

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 626 070**

51 Int. Cl.:

H04N 5/33 (2006.01)

H04N 5/349 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.05.2013 PCT/IL2013/050380**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.11.2013 WO13171738**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.05.2013 E 13729475 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.03.2017 EP 2837173**

54 Título: **Detector infrarrojo con resolución de imagen aumentada**

30 Prioridad:

13.05.2012 IL 21977312

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

21.07.2017

73 Titular/es:

**ELBIT SYSTEMS ELECTRO-OPTICS ELOP LTD.
(100.0%)
Advanced Technology Park Kiryat Weizmann
P.o.B. 1165
76111 Rehovot, IL**

72 Inventor/es:

**NACHUM, AVISHAY;
BINDER, SHALOM y
FREIMAN, DOV**

74 Agente/Representante:

CAMPELLO ESTEBARANZ, Reyes

ES 2 626 070 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

Detector infrarrojo con resolución de imagen aumentada

SECTOR DE LA TÉCNICA DIVULGADA

5 En general, la técnica divulgada se refiere a detectores infrarrojos de imagen que tienen un conjunto de sensores bidimensional y a la mejora de la resolución de la imagen.

ANTECEDENTES DE LA TÉCNICA DIVULGADA

10 Un detector infrarrojo (IR) de imágenes forma una imagen detectando la radiación en la porción infrarroja del espectro electromagnético de la escena representada. Un detector infrarrojo pasivo funciona midiendo la radiación infrarroja emitida por las fuentes, particularmente, la energía térmica en el rango del infrarrojo lejano, de forma opuesta a los detectores IR activos, que iluminan primero los objetos con radiación IR y capturan después los reflejos de las iluminaciones. La resolución espacial inherente de un detector con un conjunto matricial bidimensional depende del tamaño y del número de píxeles dentro del conjunto (la densidad de píxeles). Para muchos tipos de sensores de imagen, como los sensores basados en un semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) o basados en un dispositivo de acoplamiento de cargas (CCD), es bastante sencillo aumentar la resolución añadiendo más píxeles en un espacio fijo y/o disminuyendo el tamaño de píxel en el conjunto. Sin embargo, para los sensores IR, una propuesta de este tipo sería excesivamente difícil y cara. Además, los detectores IR tienden a recibir poca luz (particularmente, en el caso de los detectores IR pasivos) y requieren normalmente manipulaciones o un tratamiento para aumentar la cantidad de radiación acumulada por el detector y permitir una formación de imágenes efectiva en el rango de la longitud de onda IR.

20 La patente GB 2.270.230, a nombre de Hirose, con el título "Two dimensional image detector", divulga la enmascaración de los píxeles de un conjunto sensor de forma que cada píxel represente una región subdividida. Se proporciona una máscara en oposición a una superficie del conjunto sensor, en donde la máscara incluye ventanas que tienen un área menor que los píxeles del conjunto. Un desplazador de máscara cambia las posiciones de las ventanas en separaciones más pequeñas que aquellas entre los píxeles. La luz que atraviesa la ventana de la máscara y entra en cada píxel del conjunto sensor se divide en un número deseado de subdivisiones a medida que la máscara cambia de posición, aumentando así la resolución espacial de la imagen en relación con el tamaño de píxel. La máscara se puede realizar mediante una máscara de metal o mediante una manipulación electrónica de una sustancia que tenga características polarizantes, como los cristales líquidos.

30 La patente EP 1.198.119, a nombre de Parsons, con el título "Improved resolution for an electric image sensor array", divulga la introducción de una máscara/fuente de luz parcialmente oclusiva entre el conjunto sensor y la imagen. La mejora de la resolución se obtiene mediante un desplazamiento entre el conjunto y la máscara/fuente de luz y calculando los valores de la escala de grises de la resolución mejorada partiendo de los distintos cambios en las cargas de los sensores individuales del conjunto.

