tipo de objetos de manera correcta y visto lo visto, podemos decir que ese objetivo se ha conseguido.

La consecución de dichos objetivos ha supuesto para el autor una mayor profundización en conceptos y conocimientos vistos en la asignatura de Sistemas de Radar del Máster y poder ponerlos en práctica de manera más realista que en las prácticas de la asignatura (los conceptos aquí tratados guardan una gran relación con los contenidos de la asignatura), así como la adquisición de otros conceptos desconocidos hasta la fecha, al haber realizado previamente los estudios de Grado de la otra rama.

### Resumen del capítulo

Finalmente, en este último capítulo, se abordan las conclusiones más relevantes del proyecto respondiendo a las preguntas más frecuentes que pueden surgir al leer esta memoria, y se pone de manifiesto lo que ha supuesto para el autor la realización de este proyecto.

# Anexo A. Muestras y cortes de los mapas de potencia a 100 GHz.

Se muestran en el presente anexo algunas de las imágenes del PDP y los cortes transversales que indican el desplazamiento del radar a la frecuencia de 100 GHz. Se ha seleccionado para cada objeto 2-3 muestras relativas a otras tantas medidas, excepto para *Varios elementos*, donde ya se vio su correspondiente PDP en el capítulo 5, al incluir sólo una medida.

## A.1. PDP del cubo verde

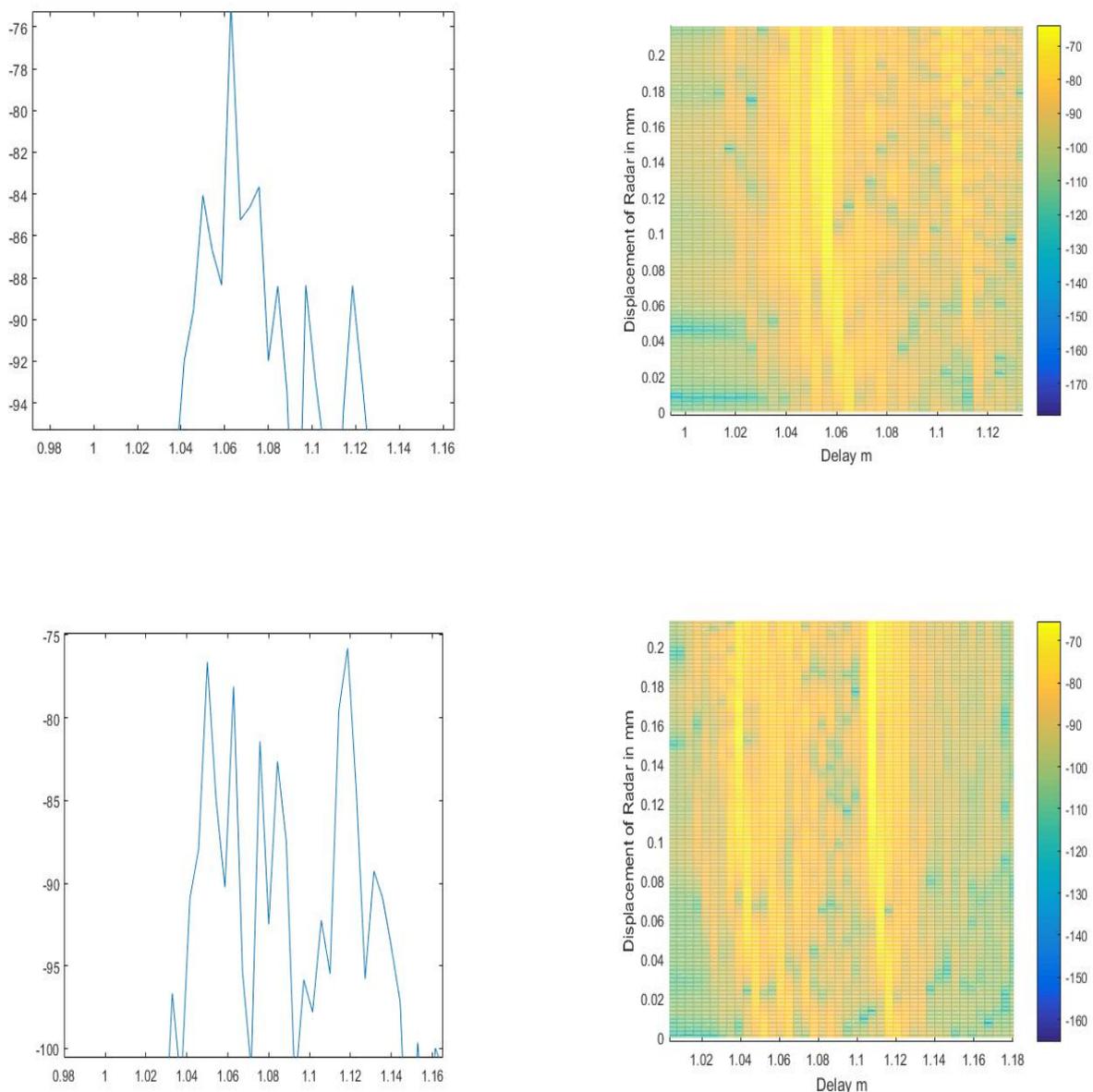
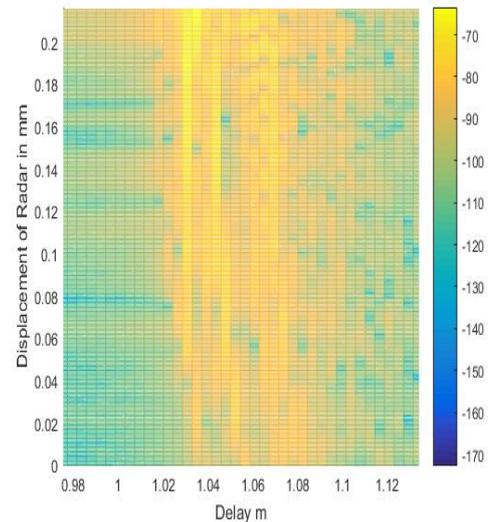
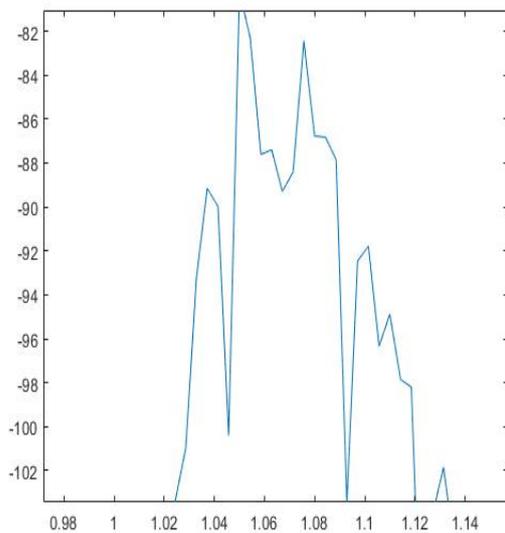
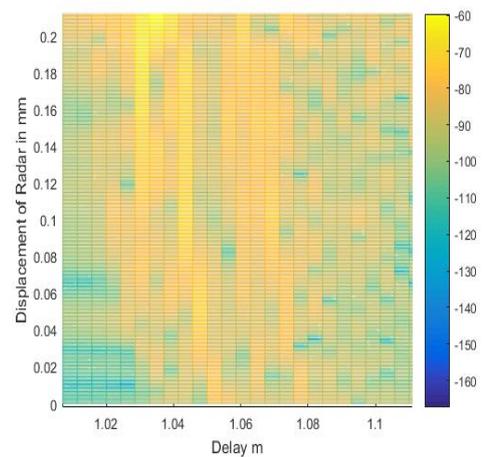
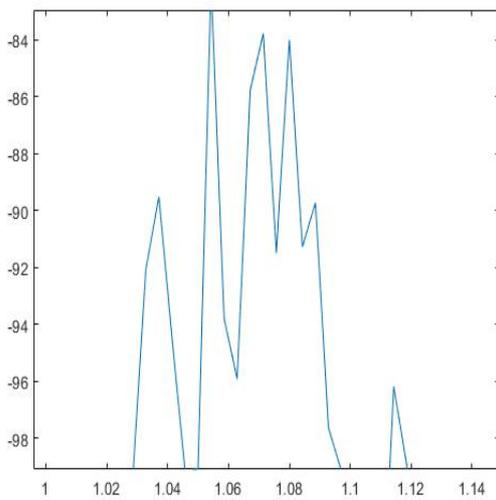


