

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 013 899**

51 Int. Cl.:

G01S 13/42

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.07.2013** **PCT/US2013/051970**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.04.2014** **WO14058512**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.07.2013** **E 13828894 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.12.2024** **EP 2898569**

54 Título: **Aparato para la imagenología sintética de un objeto**

30 Prioridad:

28.09.2012 US 201213629849

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:

15.04.2025

73 Titular/es:

BATTELLE MEMORIAL INSTITUTE (100.00%)
902 Battelle Blvd. PO Box 999
Richland, WA 99352, US

72 Inventor/es:

SHEEN, DAVID M.

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 3 013 899 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Aparato para la imagenología sintética de un objeto

5 Referencias cruzadas a solicitudes relacionadas

Esta solicitud reivindica prioridad sobre la solicitud de patente de EE. UU. No. 13/629.849, presentada el 28 de septiembre de 2012 titulada "APARATO PARA LA IMAGENOLOGÍA SINTÉTICA DE UN OBJETO".

10 Campo técnico de la invención

Esta invención se refiere a la imagenología sintética. Más específicamente, esta invención se refiere a un aparato de imagenología sintética que proporciona un muestreo denso y uniforme y un mayor rendimiento de imagenología con bajos niveles de artefactos para matrices con un espaciado moderado entre líneas inicial y un menor número de transmisores y/o receptores.

Antecedentes de la invención

20 Las técnicas holográficas de microondas y ondas milimétricas o de imagenología de apertura sintética se han desarrollado para una amplia variedad de aplicaciones. Estas aplicaciones incluyen la detección de armas ocultas, la imagenología de la sección transversal del radar (RCS), el radar de penetración en el suelo (GPR), la imagenología a través de la pared y de la pared interior, y la evaluación no destructiva. Las técnicas de imagenología desarrolladas son totalmente tridimensionales y suelen funcionar mediante el barrido de un transceptor de radar de banda ancha sobre una apertura planar o cilíndrica, y el uso de técnicas matemáticas para enfocar los datos en una imagen tridimensional. Resulta ventajoso utilizar el enfoque matemático para estas aplicaciones porque permite el uso de grandes aperturas y un funcionamiento de campo cercano extremo, en donde sería inconveniente o imposible utilizar elementos de enfoque físicos como lentes o reflectores. Además, el barrido del transmisor junto con el receptor duplica la resolución con respecto a los transmisores fijos y proporciona una calidad de iluminación superior al utilizar una gran diversidad de posiciones del transmisor.

30 Muchas aplicaciones de imagenología de radar de campo cercano requieren la recolección de datos y la imagenología en tiempo real o casi real. Se ha desarrollado una tecnología de matriz lineal de conmutación secuencial que permite escanear electrónicamente de forma eficaz y a gran velocidad una dimensión de una apertura plana o cilíndrica. Esto se consigue mediante la secuenciación a través de cada elemento o pares de transmisión y recepción mediante redes de conmutación de microondas o de ondas milimétricas conectadas al transceptor del radar. El barrido mecánico a lo largo de la dimensión ortogonal al eje de la matriz completa entonces el muestreo de una apertura bidimensional cilíndrica o plana. A continuación, estos datos pueden reconstruirse utilizando, por ejemplo, algoritmos de imagenología holográfica de banda ancha.

40 *Técnicas de muestreo de matrices lineales*

El método más directo y obvio de exploración a lo largo del eje de la matriz consiste en suponer que cada antena está colocada uniformemente a lo largo del eje de la matriz lineal y puede funcionar simultáneamente como transmisor y receptor. Este escenario se representa en la Figura 1. Se utiliza una red de interruptores para seleccionar secuencialmente cada elemento de antena y utilizarlo después para transmitir y recibir la señal de microondas/ondas milimétricas de banda ancha. Un espaciado de antena de Δ da como resultado un espaciado espacial efectivo de la muestra de Δ . Aunque conceptualmente sencilla, esta técnica presenta una serie de inconvenientes. En primer lugar, las antenas deben estar muy espaciadas, normalmente del orden de media longitud de onda ($\lambda/2$) en la frecuencia central para satisfacer el criterio de muestreo espacial en la apertura. Esto obliga a que las antenas sean muy pequeñas, y por lo tanto de baja ganancia, y con frecuencia causará problemas de acoplamiento entre antenas adyacentes o vecinas. Un problema adicional es que el transceptor de microondas/ondas milimétricas debe ser capaz de separar la señal de transmisión de la señal de recepción. Esto es posible utilizando acopladores direccionales o circuladores, sin embargo, éstos introducen pérdidas adicionales y no aíslan perfectamente la señal recibida más débil de la señal transmitida mucho más fuerte.

55 Una técnica más práctica y eficaz separa el sistema en dos matrices lineales. Una matriz está dedicada como una matriz de transmisión, y la otra matriz está dedicada como una matriz de recepción. Las matrices de transmisión y recepción tienen un espaciado entre elementos de 2Δ y están desplazadas entre sí en Δ , como se muestra en la Figura 2. Un par de antenas emisora y receptora muestrean aproximadamente el punto espacial situado a medio camino entre los centros de fase de cada antena. Esta aproximación es válida suponiendo que la separación entre antenas emisoras y receptoras sea mucho menor que la distancia al objetivo de dispersión. La matriz se muestrea secuencialmente encendiendo la primera antena transmisora y la primera antena receptora y recolectando la primera muestra espacial. A continuación, se puede encender la segunda antena de transmisión y recolectar la segunda muestra (con la primera antena de recepción aún encendida). A continuación, se enciende la segunda antena receptora (con la segunda antena transmisora aún encendida) para recolectar la tercera muestra espacial. A continuación, este proceso continúa a lo largo de la matriz. El esquema de interruptores se describe en la Figura

2 de la siguiente manera. Los puntos se utilizan para indicar los pares individuales de antenas de transmisión/recepción y las "x" para indicar las ubicaciones de las posiciones de muestreo espacial efectivo. Esta configuración tiene una serie de ventajas sobre la configuración mostrada en la Figura 1. Las antenas están dedicadas a ser transmisoras o receptoras, por lo que no se requiere duplexación en el transceptor. El espaciado de la antena de 2Δ da como resultado un espaciado efectivo de la muestra de Δ . Esto permite utilizar antenas más grandes y reduce el acoplamiento entre ellas. Además, este diseño permite colocar amplificadores dentro de la red de interruptores para compensar las pérdidas de conmutación, algo que no se consigue fácilmente si cada elemento debe actuar como transmisor y receptor. Para adquirir N muestras espaciales se necesitan aproximadamente N antenas en total (N/2 de transmisión y N/2 de recepción). Esta técnica de muestreo es muy eficaz y se ha incorporado a muchos sistemas.

Aproximación cuasi-monostática

El desarrollo de la técnica de muestreo lineal por matrices descrita en la Figura 2 lleva implícita la aproximación cuasi-monostática. Esta aproximación consiste en que las antenas de transmisión y recepción separadas y situadas cerca una de otra funcionan efectivamente como una única antena de transmisión-recepción (TR) colocada en el punto medio de la línea que une los centros de fase de cada antena. Esta aproximación se ilustra en la Figura 3, y requiere que el rango (r) sea mucho mayor que la separación de las antenas (D). Esta aproximación introduce un error de longitud de trayectoria o de fase que no suele ser significativo para la arquitectura de matriz descrita en la Figura 2, pero que será más importante para la arquitectura de matriz multiestática desarrollada en este documento. Este error se debe simplemente a la diferencia de longitud de trayectoria de ida y vuelta entre la trayectoria que emana del punto medio y la trayectoria real de ida y vuelta. Para la configuración general mostrada en la Figura 4, este error de longitud de trayectoria es de

$$\Delta l = r_T + r_R - 2r_c \quad (1)$$

Este error depende de la separación de las antenas y del rango y la posición (ángulo) respecto al objetivo. En general, la posición del objetivo no puede conocerse antes de la imagenología, por lo que este error no puede corregirse por completo; sin embargo, como se describe más adelante en esta sección, el error puede eliminarse en gran medida aproximando la dirección de propagación de las ondas como si fuera a lo largo de los ejes de la antena. Para la configuración mostrada en la Figura 5, el error es

$$\Delta l = 2 \left(\sqrt{r^2 + (\Delta/2)^2} - r \right) \ll \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta}{r} \right)^2 \quad (2)$$

que es pequeño para $\Delta \ll r$. En muchos casos, este error puede hacerse pequeño, y en la configuración de la matriz que se muestra en la Figura 2, este error es insignificante debido a que es idéntico para cada ubicación efectiva de la muestra y, por lo tanto, no afecta al enfoque. En este caso, es posible que sólo se observe un error muy leve de posición de rango.