35 La solicitud PCT con el número de publicación WO 98/46007, a nombre de Bone, con el título "Imaging system and method", se centra en mejorar la resolución de un dispositivo de acoplamiento de cargas que tiene un conjunto bidimensional de elementos detectores sensibles a la luz. Las áreas diferenciadas de cada elemento detector se enmascaran de manera secuencial con una máscara opaca perforada elegida para que admita conjuntos cuadrados de (n x n) de elementos de apertura para cada detector y para que las aperturas se puedan disponer como un grupo integrado que facilite el refinamiento jerárquico de la resolución.

40 La patente US 6.005.682, a nombre de Wu et al., con el título "Resolution enhancement by multiple scanning with a low-resolution, two-dimensional sensor array", se centra en la formación de imágenes de alta resolución con formadores de imágenes bidimensionales de baja resolución cuyos sensores son solo una fracción de un área de píxel seleccionada. Los sensores se desplazan paso a paso por una imagen con un desplazador paso a paso óptico o mecánico para adquirir una imagen en cada posición de los sensores. Se obtienen varias imágenes de sensores individuales, que tienen un área detectada sustancialmente menor que el área de los píxeles del conjunto sensor. El barrido posterior se realiza mediante espejos o lentes móviles que se disponen entre una muestra iluminada y un área de sensor.

50 La patente US 5.712.685, a nombre de Dumas, con el título "Device to enhance imaging resolution", se centra en mejorar la resolución de un sensor de detección de imágenes de matriz de plano focal (FPA) con la metodología del microbarrido. Se sitúa una máscara que tiene un patrón de tablero de ajedrez de áreas opacas y transparentes delante y adyacente a la FPA sobre la cual se enfoca de manera óptica una imagen de una escena. La máscara y la FPA se desplazan, la una con respecto a la otra, en un número de micropasos que se extienden en la misma dirección que las columnas/filas de la cuadrícula de la FPA. Los micropasos tienen las mismas longitudes y son cada uno una

fracción de la longitud de un elemento detector. En una dirección, las áreas opacas de la máscara cubren progresivamente las mismas áreas de los elementos detectores en pasos separados para cada movimiento de micropaso, al mismo tiempo que las áreas transparentes de la máscara descubren progresivamente áreas iguales de otros elementos detectores para cada paso separado. Las salidas de los elementos detectores proporcionan señales para cortes de muestra de la escena para cada micropaso y se reconstruye una imagen de la escena a partir de las señales.

Un artículo a nombre de Wang et al., con el título "The effect of fill factor of infrared FPA sensor on microscanning imagery quality", publicado en Proceedings of SPIE Vol. 5640, ps. 417-424, se centra en un estudio de modos de microbarrido óptimos en función de distintos factores de relleno en un sensor infrarrojo. El microbarrido es una técnica importante en el campo de la formación de imágenes IR de alta resolución, que puede aumentar la resolución del sistema y mejorar el rendimiento de los sistemas de formación de imágenes. Bajo algunos supuestos, este artículo presenta la función de transferencia de modulación (MTF) de promediación de muestreo de un conjunto de detectores a una frecuencia de Nyquist espacial como figura de mérito para evaluar de forma cuantitativa la mejora de los distintos modos de microbarrido en la calidad de la imagen con distintos factores de relleno (esto es, los factores de relleno 1, 2/3, 1/2, 1/3) de un sensor infrarrojo. Se simulan procesos de formación de imágenes de muestreo de las matrices de plano focal con los factores de relleno anteriores.

La patente US 5.371.369, concedida a Kent y cedida a Litton Systems, Inc., con el título "Conformal Cold Baffle for Optical Imaging Systems" se centra en un deflector de luz difusa enfriado para usarlo en un sistema de formación de imágenes, como una cámara infrarroja. El deflector incluye una porción encerrada trapezoidal que se forma exactamente para contener la envoltura de los rayos de luz que atraviesan el deflector. De esta forma, se minimiza el espacio entre la envoltura de los rayos de luz y la superficie interna del deflector, lo que da como resultado una minimización de la superficie y la masa total del deflector, lo que a su vez da como resultado una minimización de la carga de refrigeración del sistema. La carga de refrigeración más baja requiere un refrigerador menor, lo que da como resultado un tamaño del sistema, consumo de energía, vibración, periodo de enfriamiento y coste de operación reducidos. La superficie exterior del detector está cubierta de un material reflectante para reflejar los fotones de luz. La superficie interior se hace rugosa y se ennegrece para absorber los fotones de la luz dispersa que entran en el deflector.