Figura A.1. PDP de varias medidas del cubo verde y cortes transversales que muestran el desplazamiento del radar.

En el caso del cubo verde, estas imágenes se corresponden con el cuarto y el primer archivo de medidas de dicho objeto. Se puede ver como los picos del PDP coinciden con los valores tabulados en el capítulo 5, cómo el PDP sigue una línea continua donde las zonas con menor potencia equivalen a los laterales y líneas paralelas con el eje y, y cómo la distancia entre los picos de potencia coincide con las dimensiones del cubo, con ligeros puntos donde se detecta una leve dispersión.

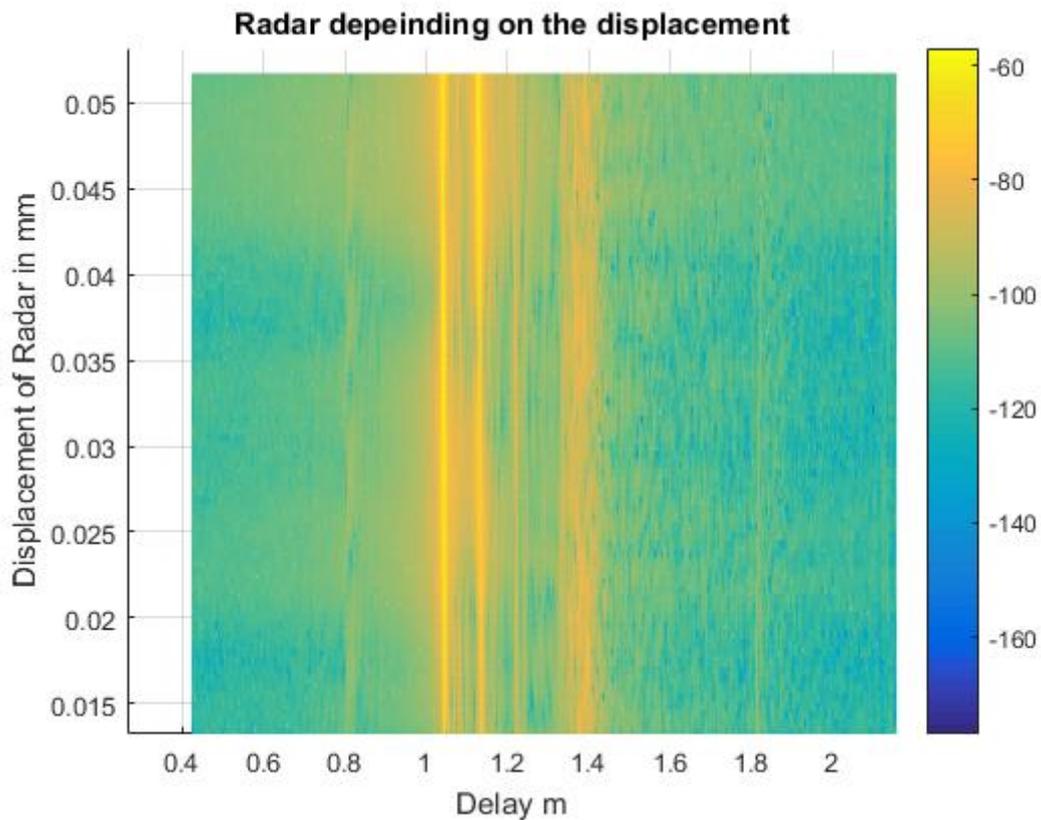
### A.2. PDP del paquete de post-its



*Figura A.2. PDP de diversas medidas del paquete de post-its y sus respectivos cortes transversales que muestran el desplazamiento del radar.*

Como en el caso anterior, hemos tomado de nuevo el PDP y los cortes correspondientes a la primera y a la cuarta medida. En el primer caso, el corte transversal muestra una zona muy unida, lo que concuerda con que sólo detectamos un lateral de la caja (o parte de él) y la cara frontal). En el segundo, demostramos que la medida estaba más centrada, al aparecer ya, aunque de forma muy tenue por el gran grosor del paquete, la cara posterior. Y como en los casos anteriores, que el PDP exceda las dimensiones del objeto se debe a la dispersión provocada por los laterales, que se suma de manera continua como si lo midiera en un único eje.