Técnica de muestreo de matriz lineal entrelazada

La técnica de muestreo descrita anteriormente y mostrada en la Figura 2 es muy eficaz, sin embargo, es muy deseable reducir el número de elementos de antena necesarios para muestrear la anchura/altura de la apertura. El número de muestras necesarias viene determinado por los requisitos de muestreo de Nyquist; sin embargo, el número de elementos de antena puede reducirse mediante técnicas de muestreo especiales que explotan la aproximación cuasi-monostática utilizando varios receptores para cada transmisor (o viceversa). Una técnica de muestreo utiliza la misma configuración que en la Figura 2, salvo que la matriz receptor se ha hecho más delgada eliminando uno de cada dos elementos de antena receptora, como muestra la Figura 6. Cada receptor se utiliza ahora junto con cuatro elementos de antena de transmisión más cercanos, como se muestra en la Figura 6 (las líneas punteadas indican los emparejamientos de antenas y las líneas cortas las ubicaciones efectivas de las muestras). Esto da como resultado el mismo espaciado y densidad efectivos de muestreo que en la técnica convencional de muestreo por matrices separados de transmisión y recepción descrita en la Figura 2, aunque el número de elementos receptores se ha reducido aproximadamente a la mitad. Por lo tanto, la recolección de N muestras espaciales requeriría aproximadamente $3N/4$ elementos físicos de antena. Se debe tener en cuenta que esta técnica funcionaría igual de bien con la matriz de transmisión más delgada, en lugar de la matriz de recepción. Esta técnica puede ampliarse reduciendo aún más el número de elementos receptores eliminando de nuevo la mitad de los receptores. Este proceso adelgazamiento podría continuar hasta el caso extremo en el que los únicos elementos receptores que quedaran fueran los situados cerca de los extremos de la matriz lineal. Esta configuración extrema probablemente no funcionaría muy bien debido al brusco salto en la iluminación del lado izquierdo de la matriz al lado derecho de la matriz, y debido a la violación de la suposición de que la separación entre las antenas de transmisión y recepción es mucho menor que la distancia al objetivo de imagenología.

Una invención anterior, la publicación de EE. UU. No. 2007/0075889, desarrolló aún más este método para

establecer una técnica de muestreo de matriz lineal de muestreo entrelazado. En una realización de esta publicación, se coloca un único conjunto de antenas de transmisión entre dos conjuntos de antenas de recepción. En esta realización, como se muestra en la Figura 5 de la publicación 2007/0075889, cada antena transmisora se utiliza junto con los cuatro receptores más cercanos, dos del conjunto superior (R1) y dos del conjunto inferior (R2). El muestreo utilizando la matriz de transmisión y la matriz de recepción R1 da como resultado las muestras indicadas por la columna izquierda de "x" y el muestreo utilizando la matriz de transmisión y la matriz de recepción R2 da como resultado las muestras indicadas por la columna derecha de "x".

Cabe señalar que las columnas de muestras efectivas izquierda y derecha están desplazadas verticalmente entre sí en $\Delta/2$, y lateralmente en una cantidad igual a la separación horizontal de R1/R2 de la matriz de transmisión (D). Dado que se supone que un barrido mecánico lineal completa el barrido de la apertura rectilínea o cilíndrica, se puede hacer que estas ubicaciones efectivas de la muestra desplazadas se alineen en momentos ligeramente desplazados durante el barrido mecánico. Por ejemplo, la matriz de transmisión puede secuenciarse utilizando la matriz de recepción R2 para recolectar las ubicaciones de las muestras que se muestran en la columna de la derecha y, a continuación, cuando la matriz se haya desplazado hacia la derecha una distancia D, la matriz de transmisión puede secuenciarse utilizando la matriz de recepción R1 para recolectar las ubicaciones de las muestras que se muestran en la columna de la izquierda superpuestas sobre las muestras recolectadas anteriormente. Por lo tanto, el espaciado efectivo de la muestra es $\Delta/2$. La ventaja de este sistema es que la recolección de N muestras espaciales sólo requiere aproximadamente N/2 elementos físicos de antena. Esto reduce el número de antenas necesarias aproximadamente a la mitad en comparación con la técnica descrita en las Figuras 1 y 2. Una ventaja adicional es que la separación física de las antenas es mayor para una distancia efectiva entre muestras dada, lo que permitirá una mayor ganancia de antena y/o un mayor aislamiento entre antenas. Evidentemente, los matrices de recepción R1 y R2 también podrían hacerse más delgados (como en la configuración de la Figura 4) para reducir aún más el número de elementos de antena necesarios.

Las técnicas de muestreo de matrices de receptores delgados y matrices lineales entrelazadas descritas anteriormente proporcionan un potente medio para reducir el número de antenas necesarias para muestrear uniformemente un eje lineal. Esta reducción es aproximadamente un factor de 2 para la técnica entrelazada. Aunque poderosa, esta técnica tiene dos limitaciones principales. En primer lugar, la reducción de las antenas necesarias es limitada. Un adelgazamiento adicional de las matrices de recepción puede reducirlo en cierta medida, sin embargo, la matriz de transmisión necesita mantener un espaciado de 2Δ para un muestreo efectivo de $\Delta/2$, lo que limita la reducción del número de antenas. La técnica no proporciona una forma sistemática de seguir reduciendo el número de antenas necesarias para muestrear densamente el eje de la matriz. Una preocupación adicional en algunos casos es que la técnica utiliza dos columnas efectivas o virtuales, y se basa en el movimiento mecánico para superponer las dos columnas de muestras. Esto supone una complejidad adicional que puede no ser posible o deseable para muchos diseños de sistemas de imagenología. US 2011/063158 A1 divulga un aparato de antena de matriz y un aparato de radar, que incluye un control de directividad del lado de la transmisión que controla la directividad de la antena de matriz de transmisión controlando las fases de los elementos de la antena de transmisión, y un control de directividad del lado del receptor que controla la directividad de la antena de matriz de recepción controlando las fases de los elementos de la antena de recepción. US 2008/100510 A1 divulga un sistema de antenas para un detector, que incluye una matriz transmisora bidimensional y una matriz receptora bidimensional. US 2012/105268 A1 divulga un método para detectar un dispersor en una estructura transmitiendo señales desde múltiples posiciones y recibiendo señales reflejadas en una o varias posiciones. US 2011/0140949 A1 divulga un aparato de radar de entrada múltiple y salida múltiple y un método de comunicación inalámbrica.

Vaidyanathan, Palghat P., y Piya Pal. "Sparse sensing with co-prime samplers and arrays." IEEE Transactions on Signal Processing 59,2 (2010): 573-586 divulga matrices MIMO co-primas.

Lo que se necesita es un aparato mejorado para la imagenología sintética de un objeto.

Breve descripción de la invención

Los aspectos de la presente divulgación se definen en las reivindicaciones adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 ilustra el muestreo de matrices de transceptores espaciados uniformemente.

La Figura 2 ilustra el muestreo por separado de los matrices de transmisión y recepción.

La Figura 3 ilustra la ubicación efectiva del transceptor para el funcionamiento cuasi-monostático colocado en el punto medio del conducto que une los centros de fase de cada antena.

La Figura 4 ilustra los vectores de longitud de trayectoria en la aproximación cuasi-monostática.

La Figura 5 ilustra el error en la aproximación cuasi-monostática.

La Figura 6 ilustra una configuración de matriz lineal multiestática.

La Figura 7 ilustra una configuración de matriz multiestática de análisis de muestreo eficaz, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 8 es una disposición de una celda unitaria única de una matriz 3:4, de acuerdo con una realización de la

presente invención.

La Figura 9 es una disposición de una celda unitaria única de una matriz 3:4:3, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 10 ilustra el muestreo efectivo para una celda unitaria única de matriz 1:1.

5 La Figura 11 ilustra el muestreo efectivo para una celda unitaria única de matriz 1:3, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 12 ilustra el muestreo efectivo para una celda unitaria única de matriz 2:3, de acuerdo con una realización de la presente invención.

10 La Figura 13 ilustra el muestreo efectivo para una celda unitaria única de matriz 3:4, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 14 muestra los datos del historial de fase para una matriz 1:1:200, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 15 muestra la imagen reconstruida para la matriz 1:1:200 utilizando la técnica RD-GSAFT, de acuerdo con una realización de la presente invención.

15 La Figura 16 muestra la imagen reconstruida para la matriz 1:1:200 utilizando la técnica SAR basada en FFT, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 17 muestra los datos del historial de fase para una matriz 3:4:11, de acuerdo con una realización de la presente invención.

20 La Figura 18 muestra la imagen reconstruida para la matriz 3:4:11 utilizando la técnica RD-GSAFT, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La Figura 19 muestra la imagen reconstruida para la matriz 3:4:11 utilizando la técnica SAR basada en FFT.

La Figura 20 ilustra las ubicaciones de las antenas transmisora y receptora para una matriz bidimensional de 2:3:3 por 2:3:3, de acuerdo con una realización de la presente invención.

25 La Figura 21 ilustra las ubicaciones efectivas de las muestras para una matriz bidimensional de 2:3:3 por 2:3:3, de acuerdo con una realización de la presente invención.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

30 La presente invención está dirigida a aparatos para y métodos de imagenología sintética de un objeto. Entre las ventajas y beneficios de la presente invención en comparación con la técnica anterior se incluyen los siguientes. La presente invención reduce el número de antenas de transmisión y recepción necesarias para muestrear densamente un eje lineal. La presente invención también proporciona una única columna de muestras virtuales. Además, la presente invención mantiene transmisores y receptores dedicados, idealmente como columnas separadas de una matriz de dos columnas.

35 La presente invención permite antenas que pueden tener hasta varias longitudes de onda de ancho en ambas dimensiones de la sección transversal. Esto puede requerir que tanto las matrices de transmisión como las de recepción se reduzcan en número de antenas.

40 La presente invención proporciona un muestreo espacial efectivo uniforme, que puede ser necesario para la imagenología con pocos artefactos y la reconstrucción de imágenes con base en la transformada de Fourier. La presente invención proporciona además un muestreo efectivo denso por debajo de la longitud de onda, que puede ser necesario para evitar el solapamiento espacial durante la reconstrucción de la imagen. La presente invención también proporciona numerosas ubicaciones del transmisor para la iluminación angularmente diversa del objetivo.