Un artículo a nombre de Fortin et al., con el título "Realization of a fast microscanning device for infrared focal plane arrays", publicado en Proceedings of SPIE Vol. 2743, ps.185-196, se centra en una técnica de microbarrido para duplicar la resolución de un formador de imágenes sin barrido determinado. El microbarrido consiste en tomar varias imágenes de la misma escena mientras se desplaza la imagen a cada momento por el plano del detector en una distancia igual a una fracción de la separación del detector. El microbarrido está limitado por el tiempo necesario para desplazar la imagen de un punto al otro y por la precisión de los movimientos. Este artículo describe un dispositivo de formación de imágenes por microbarrido rápido que incluye tres secciones principales: un cabezal de microbarrido, un controlador y un amplificador de energía. El cabezal de microbarrido está hecho de una lente y una mesa de microtraslación biaxial accionada por dos dispositivos de traslación piezoeléctricos. El controlador acciona un amplificador de energía de alta tensión que, a su vez, acciona el traductor. El controlador admite cuatro modos operativos: posición fija, microbarrido 2x2, 3x3 y 4x4, y el sistema puede funcionar en circuito abierto y cerrado para desplazamientos precisos. El sistema puede servir de ayuda para identificar objetos detectados.

EXPLICACIÓN RESUMIDA DE LA TÉCNICA DIVULGADA

Según un aspecto de la técnica divulgada, se proporciona de esta forma un aparato para aumentar la resolución de un detector infrarrojo de formación de imágenes enfriado criogénicamente y sellado al vacío según la reivindicación 1. El aparato incluye un conjunto detector bidimensional de píxeles fotosensibles dispuestos en una matriz, un filtro de enmascaramiento, un elemento óptico, un medio de desplazamiento y un procesador. El conjunto detector puede funcionar en el rango de longitud de onda de 1 a 15 μm y se expone sucesivamente a una escena de imagen para adquirir varias muestras de formación de imágenes de la escena. El filtro de enmascaramiento se dispone entre el conjunto detector y la escena de imagen, y se mantiene en una posición fija respecto al conjunto detector. El filtro de enmascaramiento enmascara una parte de la región activa de los píxeles dentro del rango de longitud de onda de 1 a 15 μm en una cantidad de reducción de factor de relleno para cada una de las muestras de formación de imágenes, de manera que solo se forma una imagen de una porción de cada área de píxeles de la escena de imagen en el píxel enmascarado correspondiente del conjunto detector. La óptica se dispone entre el filtro de enmascaramiento y la escena de imagen, y dirige la radiación incidente hacia el conjunto detector a través del filtro de enmascaramiento. El medio de desplazamiento desplaza sucesivamente la trayectoria óptica de la escena de imagen en relación con el filtro de enmascaramiento y el conjunto detector entre cada una de las muestras de formación de imágenes en un incremento de desplazamiento que corresponde a la cantidad de reducción del factor de relleno para proporcionar una formación de imágenes de distintas regiones de subpíxeles en cada una de las muestras de formación de imágenes. El procesador reconstruye un cuadro de imagen a partir de las muestras de formación de imágenes adquiridas, de forma que el cuadro de imagen reconstruido tiene una resolución mayor que la resolución intrínseca del detector, en un factor definido por la cantidad de reducción del factor de relleno. El filtro de enmascaramiento puede ser un recubrimiento dispuesto en el conjunto detector. El filtro de enmascaramiento puede incluir configurar el conjunto detector de manera que la región fotosensible de los píxeles del conjunto sea menor que la región