### A.3. PDP caja vacía



*Figura A.3. Corte transversal del PDP para la caja vacía*

En la caja vacía hemos optado por mostrar una única imagen, que en este caso es la de la cuarta medida. Es fácilmente comprobable como se muestran tanto la cara anterior como la posterior (ésta con un poco menos de potencia) y cómo la separación entre las mismas coincide con las dimensiones del objeto que anotamos en el capítulo 4.

#### A.4. PDP caja con pelota

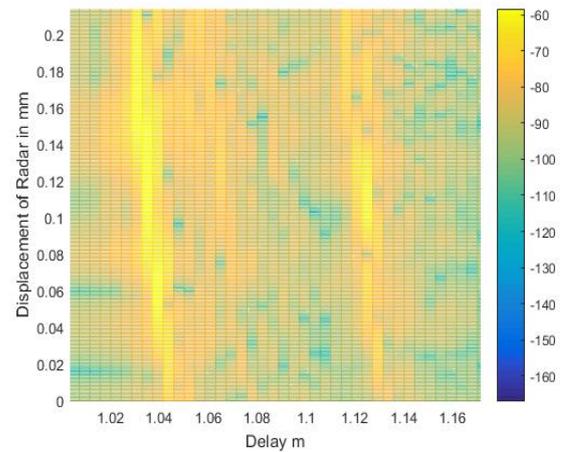
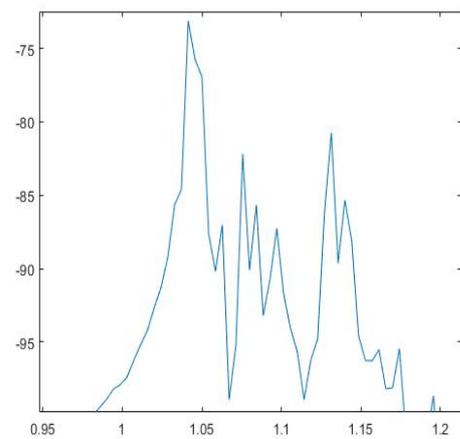
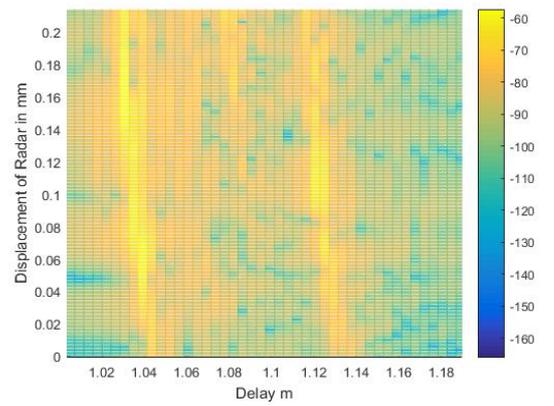
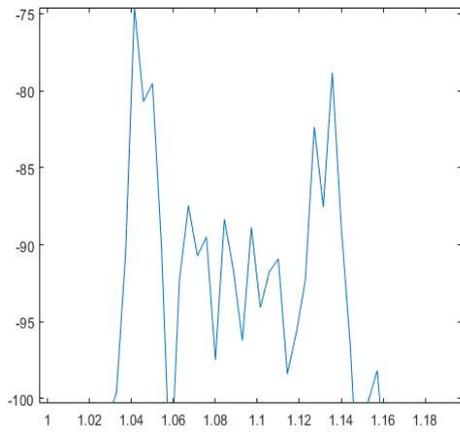
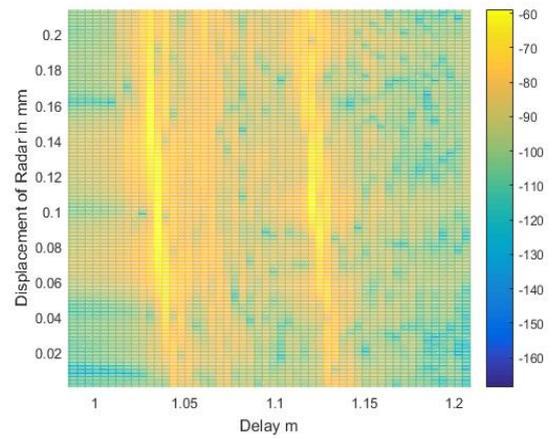
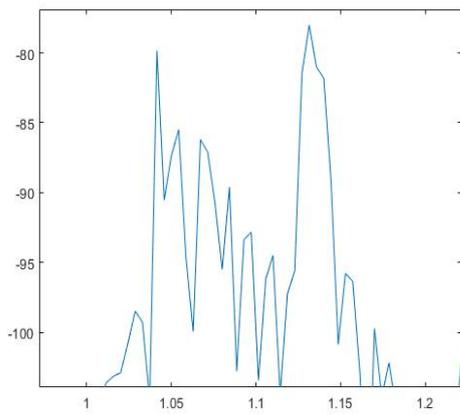


Figura A.4. PDP de diversas medidas de la caja con pelota y sus cortes transversales.