45 Otra ventaja de la presente invención es que no requiere una separación extrema de las ubicaciones de las antenas de transmisión y recepción utilizadas para un muestreo efectivo. La presente invención también permite el funcionamiento en el campo cercano de la matriz de antenas.

50 La Figura 6 ilustra una configuración de matriz multiestática lineal, que utiliza dos matrices lineales o columnas con intervalos de espaciado únicos. En la Figura 6 se supone sin pérdida de generalidad que $\Delta_1 > \Delta_2$ y que una matriz (columna) se dedica a transmitir y la otra matriz se dedica a recibir. Se supone que los espaciados pueden ser tales que las colocaciones de las antenas entre los dos matrices sean periódicas y se repitan a lo largo de un intervalo D. El intervalo D se designa como la longitud de celda unitaria. Como se explicará más adelante, este requisito de periodicidad consigue un muestreo uniforme en la mayor parte de la longitud de la matriz, pero no es específicamente un requisito de este concepto de matriz multiestática dispersa.

60 La Figura 7 ilustra una configuración de matriz multiestática de análisis de muestreo eficaz, de acuerdo con una realización de la presente invención. En este análisis, la matriz de la izquierda, la matriz 1, tiene N_1 elementos sobre una longitud D de celda unitaria para un espaciado de D/N_1 . La matriz de la derecha, la matriz 2, tiene N_2 elementos sobre una longitud D de celda unitaria para un espaciado de D/N_2 . Para este análisis se supone que ambas matrices son infinitas por encima y por debajo de la porción analizada, de modo que se dispone de todos los elementos de la matriz necesarios para un muestreo eficaz. Para cumplir la restricción, en una realización, de que la separación de transmisión y recepción no sea demasiado grande, sólo se utilizan separaciones de $\leq D$. Las muestras efectivas para esta configuración (se muestra $N_1 = 3$, $N_2 = 4$) hay $2N_2$ muestras efectivas disponibles a partir de la única ubicación de matriz 1 utilizada. Podrían utilizarse separaciones mayores, sin embargo, éstas

darían lugar a un muestreo redundante para las matrices periódicas.

Para un eje "y" vertical, las ubicaciones efectivas de la muestra están en

$$y_{ij} = \frac{1}{2} \left(i \frac{D}{N_1} + j \frac{D}{N_2} \right) \quad (3)$$

en donde iD / N_1 puede considerarse un desplazamiento debido a la selección del elemento de la matriz 1 y jD / N_2 pueden considerarse las ubicaciones de la muestra primaria debido a la secuenciación de las ubicaciones de la matriz 2 (hay $2N_2$ de éstas por distancia D de celda unitaria).

Para lograr el objetivo de un muestreo denso uniforme, el desplazamiento (iD / N_1) debe desplazarse uniformemente a través del incremento de muestreo efectivo de las muestras primarias. Se supone que la matriz es infinita, o que al menos se extiende una longitud de celda unitaria adicional más allá de la región analizada, por lo que sólo es importante la porción del desplazamiento que es el resto tras la división por el intervalo de muestreo primario (D / N_2). Otra consideración es que la redundancia no es deseable, por lo que se suelen preferir las muestras efectivas con la menor separación inicial. Las muestras únicas (no redundantes) se encuentran en:

$$\begin{aligned} y_{ij} &= \text{mod} \left(\frac{iD}{2N_1}, \frac{D}{2N_2} \right) + j \frac{D}{2N_2} \\ &= \frac{D}{2N_2} \left(\text{mod} \left(\frac{iN_2}{N_1}, 1 \right) + j \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Sin restringir la generalidad de la técnica, se supone que:

1. $N_2 > N_1$
2. N_1 y N_2 no tienen factores comunes (si los tuvieran se reduciría la longitud de la celda unitaria, y D, N_1 y N_2 simplemente se redefinirían)
3. i varía a lo largo de una celda unitaria única, es decir, cubre los números enteros $i \in [-N_1 / 2, \dots, -1, 0, 1, \dots, N_1 / 2]$
4. j varía a lo largo de la matriz tanto como sea necesario (se ha comprobado que es tal que la posición de la matriz 2 sólo varía dentro de $\pm D$ del elemento i seleccionado).

Como ejemplo de las posiciones de muestreo disponibles, para $N_1 = 5$ y $N_2 = 7$, el índice de la matriz 1 variará sobre los números enteros $i \in [-2, -1, 0, 1, 2]$. La función mod anterior evalúa a $1 / 5, 3 / 5, 0, 2 / 5, 4 / 5$, lo que da como resultado un muestreo uniforme, y un aumento de la densidad de muestreo de un factor de $N_1 = 5$.

En general, la función mod y la variación del índice de la matriz 1 dan lugar a muestras únicas disponibles en las posiciones:

$$y_{ij} = \frac{D}{2N_2} \left(j + \frac{i}{N_1} \right) \quad (5)$$

con un muestreo efectivo uniforme en un incremento de:

$$\Delta y = \frac{D}{2N_1N_2} \quad (6)$$

El número de muestras efectivas por longitud de celda unitaria es:

$$N_{\text{muestras}} = 2N_1N_2 \quad (7)$$

y el número de antenas por longitud de celda unitaria es:

$$N_{\text{antenas}} = N_1 + N_2 \quad (8)$$

Una cifra de mérito conveniente para la matriz multiestática dispersa es el número de muestras dividido por el número de antenas

$$\frac{N_{\text{muestras}}}{N_{\text{antenas}}} = \frac{2N_1N_2}{N_1 + N_2} \quad (9)$$

Esta cifra de mérito se maximiza para N_1 y N_2 grandes y cercanos en valor, por ejemplo, $N_1 = 8$ y $N_2 = 9$. Para

muchos casos es conveniente dejar que $N_2 = N_1 + 1$, ya que esto hará que N_1 y N_2 se aproximen entre sí sin tener factores comunes. Para este caso especial, la cifra de mérito es ligeramente superior a N_1 . Por lo tanto, para el ejemplo anterior, el número de muestras por antena será superior a 8. Esto permite reducir radicalmente el número de antenas e interruptores necesarios para construir una matriz lineal densa y uniformemente muestreada.

Matrices multiestáticas finitas y dispersas

Las matrices finitas pueden especificarse designando la longitud de la matriz L , el número de celdas unitarias N_c , N_1 y N_2 . Por comodidad, un diseño específico de matriz se designará por $N_1 : N_2 : N_c$. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de matriz 2:3:3. Por simetría de las matrices, se incluyen elementos finales en ambas matrices tales que

$$N_{\text{muestra}} = N_1 N_2 + 1 \quad (10)$$

$$N_{\text{muestra}} \approx N_1 N_2 + 1 \quad (11)$$

$$D = \frac{L}{N_c} \quad (12)$$

$$\Delta_1 = \frac{D}{N_1} \quad (13)$$

$$\Delta_2 = \frac{D}{N_2} \quad (14)$$

Resulta tedioso especificar las combinaciones concretas de elementos que dan lugar a un muestreo óptimo, uniforme y no redundante para matrices multiestáticas dispersas finitas. Sin embargo, es sencillo determinar los emparejamientos de elementos de forma sistemática mediante un algoritmo informático. A continuación se presenta un sencillo algoritmo de diseño que determina los emparejamientos de elementos y las posiciones efectivas de las muestras como una realización de la presente invención.

Algoritmo de diseño de matrices multiestáticas dispersas:

1. Especificar la longitud de la matriz, L .
2. Especificar el diseño de la matriz $N_1 : N_2 : N_c$.
3. Calcular las ubicaciones de las antenas de matriz 1 y matriz 2:

$$x'_1 = (i-1) \frac{N_1}{D} \quad \text{para } i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{muestra}}\} \quad (15)$$

$$x'_2 = (j-1) \frac{N_2}{D} \quad \text{para } j \in \{1, 2, \dots, N_{\text{muestra}}\} \quad (16)$$

4. Calcular todas las posiciones efectivas posibles de la muestra:

$$y_e^{i,j} = \frac{x'_1 + x'_2}{2} \quad (17)$$

5. Eliminar todas las muestras que tengan valores iniciales de separación de antenas superiores a D , es decir, asegurarse de que:

$$x'_1 - D \leq x'_2 < x'_1 + D \quad (18)$$

6. Clasificar las posiciones efectivas de las muestras en orden ascendente con las tablas de índices de la matriz 1 y la matriz 2 (i y j) igualmente clasificadas por orden $y_e^{i,j}$ ascendente.

Cabe señalar que especificar $x'_1 - D \leq x'_2 < x'_1 + D$ elimina el muestreo redundante en la matriz.

Todas las celdas unitarias de la matriz tendrán un muestreo completo y uniforme, excepto la primera y la última celda, que, dependiendo del diseño específico, tendrán aproximadamente la mitad de la celda uniformemente muestreada (la mitad hacia el centro de la matriz).