- fotosensible potencialmente máxima de los píxeles. El medio de desplazamiento puede desplazar la trayectoria óptica de la escena de imagen en relación con el filtro de enmascaramiento reposicionando la óptica respecto al filtro de enmascaramiento y al conjunto detector. De forma alternativa, el medio de desplazamiento puede desplazar la trayectoria óptica de la escena de imagen en relación con el filtro de enmascaramiento y el conjunto detector reposicionando de forma conjunta el filtro de enmascaramiento y el conjunto detector respecto a la óptica. El número f de la óptica del detector se puede seleccionar según la cantidad de reducción del factor de relleno para proporcionar una sensibilidad seleccionada del detector. La sensibilidad seleccionada del detector se puede corresponder con la sensibilidad de un detector al que no se haya reducido el factor de relleno. El detector puede ser un detector térmico de formación de imágenes.
- Según otro aspecto de la técnica divulgada, se proporciona por tanto un método para aumentar la resolución de un detector infrarrojo de formación de imágenes enfriado criogénicamente y sellado al vacío según la reivindicación 9, de forma que el detector incluye un conjunto detector bidimensional de píxeles fotosensibles dispuestos en una matriz, de forma que el conjunto detector puede funcionar en el rango de longitud de onda de 1 a 15 μm . El método incluye los procesos de exponer sucesivamente el conjunto detector a una escena de imagen para adquirir varias muestras de formación de imágenes de la escena y enmascarar parte de la región activa de los píxeles dentro del rango de longitud de onda de 1 a 15 μm en una cantidad de reducción del factor de relleno para cada una de las muestras de formación de imágenes mediante un filtro de enmascaramiento dispuesto en el recipiente Dewar de almacenamiento criogénico y mantenido a una posición fija respecto al conjunto detector, de forma que solo se represente una porción de cada área de píxeles de la escena de imagen en el píxel enmascarado correspondiente del conjunto detector. Además, el método también incluye el proceso de desplazar sucesivamente la trayectoria óptica de la escena de imagen en relación con el filtro de enmascaramiento y el conjunto detector entre cada una de las muestras de formación de imágenes en un incremento de desplazamiento que corresponde a la cantidad de reducción del factor de relleno para proporcionar una formación de imágenes de distintas regiones de subpíxeles en cada una de las muestras de formación de imágenes. El método incluye además el proceso de reconstruir un cuadro de imagen partiendo de las muestras de formación de imágenes adquiridas, de forma que el cuadro de imagen reconstruido tiene una resolución mayor que la resolución intrínseca del detector en un factor definido por la cantidad de reducción del factor de relleno. El método también puede incluir el proceso de seleccionar el número f de la óptica de los detectores según la cantidad de reducción del factor de relleno para proporcionar una sensibilidad seleccionada del detector. La sensibilidad seleccionada del detector se puede corresponder con la sensibilidad de un detector al que no se haya reducido el factor de relleno.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La técnica divulgada se entenderá y apreciará mejor partiendo de la siguiente descripción detallada junto con los dibujos. En estos:

- la Figura 1 es una ilustración esquemática de una vista en perspectiva de un aparato para aumentar la resolución de un detector infrarrojo de formación de imágenes construido y que puede funcionar según una forma de realización de la técnica divulgada;
- la Figura 2A es una ilustración esquemática de una vista en perspectiva de un grupo inicial de subcuadros de imágenes adquiridas en muestras sucesivas de formación de imágenes con el aparato de la Figura 1;
- la Figura 2B es una ilustración esquemática de una vista en perspectiva de un grupo posterior de subcuadros de imágenes adquiridas en muestras sucesivas de formación de imágenes con el aparato de la Figura 1;
- la Figura 2C es una ilustración esquemática de una vista en perspectiva de otro grupo posterior de subcuadros de imágenes adquiridas en muestras sucesivas de formación de imágenes con el aparato de la Figura 1;
- la Figura 2D es una ilustración esquemática de una vista en perspectiva de un grupo final de subcuadros de imágenes adquiridas en muestras sucesivas de formación de imágenes con el aparato de la Figura 1;
- la Figura 3 es una ilustración esquemática de un cuadro de imagen reconstruido formado a partir de los subcuadros de imagen de las Figuras 2A, 2B, 2C y 2D comparada con un cuadro de imagen normal del detector de formación de imágenes; y
- la Figura 4 es una ilustración esquemática de un gráfico que muestra la función de transferencia de modulación (MTF) en función de la frecuencia espacial de distintas cantidades de reducción del factor de relleno según la técnica divulgada.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS FORMAS DE REALIZACIÓN