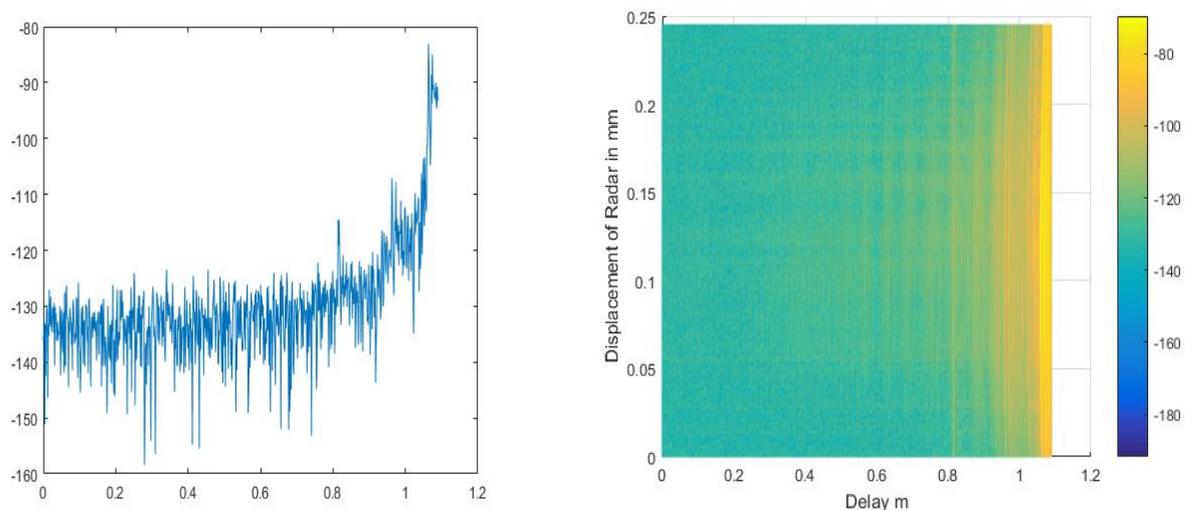
Finalmente, para la caja con pelota hemos seleccionado tres medidas, que corresponden con la primera, la quinta y la séptima. Es fácilmente apreciable ver que la distancia entre los picos de potencia en el PDP corresponde a las dimensiones del objeto, y que los pequeños picos intermedios corresponden tanto a la potencia dispersada por la pelota como a la que se refleja en las paredes interiores de la caja. Y como ocurría en los casos anteriores, el PDP a lo largo del eje x lo muestra como una única línea de potencia.



# Anexo B. Muestras y cortes de los mapas de potencia a 300 GHz.

A continuación, se mostrarán algunos cortes de los mapas de potencia a 300 GHz para todos los objetos, salvo para *Varios elementos*, del que, al existir sólo una medida, ya se ha tratado en su correspondiente epígrafe en el capítulo 5.

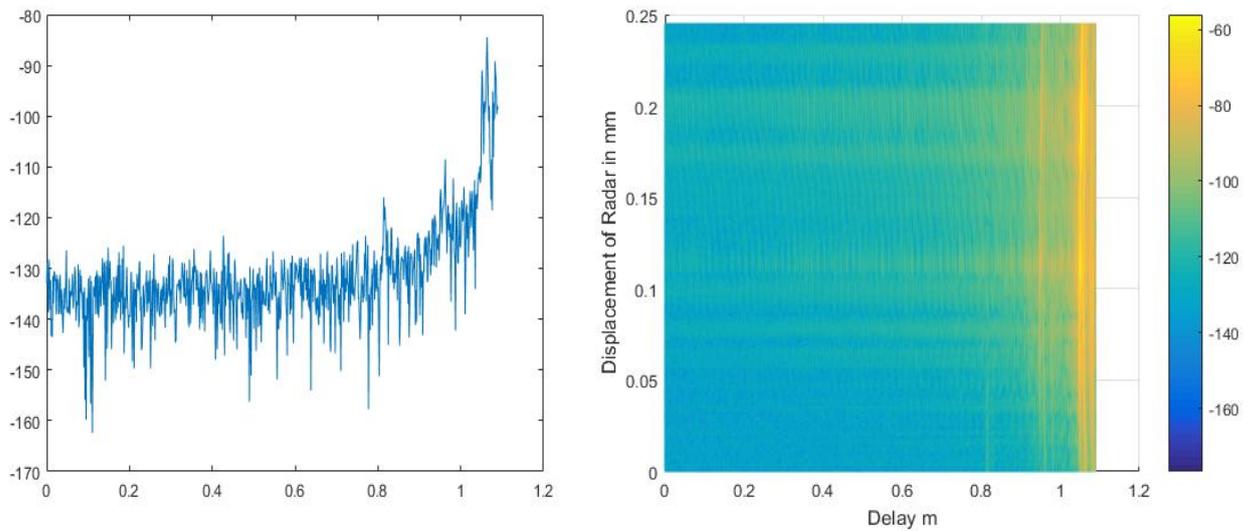
## B.1. Cubo verde



*Figura B.1. PDP y corte transversal del mismo para el archivo de medidas 'medidas150\_\_\_8192-2016-10-26-174126.mat'*

La imagen B.1. se corresponde con el tercer archivo de medidas de la tabla 10 (capítulo 5). Se puede comprobar fácilmente cómo ahora sólo tenemos un pico de potencia que corresponde a la posición donde está el objeto situado. Tal y como se explicó en el capítulo 5, es posible que se deba a la menor resolución obtenida al tener una menor longitud de onda.