En las Figuras 8 a 13 se muestran realizaciones de este algoritmo y de las características de muestreo de la matriz

multiestática dispersa. En la Figura 8 se muestra una celda unitaria única de una matriz 3:4 y en la Figura 9 se muestran tres celdas unitarias. Estas figuras ilustran el espaciado y la periodicidad de las matrices. El tipo más sencillo de matriz es una matriz 1:1. Este tipo de matriz viola las condiciones expuestas anteriormente de que $N_2 > N_1$ y de que los números no compartan ningún factor común, por lo que se considerará un caso límite especial. Las muestras únicas para una celda unitaria única se muestran en la Figura 10. Esta matriz es esencialmente equivalente a la matriz separada de transmisión y recepción mostrada en la Figura 2, excepto por el desplazamiento en la alineación de las dos columnas. Este desplazamiento no cambia la densidad de muestreo, pero iguala los valores iniciales de los dos pares de antenas. En la Figura 11 se muestra una matriz 1:3 más compleja con el muestreo para una celda unitaria única. Del mismo modo, la Figura 12 muestra una matriz 2:3 y la Figura 13 muestra una matriz 3:4. Cabe señalar que en estas dos figuras el muestreo mostrado es uniforme dentro de una celda unitaria única ($-0,5 \leq y < 0,5$). El muestreo fuera de esta región será uniforme a medida que se incluyan otros emparejamientos de antenas que no se mostraron. En todos los casos mostrados, el muestreo es uniforme dentro de la celda unitaria y el número de muestras es $2N_1N_2$.

Una cuestión importante para la aplicación del concepto de matriz multiestática dispersa para aplicaciones de imagenología es que habrá diferencias significativas de longitud de trayecto entre las muestras efectivas del transceptor debido a la separación variable inicial de las antenas de transmisión y recepción emparejadas. Esta diferencia de trayectoria (error) se analizó anteriormente en la discusión de la aproximación cuasi-monostática. Restringir las separaciones iniciales para que sean tan pequeñas que la aproximación cuasi-monostática sea válida sin ninguna mitigación haría que la técnica de la matriz multiestática sólo fuera marginalmente eficaz, ya que depende valores iniciales relativamente grandes para lograr los recuentos reducidos de antenas. Las diferencias de longitud de trayectoria pueden compensarse utilizando (al menos) dos técnicas diferentes:

1. Técnicas de calibración de la matriz que esencialmente desplazan el rango o la fase de los datos del transceptor para eliminar gran parte del error
2. Técnicas de enfoque generalizadas que utilizan las longitudes de trayectoria reales en lugar de basarse en las longitudes de trayectoria aproximadas

Las técnicas de calibración de matrices son más aproximadas porque deben asumir una dirección de desplazamiento de las ondas para estimar el error de trayectoria. Normalmente, se asume una dirección de propagación en el eje, lo que funcionará bien para la mayoría de los casos, pero puede producir resultados pobres en condiciones extremas de imagenología de campo cercano, o para matrices con separaciones iniciales muy grandes (es decir, N_1 o N_2 grandes).

Resultados del rendimiento de imagenología

El rendimiento de imagenología de la técnica de matriz multiestática dispersa puede demostrarse utilizando datos del historial de fase sintetizados. A continuación, estos datos sintetizados pueden reconstruirse utilizando al menos dos técnicas.

En primer lugar, se aplica la técnica de enfoque de apertura sintética generalizada multiestática en el dominio del rango (RD-GSAFT). Esta técnica utiliza las ubicaciones conocidas con precisión de cada antena transmisora y receptora en un método de filtrado igualado por conjugación de fases y se espera que realice la reconstrucción de la imagen con los menores artefactos de imagenología y el mayor rango dinámico. Esta técnica lleva a cabo una suma coherente de la respuesta medida de la historia de fases multiplicada por la respuesta esperada debida a una hipotética dispersión puntual situada en cada píxel o vóxel de la imagen. Si existe un dispersor real, los términos de esta suma tienden a sumarse de forma coherente produciendo una respuesta sustancial, mientras que si no hay dispersor los términos tienden a sumarse de forma incoherente y producen una respuesta mínima.

En segundo lugar, los datos computados de la historia de fases pueden adaptarse para cumplir los requisitos de imagenología de apertura sintética lineal cuasi-monostática, o técnica de radar de apertura sintética (SAR). Esta técnica supone que un transceptor cuasi-monostático muestrea una apertura sintética lineal con un espaciado uniforme a lo largo de la apertura. Los datos SAR pueden reconstruirse utilizando un algoritmo estándar de reconstrucción de imágenes basado en la transformada de Fourier, tal como se describe en Soumekh, M. Soumekh, Fourier Array Imaging, Englewood Cliffs, Nueva Jersey; Prentice Hall, 1994, o en Sheen, Sheen et al., "Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 49, pp. 1581-92, 2001. La técnica de matriz multiestática dispersa cumple aproximadamente estos requisitos si los datos del historial de fase se acondicionan antes de la reconstrucción de la imagen. Específicamente, algunas de las muestras cercanas a los extremos de la matriz no se muestrearán de manera uniforme, por lo que debe aplicarse una técnica de calibración de la matriz para reducir el error de longitud del trayecto (fase) debido a la variación del espaciado inicial de transmisión-recepción inherente a la técnica de la matriz dispersa. Esta calibración no puede ser exacta, debido a que el error definido por la ecuación (2) anterior depende de la ubicación presumiblemente desconocida del dispersor, tanto en rango como en ángulo. Sin embargo, se pueden obtener excelentes resultados en un campo de visión razonablemente amplio eligiendo el rango hasta el centro de la imagen y suponiendo que los dispersores están nominalmente en eje con el punto medio del par de antenas TR. En este caso, los datos del historial de fase pueden calibrarse multiplicando cada forma de onda de frecuencia por una forma de onda de calibración que desplace eficazmente el rango (fase) de

los datos para compensar el error de rango (fase),

$$V_{\omega\theta} = e^{j\Delta/\lambda} \quad (19)$$

5 en donde Δ/λ se definió mediante (2) más arriba.

Los datos del historial de fase se sintetizan para varios tipos de matrices diferentes con los siguientes parámetros:

- Longitud de la matriz 2,5 m
- Rango: 2,50 - 5,00 m
- Objetivos: Objetivos de la letra F, cada uno compuesto por 9 puntos dispersos individuales (espaciado de 0,1 m)
- Desplazamiento del objetivo: 0,625 m (distancia entre cada objetivo F)
- Frecuencia: 10-20 GHz (1024 muestras uniformes)

10 *Tipo de matriz 1:1:200*

El primer tipo de matriz simulado es una matriz 1:1:200. Esta matriz es equivalente a la matriz separada de transmisión-recepción y no tiene esencialmente ningún error debido a la separación inicial de los elementos T y R, ya que la trayectoria de cada emparejamiento es esencialmente la misma. Este matriz tendrá un espaciado uniforme con 401 puntos de muestra de un total de 201 antenas T y 201 antenas R para aproximadamente 1,0 muestras/antena. La separación efectiva entre muestras es de 6,25 mm (0,31 λ). El historial de fases de estos datos se muestra en la Figura 14. Se debe tener en cuenta que estos datos se demodulan para eliminar el desplazamiento de fase debido al alcance en el centro de la región de la imagen (es decir, 2 veces 3,75 m de longitud de trayectoria de ida y vuelta). Estos datos se enfocaron mediante la técnica RD-GSAFT sobre un espacio de imagen de 2,5 m por 2,5 m compuesto por 301 píxeles por 301 píxeles. La imagen reconstruida (enfocada) se muestra en la Figura 15 en una escala logarítmica de pseudocolores con 40 dB de rango dinámico. La reconstrucción de la imagen SAR se compuso de 401 por 512 píxeles sobre el mismo espacio y se muestra en la Figura 16. Ambas técnicas de reconstrucción proporcionan en este caso un rendimiento de imagenología limitado por difracción con artefactos de imagenología insignificantes y un rendimiento efectivamente idéntico. En este caso, se espera un rendimiento similar, ya que la aproximación cuasi-monostática se cumple casi a la perfección.

Tipo de matriz 3:4:11

El siguiente tipo de matriz simulado es una matriz 3:4:11. Este matriz realizará 259 puntos de muestreo de un total de 34 antenas T y 45 antenas R para aproximadamente 3,27 muestras/antena. La separación efectiva entre muestras es de 9,47 mm (0,47 λ). El historial de fases de estos datos se muestra en la Figura 17. Se debe tener en cuenta que estos datos se demodulan para eliminar el desplazamiento de fase debido al alcance en el centro de la región de la imagen (es decir, 2 veces 3,75 m de longitud de trayectoria de ida y vuelta). Estos datos se enfocaron mediante la técnica RD-GSAFT sobre un espacio de imagen de 2,5 m por 2,5 m compuesto por 301 píxeles por 301 píxeles. La imagen reconstruida (enfocada) se muestra en la Figura 18 en una escala logarítmica de pseudocolores con 40 dB de rango dinámico. La reconstrucción de la imagen SAR se compuso de 401 por 512 píxeles sobre el mismo espacio y se muestra en la Figura 19. Ambas técnicas de reconstrucción proporcionan en este caso un rendimiento de imagenología limitado por difracción con artefactos de imagenología insignificantes y un rendimiento efectivamente idéntico. Esto ilustra que la técnica de imagenología de matriz multiestática dispersa es eficaz para reducir sustancialmente los requisitos de antena e interruptor.