La técnica divulgada supera los inconvenientes del estado de la técnica proporcionando un método y un aparato para aumentar la resolución intrínseca de un detector infrarrojo (IR) de formación de imágenes sin aumentar el tamaño total ni la densidad de píxeles del conjunto detector. En su lugar, se aumenta la resolución espacial efectiva del detector IR reduciendo la región activa en los píxeles individuales del conjunto detector (esto es, reduciendo el «factor de relleno»). Se adquieren varias muestras de formación de imágenes de la misma escena de imagen, en las que solo se representa una porción de cada píxel de la escena de imagen en el píxel correspondiente del conjunto detector. La escena de imagen se desplaza sucesivamente en relación con el conjunto detector para proporcionar una formación de imágenes de distintas configuraciones de regiones de subpíxeles en cada una de las muestras de formación de imágenes. De esta forma, se reconstruye un cuadro de imagen de mayor resolución partiendo de las muestras individuales de formación de imágenes.

A continuación, se hace referencia a la Figura 1, que es una ilustración esquemática de una vista en perspectiva de un aparato, indicado generalmente con el número de referencia 100, para aumentar la resolución de un detector infrarrojo de formación de imágenes construido y que puede funcionar según una forma de realización de la técnica divulgada. El aparato 100 incluye un conjunto detector IR 110 y un medio de reducción del factor de relleno 120 compuesto por un filtro de enmascaramiento 130 y un elemento óptico 140. El filtro de enmascaramiento 130 y el elemento óptico 140 se disponen entre el conjunto detector 110 y la escena 150 que representa por el detector. El conjunto detector 110 se compone de un patrón en forma de cuadrícula o de matriz de píxeles fotosensibles dispuestos en filas y columnas (p. ej., un conjunto de 320 x 240 que incluya 320 píxeles a lo largo de la anchura del conjunto y 240 píxeles a lo largo de la altura del conjunto). Los píxeles del conjunto 110 pueden ser de cualquier tamaño o área adecuados, en donde el tamaño de píxel individual es, por lo general, sustancialmente uniforme en todos los píxeles del conjunto. El medio de reducción del factor de relleno 120 se pone en funcionamiento para reducir selectivamente la región activa (esto es, fotosensible) de los píxeles del conjunto detector 110 enmascarando o bloqueando una porción de la región fotosensible de los píxeles para que no reciban radiación de la escena de imagen, de forma que solo se represente una porción del píxel de la escena de imagen en el píxel correspondiente del conjunto detector. La región activa y la región enmascarada de los píxeles se desplazan progresivamente durante muestras sucesivas de formación de imágenes de la escena. En particular, el elemento óptico 140 proyecta una región de imagen 152 de la escena de imagen 150 en el filtro de enmascaramiento 130, que a su vez bloquea una porción de la región de imagen 152 para que no alcance el píxel 111 correspondiente del conjunto detector y, al mismo tiempo, solo permite a la porción 154 restante de la región de imagen 152 alcanzar el píxel 111. Por consiguiente, el píxel 111 incluye una región representada 114 que es menor que el área total (esto es, el área potencial fotosensible) del píxel 111 del conjunto. El filtro de enmascaramiento 130 incluye una región de enmascaramiento 132 y una región de no enmascaramiento 134, de forma que se impide el paso (hacia el conjunto detector 110) de la radiación incidente en la región de enmascaramiento 132 (mediante el elemento óptico 140), mientras que se permite el paso de la radiación incidente en la región de no enmascaramiento 134. Por ejemplo, la región de enmascaramiento 132 se puede realizar mediante una porción de filtro sustancialmente opaca o no transmisora, o un recubrimiento no transmisor dispuesto en la porción requerida, mientras que la región de no enmascaramiento 134 se puede realizar mediante una porción de filtro 130 sustancialmente transmisora, como una ventana o un orificio en la misma.