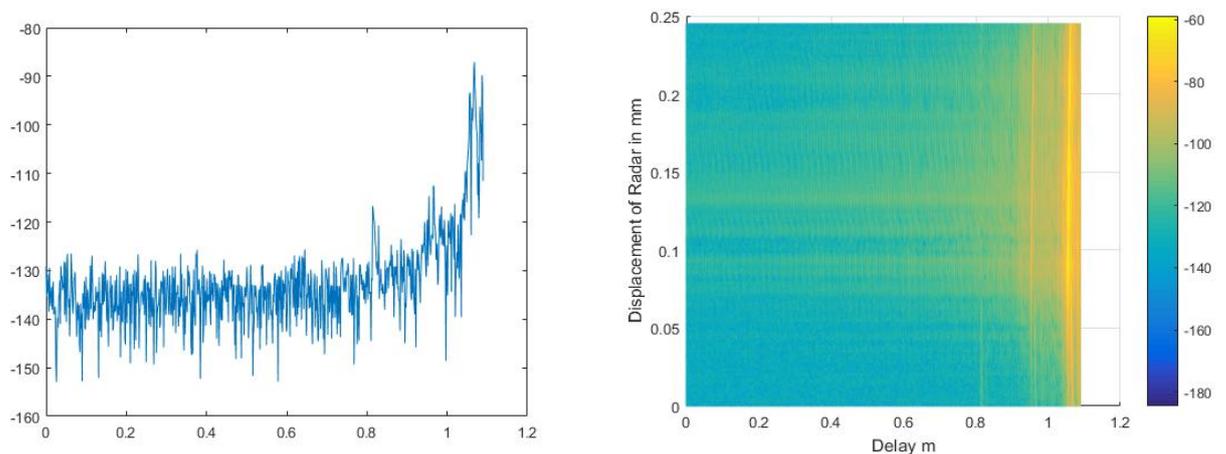
### B.2. Paquete de post-it



*Figura B.2. PDP y corte transversal para el archivo de medidas 'Posicion3.mat'*

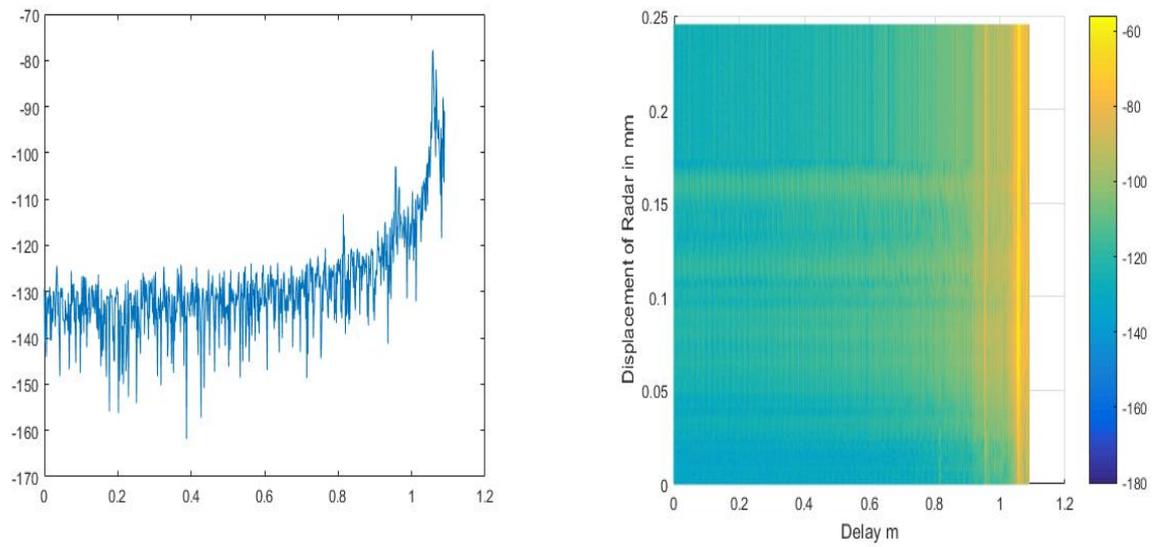
No se aprecia nada fuera de lo común que ya viéramos en el PDP de 100 GHz. Este objeto es el que tiene menor valor de PDP debido a su gran grosor entre caras y al estar recubierto de un material aislante. Como en el caso anterior, y en los casos subsiguientes, ahora el PDP nos marca el punto donde está situado el objeto.

### B.3. Caja de cartón vacía



*Figura B.3. PDP y corte transversal para el archivo de medidas 'medidas150\_\_8192\_2016-10-27-111111.mat'*

#### B.4. Caja con pelota



*Figura B.4. PDP y corte transversal para el archivo de medidas 'medidas500\_\_\_8192\_2016-10-28-001552.mat'*

Finalmente, en la caja de cartón, tanto vacía como con la pelota en su interior, tampoco se aprecia nada nuevo. Sí se ve que la caja con pelota tiene un mayor PDP que la caja vacía, pero probablemente se deba a la suma del PDP de la pelota, en diferencia a cuando no está. Como siempre, el PDP ahora indica la posición del objeto.



# Anexo C. Ejemplo de análisis de las medidas mediante la técnica de Beamforming.

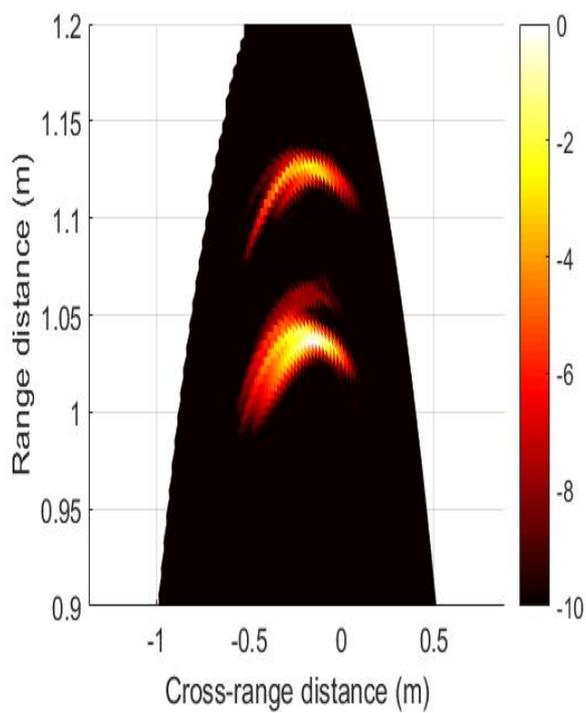
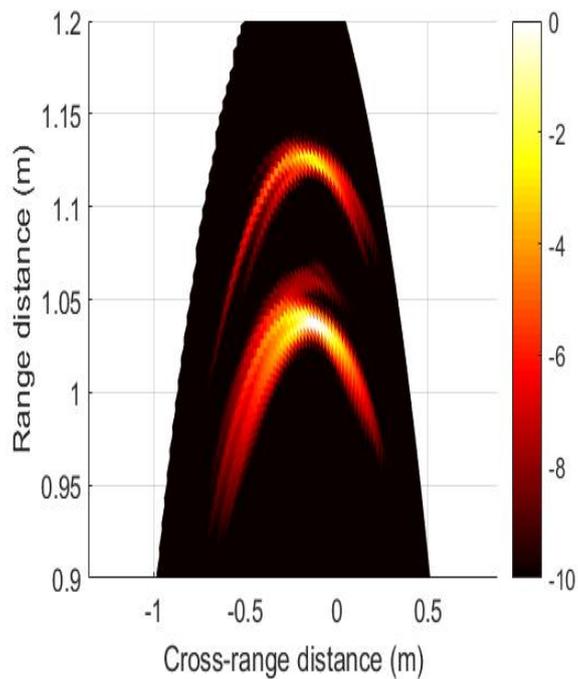
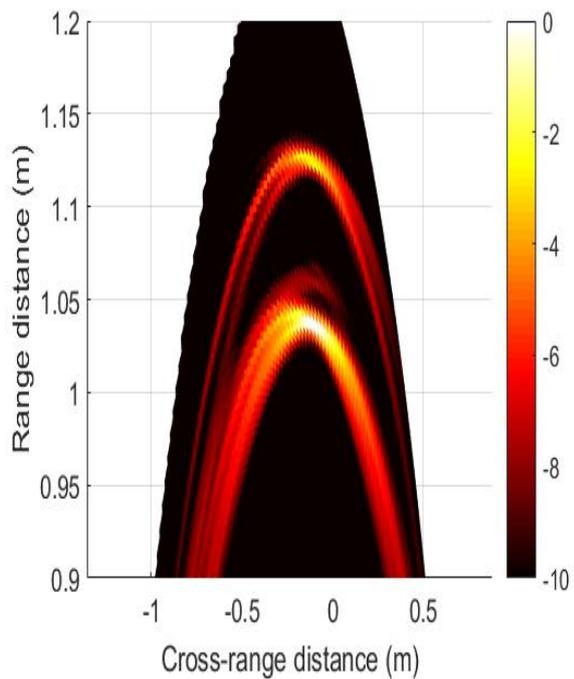
En el presente anexo se va a mostrar un intento de análisis de las medidas obtenidas utilizando la técnica de beamforming. Se utilizó para ello un algoritmo MATLAB que implementaba la técnica y para comprobar los posibles efectos, se iba variando el número de antenas que utilizaba el array.