El aparato y el método de la matriz lineal multiestática pueden ampliarse a matrices bidimensionales que cubren una apertura plana o cilíndrica. En una realización, esto puede hacerse colocando antenas de transmisión sobre la apertura con un espaciado uniforme en cada dimensión espacial, y colocando antenas de recepción sobre la apertura con un espaciado uniforme en cada dimensión espacial que sea diferente del espaciado del transmisor. Al igual que con la técnica de matriz lineal descrita anteriormente, la apertura de la matriz puede dividirse en varias celdas unitarias, ahora en una cuadrícula bidimensional. Como ejemplo, el número de celdas unitarias en las dimensiones "x" e "y" se denotan $N_{c,x}$ y $N_{c,y}$. Cada celda unitaria tendrá N_{1x} por N_{1y} transmisores espaciados uniformemente en las dimensiones "x" e "y", respectivamente. Cada celda unitaria tendrá también N_{2x} por N_{2y} receptores espaciados uniformemente en las dimensiones "x" e "y", respectivamente. Las relaciones entre N_{1x} y N_{2x} y entre N_{1y} y N_{2y} pueden ser las mismas que las definidas anteriormente para matrices lineales con N_1 y N_2 elegidos para no tener factores comunes, y la relación establecida haciendo que N_1 y N_2 difieran en uno. Esta disposición hace que la matriz sea periódica en las dimensiones x e y, con los períodos fijados por el número de celdas unitarias en cada dimensión. Por lo tanto, la matriz global queda descrita por $N_{1x} : N_{2x} : N_{c,x}$ por $N_{1y} : N_{2y} : N_{c,y}$. Esta técnica de matrices planos bidimensionales también podría ampliarse trivialmente a aperturas cilíndricas sustituyendo las dimensiones "x" o "y" por la dimensión angular.

Esta técnica multiestática bidimensional se demuestra en las Figuras 20-21 para una matriz de 1 unidad por 1 unidad, de acuerdo con una realización de la presente invención. La matriz del ejemplo de la Figura 20 está dividida en una cuadrícula de celdas unitarias de 3 por 3 con transmisores de 2 por 2 y receptores de 3 por 3 en cada celda unitaria. Por lo tanto, esta matriz se denomina matriz 2:3:3 por 2:3:3. En la Figura 20, la colocación de los transmisores se muestra como "o" y la de los receptores como "x". Los transmisores y receptores cubricados se muestran como una "x" dentro de una "o". El muestreo efectivo obtenido con esta matriz se muestra en la Figura 21. Cabe señalar que el muestreo es uniforme excepto en las dos bandas exteriores de muestras. La densidad de muestreo se determina mediante las mismas fórmulas que para la técnica de matriz lineal. El número de muestras obtenidas dentro de cada celda unitaria es de $2N_{1x}N_{2x}$ por $2N_{1y}N_{2y}$, o de 12 por 12 en este caso. El muestreo global para la matriz que se muestra en la Figura 21 es, por lo tanto, de 36 por 36 si no se tienen en cuenta las muestras que faltan, o de 34 por 34 si se considera la región de muestreo uniforme. Esto representa un aumento significativo del muestreo en relación con el número de antenas necesarias. La matriz que se muestra en el ejemplo de la Figura 21 utiliza una cuadrícula de 7 por 7 transmisores y una cuadrícula de 10 por 10 receptores para un número total de antenas igual a 149. La región muestreada uniformemente tiene 34 por 34 (1156) muestras, por lo que el número de muestras por antena es de aproximadamente 8. Valores mayores de N_1 y N_2 aumentarán drásticamente este número de muestras por antena.

La presente invención se ha descrito en términos de realizaciones específicas que incorporan detalles para facilitar la comprensión de los principios de construcción y funcionamiento de la invención. Como tales, las referencias en la presente a realizaciones específicas y a detalles de las mismas no pretenden limitar el alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato de matriz multiestática lineal para imagenología sintética de un objeto que comprende:
 - a. una primer matriz lineal en columna que se extiende a lo largo de al menos dos longitudes de celda unitaria, cada longitud de celda unitaria incluye un primer número de elementos transmisores espaciados entre sí por una primera distancia; y
 - b. una matriz lineal de segunda columna que se extiende a lo largo de al menos dos longitudes de celda unitaria, cada longitud de celda unitaria incluye un segundo número de elementos receptores espaciados entre sí por una segunda distancia, de forma que las muestras efectivas se obtienen en una ubicación aproximadamente a mitad de camino entre los centros de fase de los pares individuales de transmisor y receptor de los elementos transmisor y receptor, en donde el primer número es un múltiplo no entero del segundo número y el segundo número es un múltiplo no entero del primer número, y un número de muestras efectivas obtenidas dentro de una longitud de celda unitaria es al menos el doble del número de la pluralidad de elementos transmisores y receptores en una celda unitaria, en donde el segundo número es mayor que el primer número, y el primer número y el segundo número no tienen factores comunes, en donde cada elemento transmisor de la primera columna está separado una distancia aproximadamente igual a la longitud de celda unitaria dividida por el primer número, y cada elemento receptor de la segunda columna está separado una distancia aproximadamente igual a la longitud de celda unitaria dividida por el segundo número.
2. El aparato de la reivindicación 1, en donde se consigue un muestreo uniforme a lo largo de una longitud de celda unitaria.
3. El aparato de la reivindicación 1, en donde las muestras obtenidas por los elementos transmisores y los elementos receptores están estrechamente espaciadas por una fracción de longitud de onda.
4. El aparato de la reivindicación 1, en donde los elementos operan en el rango de 200 MHz-1 THz.
5. El aparato de la reivindicación 1, en donde los elementos exploran electrónicamente una línea de una apertura plana o cilíndrica.
6. El aparato de la reivindicación 5, en donde la apertura tiene una altura de aproximadamente 0,1 a aproximadamente 20 metros.
7. El aparato de las reivindicaciones 1 o 2, en donde cada elemento transmisor y cada elemento receptor se utiliza varias veces para obtener varias muestras por celda unitaria.
8. El aparato de la reivindicación 1, en donde el primer número de elementos transmisores está espaciado uniformemente en una primera dimensión espacial y en una segunda dimensión espacial, y el segundo número de elementos receptores está espaciado uniformemente en la primera dimensión espacial y en la segunda dimensión espacial, de manera que los espaciados uniformes de los elementos receptores son diferentes de los espaciados uniformes de los elementos transmisores, en donde la primera dimensión espacial corresponde a la dirección X de una matriz bidimensional, y la segunda dimensión espacial corresponde a la dirección Y de la matriz bidimensional, en donde los elementos transmisores y los elementos receptores se repiten tanto en la dimensión X como en la dimensión Y, en donde los periodos se establecen por el número de celdas unitarias en cada dimensión.
9. El aparato de la reivindicación 1, en donde al menos un elemento transmisor y un elemento receptor están ubicados conjuntamente en los vértices de cada celda unitaria.
10. Un método de imagenología sintética de un objeto mediante un aparato de matriz multiestática lineal que comprende:
 - a. proporcionar una primer matriz lineal en columna que se extiende a lo largo de al menos dos longitudes de celda unitaria, cada longitud de celda unitaria incluye un primer número de elementos transmisores espaciados entre sí por una primera distancia en una primera columna;
 - b. proporcionar una matriz lineal de segunda columna que se extienda a lo largo de al menos dos longitudes de celda unitaria, en donde cada longitud de celda unitaria incluye un segundo número de elementos receptores espaciados entre sí por una segunda distancia en una segunda columna;
 - c. obtener una única columna de muestras efectivas a partir de pares individuales de transmisores y receptores de la pluralidad de elementos transmisores y elementos receptores;
 - d. lograr un muestreo uniforme a lo largo de una celda unitaria, en donde el primer número es un múltiplo no entero del segundo número y el segundo número es un múltiplo no entero del primer número, y el número de muestras efectivas obtenidas dentro de una longitud de celda unitaria es al menos el doble del número de la pluralidad de elementos transmisores y receptores en una celda unitaria, en donde el segundo número es mayor que el primero, y el primer número y el segundo no tienen factores comunes, en donde cada elemento transmisor de la primera columna está separado una distancia aproximadamente igual a la longitud de celda unitaria dividida por el primer número, y cada elemento receptor de la segunda columna está separado una distancia aproximadamente igual a la longitud de celda unitaria dividida por el segundo número.

11. El método de la reivindicación 10, que comprende además utilizar cada uno de los elementos transmisores y cada uno de los elementos receptores varias veces para obtener múltiples muestras por celda unitaria.