Cabe destacar que cualquiera de los componentes del medio de reducción del factor de relleno 120 se puede integrar total o parcialmente con el detector IR de formación de imágenes, según la técnica divulgada, o puede estar separado del mismo. Por ejemplo, se puede situar el filtro de enmascaramiento 130 dentro de la carcasa que encierra el detector IR, mientras que el elemento óptico 140 se puede situar fuera de la carcasa, siempre y cuando el elemento óptico 140 y el filtro de enmascaramiento tengan la función de realizar la operación de enmascaramiento de la escena de imagen 150 nombrada anteriormente en el conjunto detector 110.

A continuación, se hace referencia a las Figuras 2A, 2B, 2C y 2D. La Figura 2A es una ilustración esquemática de una vista en perspectiva de un grupo inicial de subcuadros de imágenes adquiridos en muestras sucesivas de formación de imágenes con el aparato de la Figura 1. La Figura 2B es una vista en perspectiva de una ilustración esquemática de un grupo posterior de subcuadros de imágenes adquiridos en muestras sucesivas de formación de imágenes con el aparato de la Figura 1. La Figura 2C es una vista en perspectiva de una ilustración esquemática de otro grupo posterior de subcuadros de imágenes adquiridos en muestras sucesivas de formación de imágenes con el aparato de la Figura 1. La Figura 2D es una vista en perspectiva de una ilustración esquemática de un grupo final de subcuadros de imágenes adquiridos en muestras sucesivas de formación de imágenes con el aparato de la Figura 1. Se representa el conjunto detector 110 con nueve (9) píxeles dispuestos en una matriz de tres por tres (3x3). El filtro de enmascaramiento 130 se dispone directamente en el conjunto 110 e incluye nueve ventanas (esto es, regiones de no enmascaramiento 134) situadas en una subregión de cada uno de los píxeles del detector ($DP_{x,y}$) del conjunto detector 110, mientras que el área restante del filtro de enmascaramiento 130 se compone de regiones de enmascaramiento 132. De forma similar, la escena de imagen 150 se divide en nueve píxeles de imagen ($IP_{x,y}$) dispuestos en una matriz de tres por tres (3x3) (esto es, de forma que cada píxel de imagen represente la región de la escena de imagen 150 que habitualmente se proyectaría en un píxel del detector correspondiente durante la adquisición de imagen normal).

Se adquiere un primer grupo de subcuadros de la escena de imagen 150 en la Fig. 2A. La luz (radiación IR) emitida desde la escena de imagen 150 se dirige hacia el conjunto detector 110 a través del filtro de enmascaramiento 130 mediante el elemento óptico 140 (no mostrado), de forma que solo la radiación que atraviesa las ventanas 134

alcance el conjunto detector 110. En particular, cada píxel del detector del conjunto detector 110 captura una porción de un píxel de imagen correspondiente de la escena de imagen 150. Por ejemplo, haciendo referencia a la primera muestra de formación de imágenes («subcuadro 1») de la Fig. 2A, la radiación que corresponde a un píxel de imagen de la esquina superior derecha ($IP_{1,1}$) se dirige hacia un píxel del detector situado en la esquina superior derecha ($DP_{1,1}$) del conjunto detector 110. Una porción de la radiación (154) atraviesa la ventana del filtro de enmascaramiento e incide en una subregión 114 del píxel del detector $DP_{1,1}$. El resto de la radiación (152) del píxel de imagen $IP_{1,1}$ es bloqueada por la región de enmascaramiento 132, de forma que ya no alcanza el píxel del detector $DP_{1,1}$. Por consiguiente, el píxel del detector $DP_{1,1}$ incluye una región representada 114 y una región no representada 112. De forma similar, el próximo píxel de imagen ($IP_{1,2}$) de la fila superior de la escena de imagen 150 alcanza el píxel del detector $DP_{1,2}$ después de atravesar la ventana del filtro de enmascaramiento, de forma que solo incide en una subregión del píxel del detector $DP_{1,2}$ una porción del píxel de imagen $IP_{1,2}$. Se muestra un medio de reducción del factor de relleno 120 que realiza un ejemplo de reducción del factor de relleno del 25 % (esto es, «25 %FF»), lo que significa que cada región representada 114 ocupa aproximadamente un cuarto del área del píxel correspondiente, mientras que cada región no representada 112 ocupa un área de aproximadamente tres cuartos del píxel correspondiente. El resto de píxeles ($DP_{x,y}$) del conjunto detector 110 se representan de forma análoga durante la primera muestra de formación de imágenes (subcuadro), lo que da como resultado que cada píxel del detector adquiera una región representada 114 en su cuadrante superior izquierdo, mientras que el resto de los píxeles del detector no esté representado.