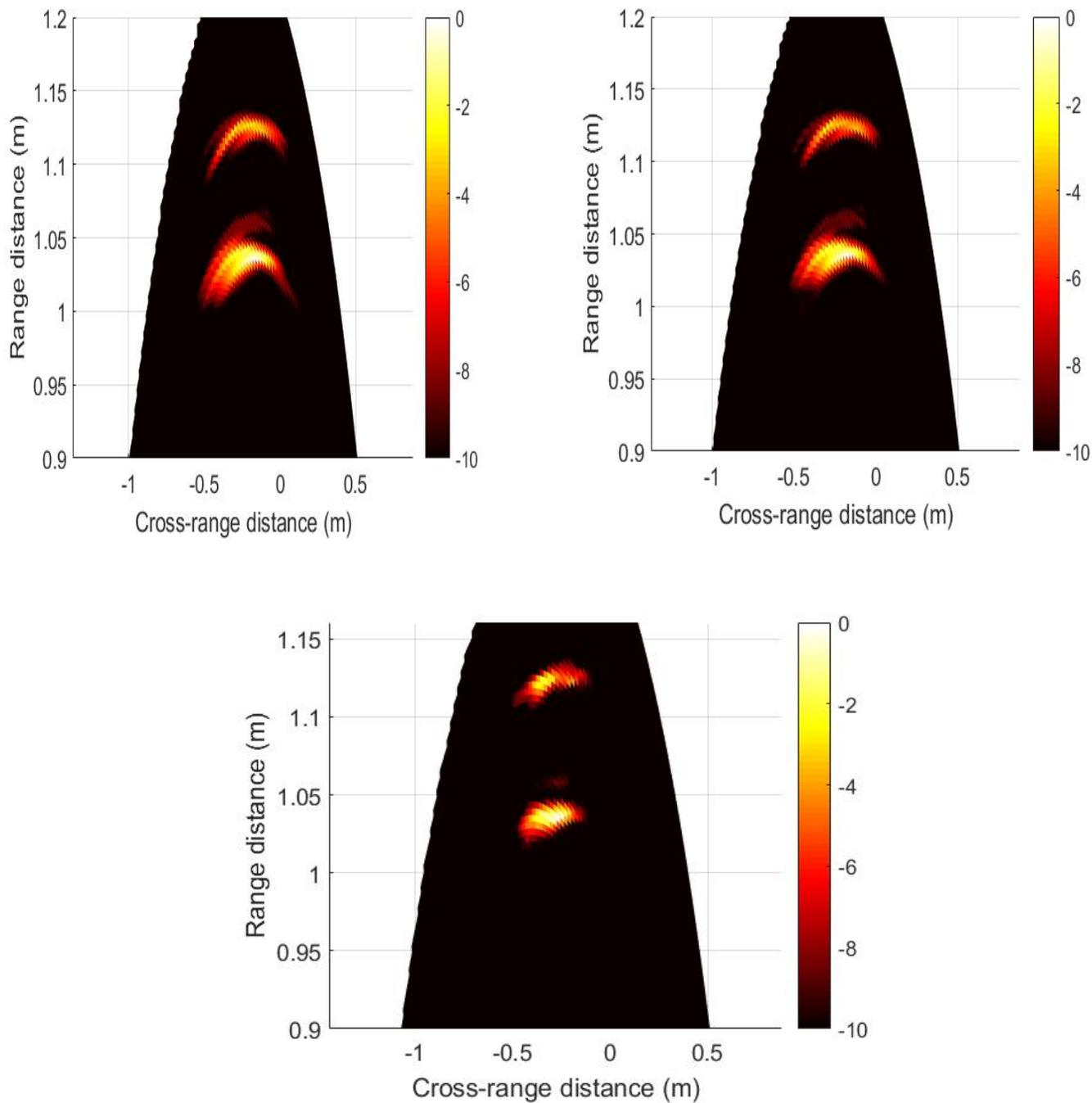
El algoritmo en sí tenía bastante complejidad pese a las pocas líneas de código. Creaba una apertura sintética cuyo tamaño dependía del número de sub-antenas  $MR_{sub}$ , y calculaba la posición inicial mediante la transformada de Fourier de la matriz de posiciones del archivo de medidas.