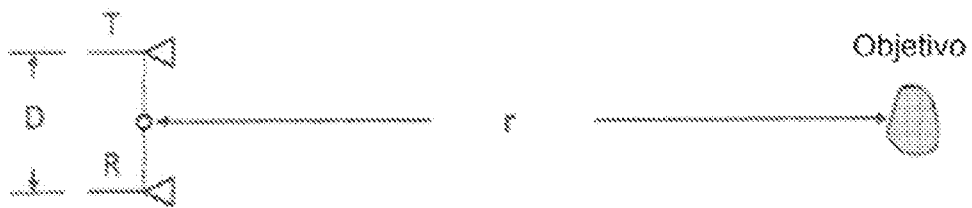


Figura 3 – Técnica anterior

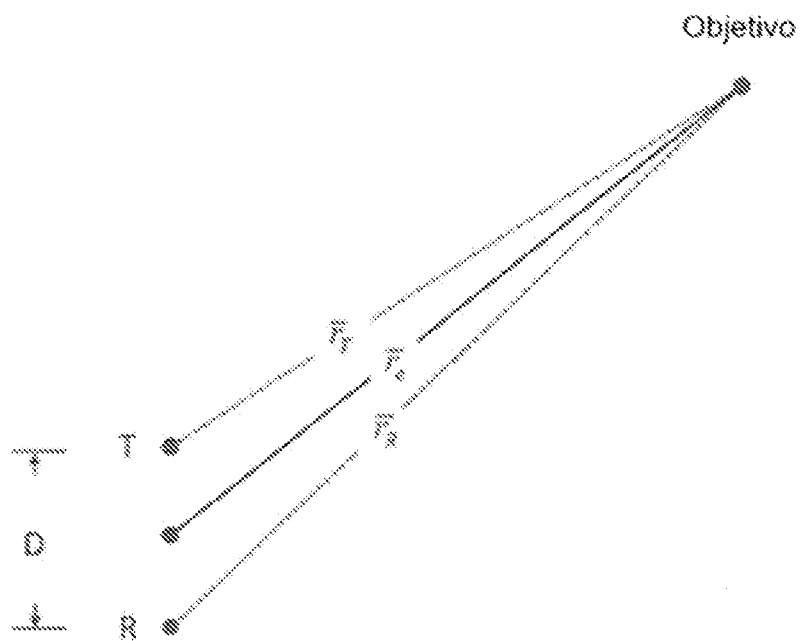


Figura 4 – Técnica anterior

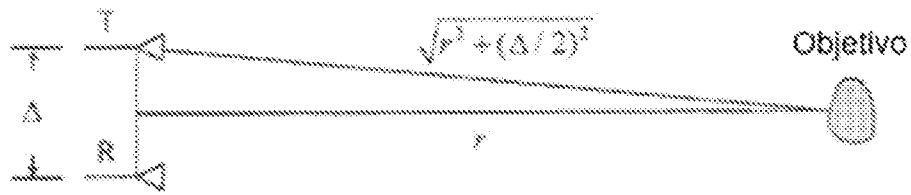


Figura 5 – Técnica anterior

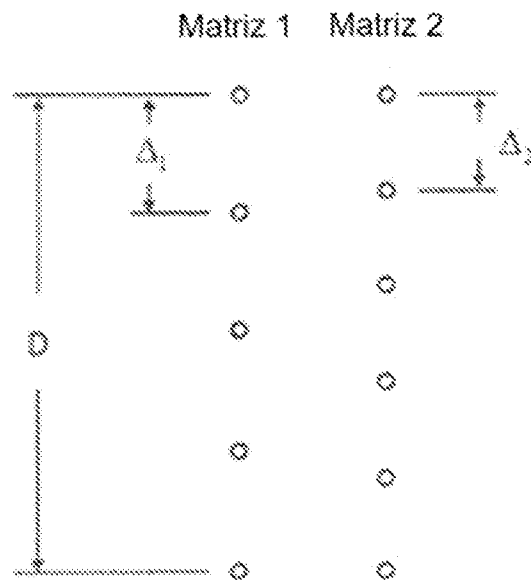


Figura 6

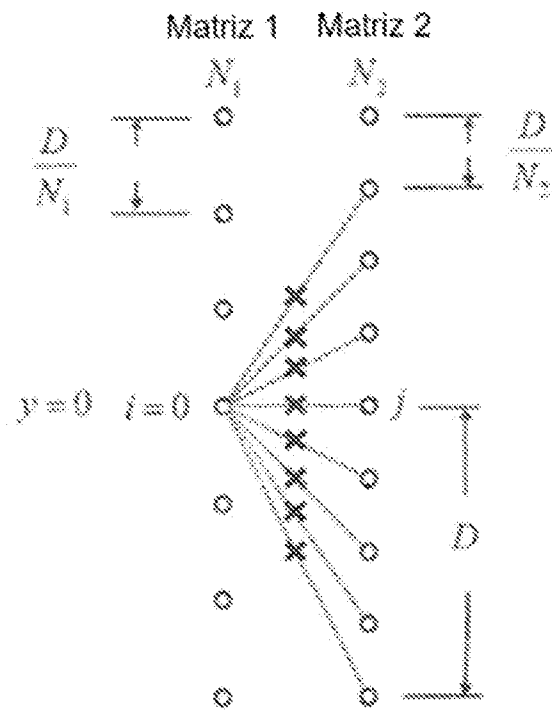


Figura 7

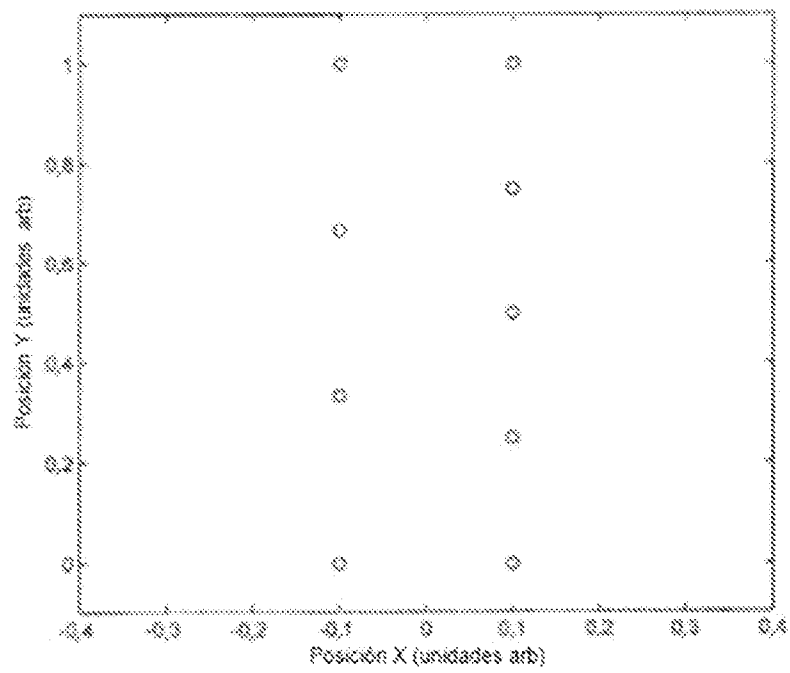