Posteriormente, truncaba el PDP del objeto a una distancia de alrededor de 1 metro, efectuaba la transformación de las coordenadas X e Y y finalmente procedía a obtener la imagen del siguiente modo:

- Recorría el array sintético de antenas creado para el bi-focusing.
- Tomaba como centro del objeto el valor absoluto de la posición del subarray sintético.
- Desplazaba el mapa de potencia hacia el centro calculado del objeto.
- Efectuaba la interpolación del nuevo mapa
- Finalmente, sumaba el mapa interpolado al anterior para devolver el nuevo mapa de potencia.

Como objeto de control de esta técnica, se utilizó la caja vacía empleando uno de los archivos de medida a 100 GHz. En concreto, se usó el archivo '*medidas240\_\_8192-2016-11-11-141035.mat*' como medida de control para comprobar si esta técnica ofrecía resultados fiables. Se realizaron diferentes mediciones variando el valor del parámetro  $MR_{sub}$  utilizando 2, 5, 11, 15, 20 y como caso extremo, 100 antenas. Las siguientes imágenes muestran los resultados obtenidos:





*Figura C.1. Resultados del beamforming para 2,5,11,15,20 y 100 antenas.*

Como se puede apreciar a la vista de las imágenes, conforme va aumentando el número de antenas del sub-array, más se va centrando la imagen y dispersando menos potencia hasta llegar a enfocarla toda en el objeto. Se puede apreciar cómo somos capaces de detectar la cara anterior y posterior de la caja, llegando prácticamente en la medida con 100 antenas a no detectar otra cosa.

Pero desgraciadamente, para los propósitos y objetivos trazados en este trabajo, estos resultados no eran ni viables ni concluyentes, ya que somos capaces de detectar un objeto, pero no su forma. Sabemos que en los puntos de color amarillo hay algo, pero no existe forma de saber qué es ese algo en concreto. Esto hace esta técnica inaplicable en un sistema de imaging para los propósitos que le queremos dar, y, por consiguiente, tuvo que descartarse, quedándonos únicamente con la técnica ya vista en la parte principal del trabajo. Se utilizó únicamente un objeto y una medida para comprobar si la técnica funcionaba adecuadamente y no existían resultados erróneos.

# Bibliografía

Se lista a continuación, la bibliografía empleada para la realización de este proyecto.

- [1] Henry, Samuel C., “*3-D Terahertz Synthetic-Aperture Imaging and Spectroscopy*” (2013). *Dissertations and Thesis*. Paper 693.
- [2] Moreira, A. “*Synthetic Aperture Radar. Principles and Applications*” (2013). German AeroSpace Center - Microwaves and Radar Institute.
- [3] Albaladejo, P. “*Implementación de un sistema para la automatización de medidas del Canal Radio a 94 GHz*” (2015). TFG Universidad Politécnica de Cartagena.
- [4] Martínez Inglés, M.T., Molina García-Pardo, J.M., Jofre, L., Romeu, J. “*Sistema UWB Monoestático de Formación de Imagen en Campo Próximo a Frecuencias Milimétricas*” (2017). Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [5] Guillet, J.P., Recur, B., Frederique, L., Bousquet, B., Canioni, L., Manek-Hönniger, I., Desbarats, P., Mounaux, P. “*Review of Terahertz Tomographic Techniques*” (2014).
- [6] Hu, B.B., Nuss, M.C., “*Imaging with terahertz waves*” (1995). *Optics Letters*.
- [7] Zhang, X.C., Jiang, Z.P., “*Terahertz imaging via electrooptic effect*” (1999). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.
- [8] Nahata, A., Yardley, J.T., Heinz, T.F., “*Two-dimensional imaging of continuous-wave terahertz radiation using electro-optic detection*” (2002). *Applied Physics Letters*.
- [9] Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., Papathanassiou, K.P., “*A tutorial on Synthetic Aperture Radar*” (2013). German Aerospace Center – Microwaves and Radar Institute.
- [10] Bara, M., Cachón, J., Broquetas, A., Crespo, J.C., “*Procesado de imágenes SAR aerotransportado con compensación de movimiento*” (1997). Universidad Politécnica de Cataluña – Universidad Politécnica de Madrid.
- [11] Jehanzeb, B., Touseef, A., Shahzad, A., “*Vector Network Analyzer based on Synthetic Aperture Radar Imaging*” (2013) IEEE – National University of Science and Technology, Pakistan.
- [12] Yang, X., Petropoulou, A., “*SAR Imaging using the Sparse Fourier Transform*” (2016). Department of Electrical and Computer Engineering – State University of New Jersey.

- [13] Grajal, J., Badolato, A., Rubio-Cidre, G., Úbeda-Medina, L., Mencia-Oliva, B., Garcia-Pino, A., González-Valdés, B., Rubiños, O., “*3-D High Resolution Imaging Radar at 300 GHz with Enhanced FoV*” (2015) IEEE Transactions in Microwave Theory and Techniques.
- [14] Shengming, G., Chao, L., Xiang, G., Zhaoyang, S., Guangyou, F., “*Terahertz Aperture Synthetized Imaging with Fan-Beam Scanning for Personnal Screening*” (2012) IEEE Transactions in Microwave Theory and Techniques.
- [15] Hu, H., Karim, M.F., Ong, L.C., Leyman, A.R., Luo, B., Chiam, T.M., Guo, Y.X., Zhu, X.H., “*Millimeter Wave Using SAR Imaging Modeling*” (2013) School Of Electric Engineering and Optoelectronic Techniques (Nanjing, China) – Institute for Infocomm Research (Singapur) – Department of Electrical and Computer Engineering (National University of Singapur, Singapur)
- [16] Kim, Y.J., Jofre, L., De Flaviis, F., Feng, M.Q., “*Microwave Reflection Tomographic Array for Damage Detection of Civil Structures*” (2003) IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
- [17] Mathuranathan, V. “*Power Delay Profile*” (2014) Online, disponible en <http://www.gaussianwaves.com/2014/07/power-delay-profile/>
- [18] <https://www.rohde-schwarz.com>
- [19] Molina García-Pardo, J.M., “*Resumen Campaña de medidas*” Documento interno contenido en los archivos facilitados al autor.
- [20] <https://www.flann.com>