Figura 8

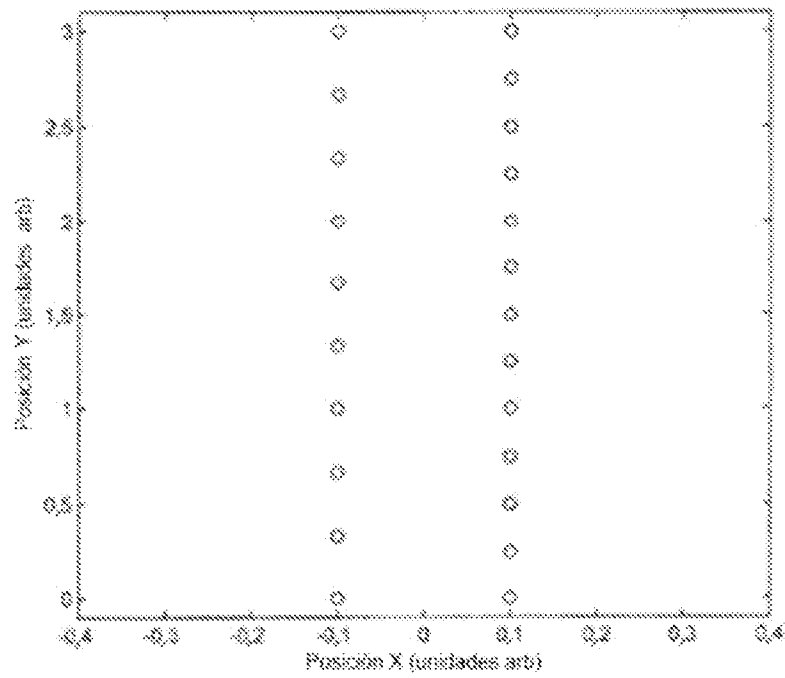


Figura 9

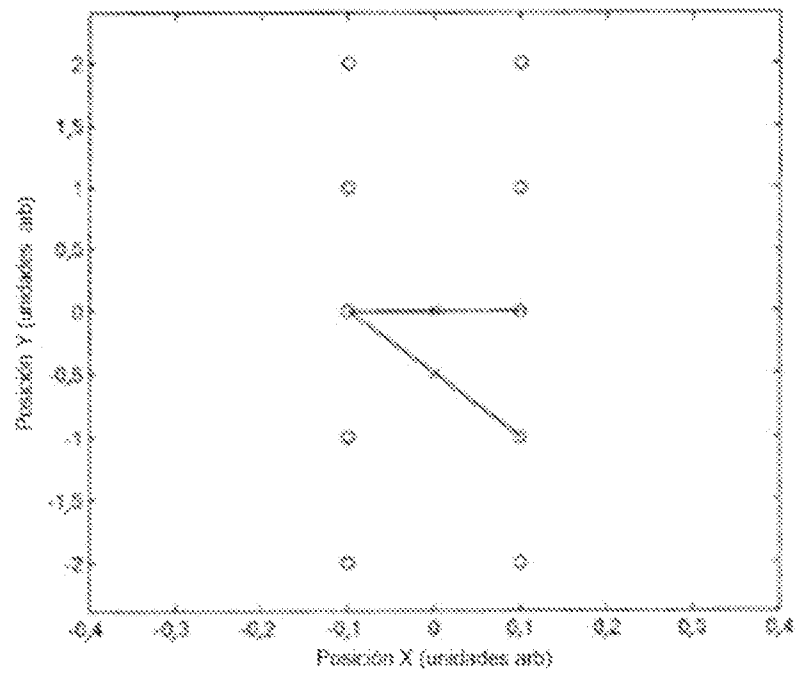


Figura 10

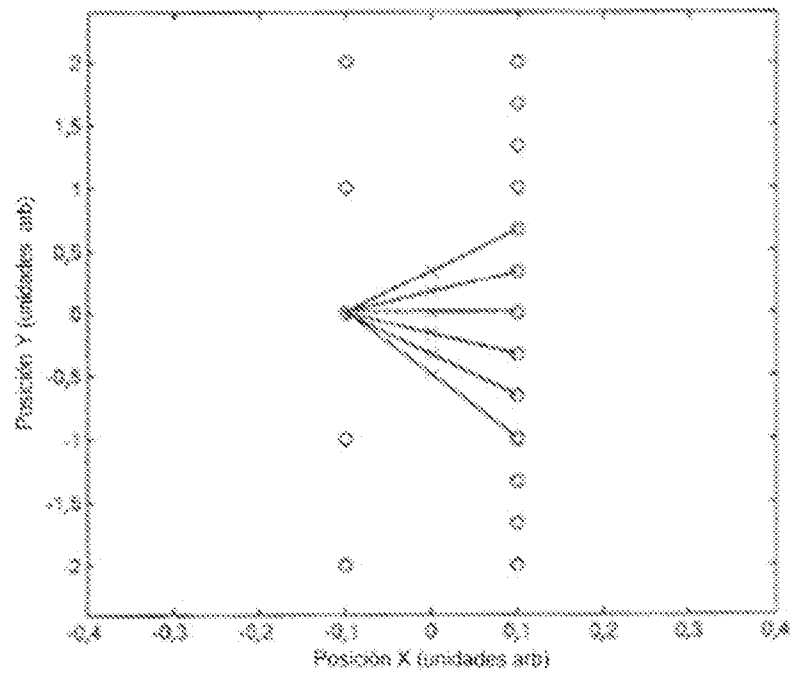


Figura 11

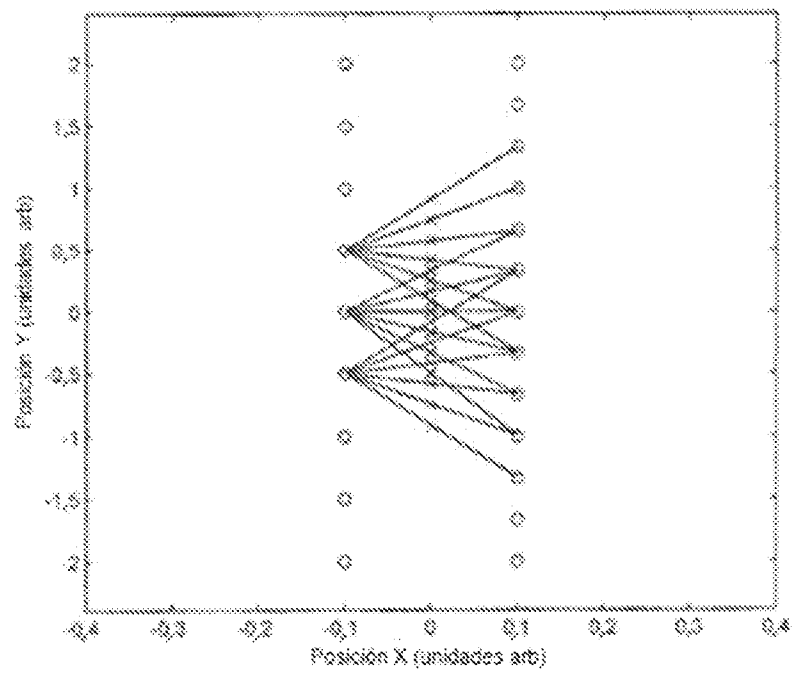


Figura 12

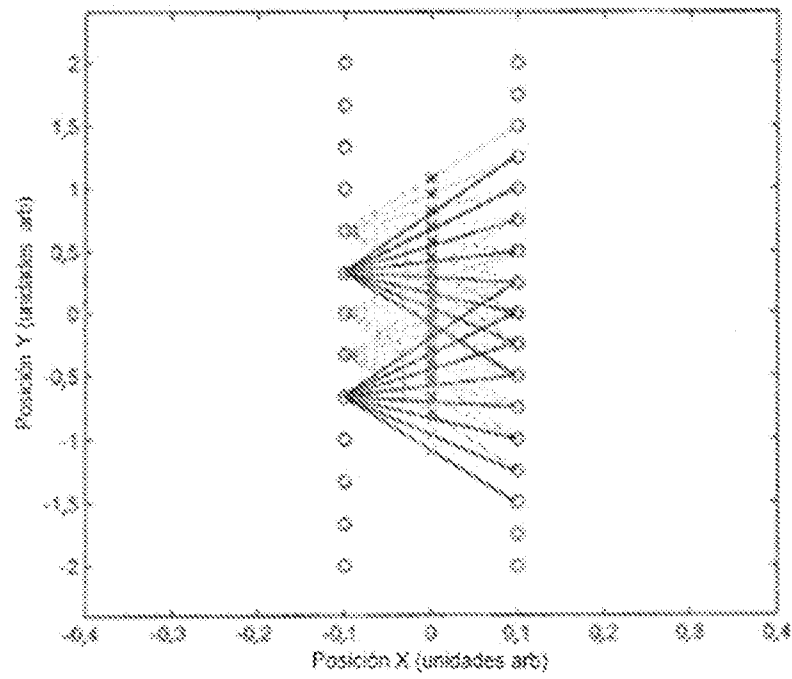


Figura 13

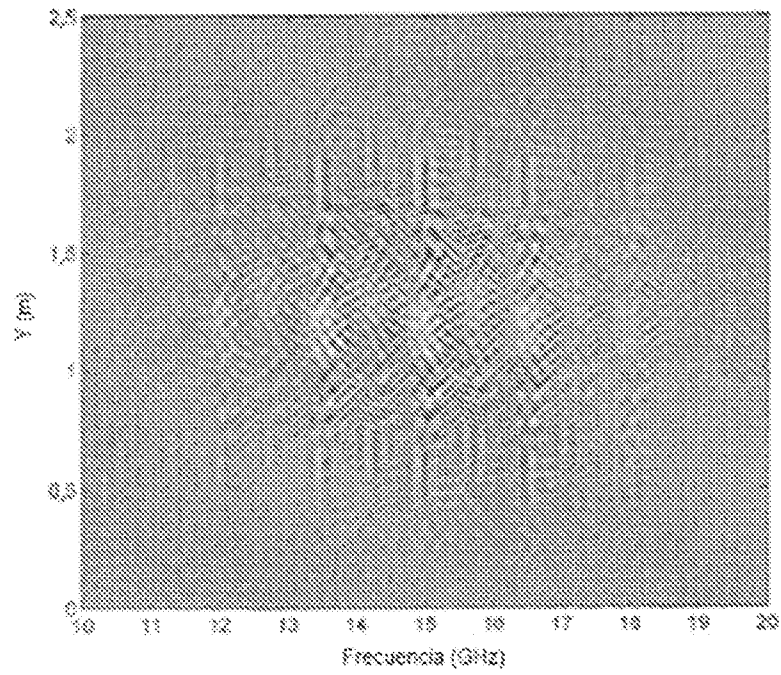


Figura 14

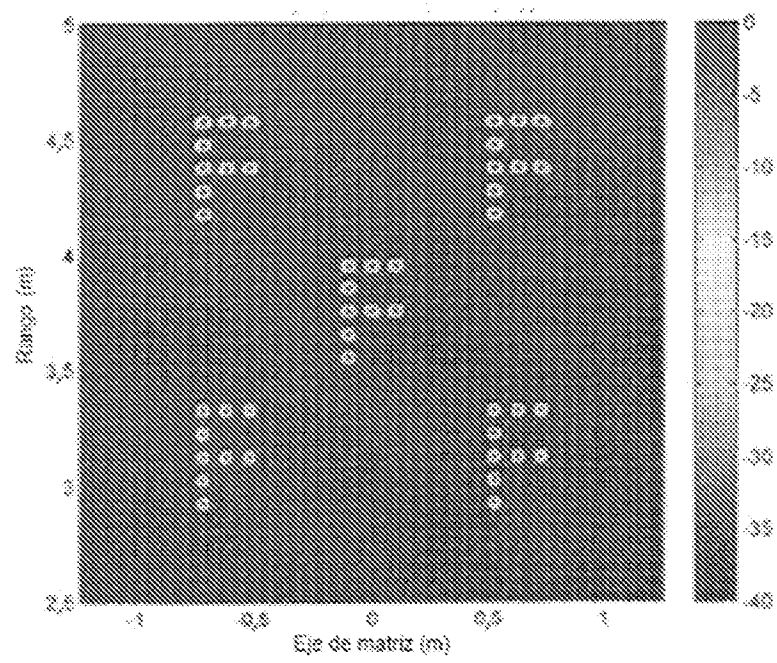


Figura 15

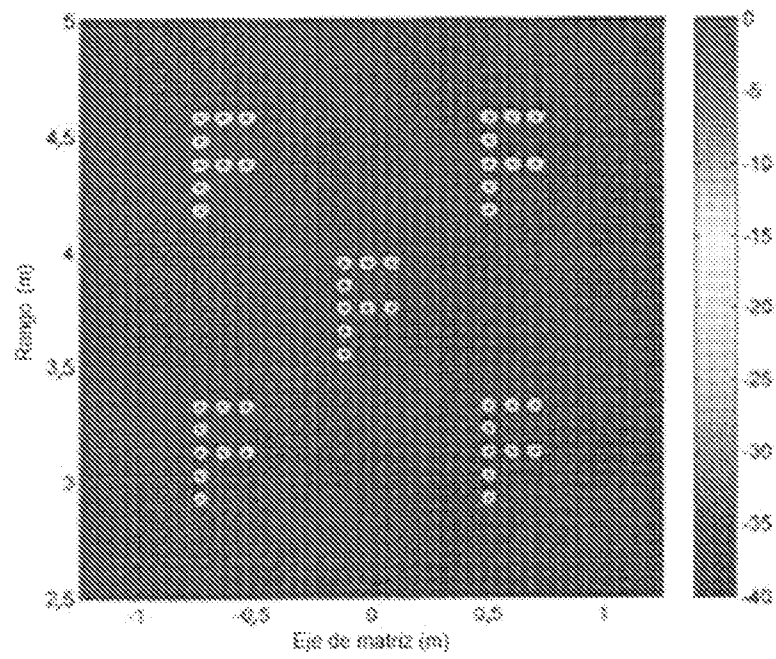


Figura 16

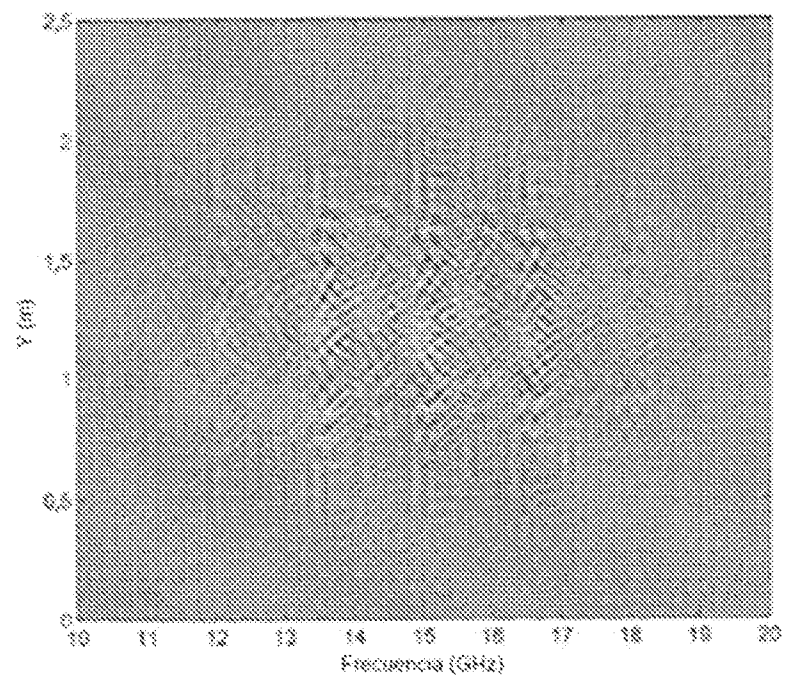


Figura 17

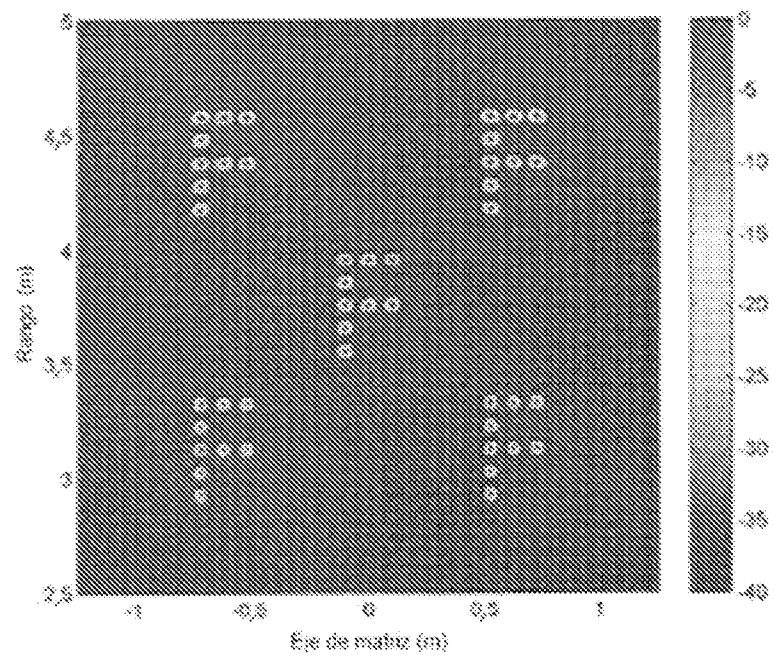


Figura 18

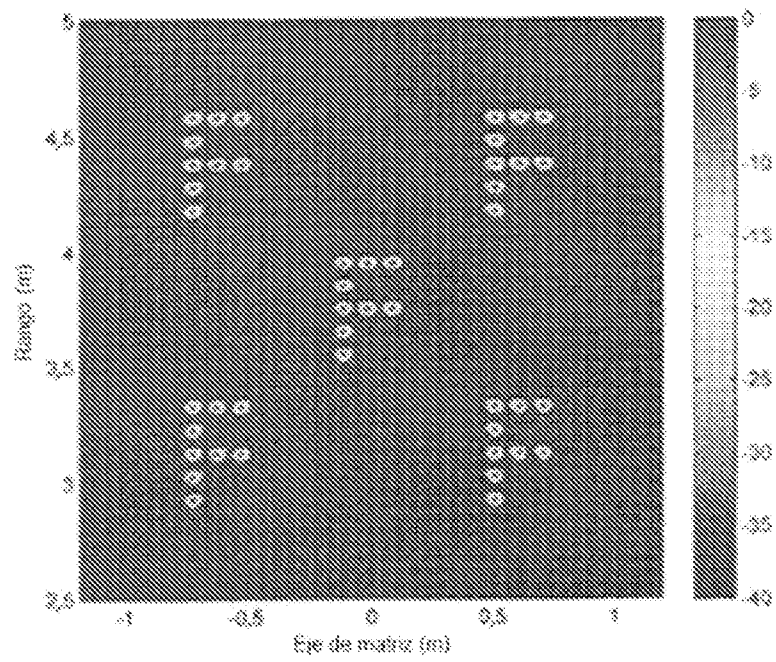


Figura 19

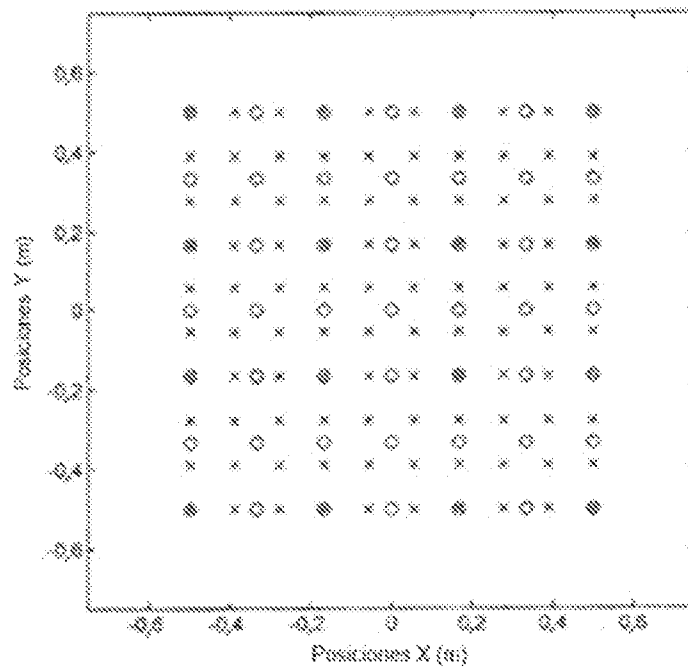


Figura 20

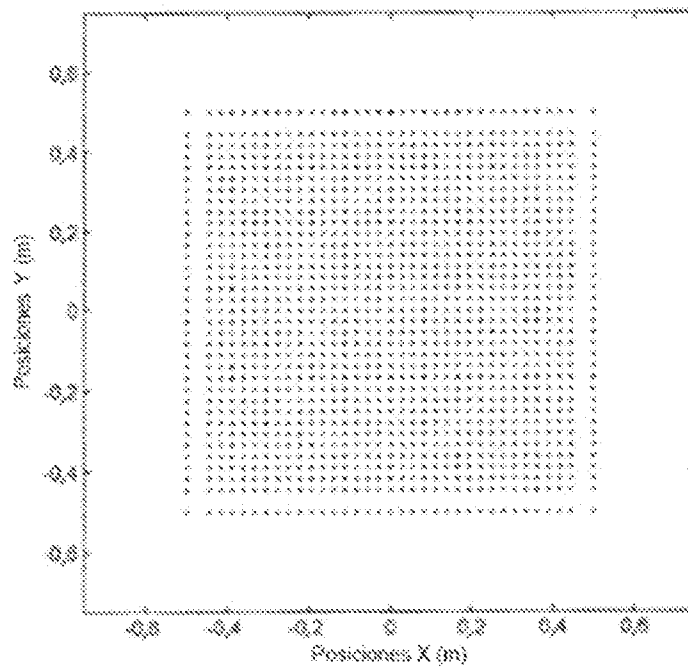


Figura 21