# Índice de figuras

<i>Figura 1.1. Ejemplo de montaje empleado en este trabajo.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1.2. Esquema de las fases del proyecto.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.1. Esquema del aparato de Hu y Nuss.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.2. Esquema de funcionamiento radar apertura sintética.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.3. Esquema procesado muestras SAR.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.4. Diagrama de bloques conexión SAR-Analizador.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.5. Adquisición de datos en el sistema SAR.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.6. Esquema Yang-Petropoulou para implementación de SFT.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.7. Esquema sistema de identificación Yang-Petropoulou.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.8. Comparativa resultados FFT-SFT.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.9. Esquema del radar para técnica de stand-off.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.10. Descripción gráfica de imaging fan-beam.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.11. Esquema transceptor heterodino usado por Gu.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.12. Geometría de Gu para la técnica fan-beam.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.1. Muestra del analizador de redes empleado.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.2. Muestra de cabeza extensora de frecuencia.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.3. Representación esquemática del laboratorio.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.4. Localización equipos de medidas en el laboratorio.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.5. Montaje real del equipo de medidas.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.6. Bocina transmisora y receptora.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.7.a. Posición inicial del equipo para medir el cubo verde.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.7.b. Medición del cubo verde a poca distancia de las cabezas.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.7.c. Medida de las dimensiones del cubo.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.8.a. Posición inicial del equipo para medir el paquete de post-its.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.8.b. Primer plano del paquete de post-its.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.9. Posición inicial para medir la caja vacía.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.9.b. Primer plano de la caja.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.10. Posición inicial de los equipos para medir la caja llena.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.10.b. Primer plano de la pelota.....</i>	<i>58</i>

<i>Figura 4.11. Montaje para los elementos de forma variada.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.1. Campo enfocado para el cubo verde a 100 GHz.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.2. Ejemplo de PDP para el cubo verde.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.3. Campo enfocado para el paquete de post-it a 100 GHz.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.4. Ejemplo de PDP para el paquete de post-it.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.5. Campo enfocado para la caja vacía a 100 GHz.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.6. Campo enfocado para la caja vacía a 100 GHz.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.7. Campo enfocado para la caja con pelota a 100 GHz.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.8. Campo enfocado para la caja con pelota a 100 GHz.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.9. Ejemplo de PDP para la caja con pelota.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.10. Campo enfocado para varios elementos a 100 GHz.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.11. PDP para varios elementos a 100 GHz.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.12. PDP y corte transversal cubo verde a 300 GHz.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.13. Campo enfocado para el cubo verde a 300 GHz.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.14. Campo enfocado para el paquete post-it a 300 GHz.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.15. PDP y corte transversal paquete post-it a 300 GHz.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.16. PDP y corte transversal caja vacía a 300 GHz.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.17. Campo enfocado para la caja vacía a 300 GHz.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.18. Campo enfocado para la caja con pelota a 300 GHz.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.19. PDP y corte transversal caja con pelota a 300 GHz.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.20. Campo enfocado varios elementos a 300 GHz.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5.21. PDP varios elementos a 300 GHz.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura A.1. PDP cubo verde y cortes transversales (100 GHz) .....</i>	<i>91</i>
<i>Figura A.2. PDP paquete post-its y cortes transversales (100 GHz) .....</i>	<i>92</i>
<i>Figura A.3. PDP caja vacía (100 GHz) .....</i>	<i>93</i>
<i>Figura A.4. PDP caja con pelota y cortes transversales (100 GHz) .....</i>	<i>94</i>
<i>Figura B.1. PDP cubo verde y corte transversal (300 GHz) .....</i>	<i>97</i>
<i>Figura B.2. PDP paquete post-it y corte transversal (300 GHz) .....</i>	<i>98</i>
<i>Figura B.3. PDP caja vacía y corte transversal (300 GHz) .....</i>	<i>98</i>
<i>Figura B.4. PDP caja con pelota (300 GHz) .....</i>	<i>99</i>
<i>Figura C.1. Resultados beamforming para número variable de antenas.....</i>	<i>103</i>

# Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 1. Distancia punto-radar en un SAR.....</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 2. Resolución de la huella de la antena.....</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 3. Resolución en azimuth.....</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 4. Ecuación matricial de scattering.....</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 5. Ecuación coeficiente <math>S_{21}</math>.....</i>	<i>23</i>
<i>Ecuación 6. Función de identificación SFT.....</i>	<i>25</i>
<i>Ecuación 7. Función de estimación SFT.....</i>	<i>25</i>
<i>Ecuación 8. Señal en banda base (Fan-beam) .....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 9. Transformada de Fourier 1-D fan-beam.....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 10. Ancho de banda fan-beam.....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 11. Definición matemática algoritmo imaging fan-beam.....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 12. Retardo ida y vuelta antena-objeto.....</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 13. Eco de la señal recibida.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 14. Salida del filtro.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 15. Respuesta de las antenas.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 16. Campo incidente en un punto.....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 17. Operador de centrado.....</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 18. Campo disperso en punto de recepción.....</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 19. Imagen electromagnética del punto de enfocado.....</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 20. Operador de centrado reflejado.....</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 21. Expresión matricial de la imagen electromagnética.....</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 22. Distribución de corriente proporcional al contraste eléctrico.....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 23. Campo disperso creado por la corriente equivalente.....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 24. Función de Green para geometría 3D.....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 25. Campo disperso en antena receptora.....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 26. Expresión matemática proceso de reconstrucción.....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 27. Expresión matemática del PDP.....</i>	<i>40</i>



# Índice de tablas

<i>Tabla 1</i> .....	48
<i>Tabla 2</i> .....	49
<i>Tabla 3</i> .....	49
<i>Tabla 4</i> .....	50
<i>Tabla 5</i> .....	62
<i>Tabla 6</i> .....	63
<i>Tabla 7</i> .....	65
<i>Tabla 8</i> .....	68
<i>Tabla 9</i> .....	72
<i>Tabla 10</i> .....	77
<i>Tabla 11</i> .....	78
<i>Tabla 12</i> .....	80
<i>Tabla 13</i> .....	82
<i>Tabla 14</i> .....	83