Después de la adquisición de la primera muestra de formación de imágenes, la porción de cada píxel de imagen representado en el conjunto detector 110 se desplaza para las posteriores muestras de formación de imágenes. Se selecciona el incremento de desplazamiento entre cada muestra de formación de imágenes según la cantidad de reducción del factor de relleno y, en general, es igual a una fracción de la anchura del píxel (definida como la distancia entre el punto medio de píxeles adyacentes del conjunto detector). En este ejemplo, la cantidad de reducción del factor de relleno es del 25 % (25 % FF) y, de esta forma, el incremento del desplazamiento también se selecciona para que sea del 25 % o, aproximadamente, de un cuarto de la anchura de píxel de los píxeles del detector. El desplazamiento se puede realizar ajustando la línea de mira del medio de reducción del factor de relleno 120 en relación con el conjunto detector 110 (p. ej., ajustando adecuadamente el filtro de enmascaramiento 130 y/o el elemento óptico 140). Haciendo referencia a la segunda muestra de formación de imágenes («subcuadro 2») en la Fig. 2A, cada píxel del detector $DP_{x,y}$ recibe una radiación incidente de otra porción de píxel de imagen $IP_{x,y}$, de forma que la región representada 114 corresponde a un cuadrante superior medio del píxel de imagen correspondiente $IP_{x,y}$ (p. ej., el cuadrante representado del «subcuadro 1» se desplaza a la derecha en un cuarto de la anchura de píxel, de forma que el segundo cuadrante de la imagen se superpone parcialmente sobre el primer cuadrante de la imagen). Haciendo referencia a la tercera muestra de formación de imágenes («subcuadro 3»), la línea de mira se vuelve a desplazar, de forma que la región representada 114 de cada píxel del detector $DP_{x,y}$ corresponde a un cuadrante superior derecho del píxel de imagen $IP_{x,y}$ correspondiente (p. ej., el cuadrante representado del «subcuadro 2» se desplaza a la derecha en un cuarto de la anchura del píxel).

Se adquieren muestras de formación de imágenes adicionales de forma análoga, cubriendo las porciones superpuestas restantes (p. ej., los cuadrantes) de cada píxel de imagen, ajustando sucesivamente la línea de mira de forma sistemática en el mismo incremento de desplazamiento (p. ej., un cuarto de la anchura del píxel) a lo largo tanto del eje vertical como del eje horizontal de la escena de imagen 150, aplicando una técnica denominada «microbarrido», conocida en el estado de la técnica. Por ejemplo, haciendo referencia a la quinta muestra de formación de imágenes («subcuadro 5») de la Fig. 2B, la línea de mira se desplaza hacia abajo en el incremento de desplazamiento respecto a la primera muestra de formación de imágenes, de forma que la región representada 114 de cada píxel del detector $DP_{x,y}$ corresponde a un cuadrante izquierdo medio del píxel de imagen $IP_{x,y}$ correspondiente (p. ej., el cuadrante de la imagen del «subcuadro 1» se desplaza hacia abajo en un cuarto de la anchura del píxel). El resto de las muestras de formación de imágenes («subcuadro 6» a «subcuadro 16») dan como resultado que se adquieran porciones de píxeles de imagen adicionales (esto es, representar una porción respectiva que no se hubiera adquirido en un subcuadro anterior).

La alineación en la línea de mira del medio de reducción del factor de relleno 120 en relación con el conjunto detector 110 se puede desplazar sucesivamente utilizando cualquier mecanismo o técnica adecuados para obtener la subregión representada deseada en los píxeles del detector en cada muestra de formación de imágenes. Por ejemplo, el filtro de enmascaramiento 130 y el conjunto detector 110 permanecen en una posición fija y, de esta forma, las posiciones de las regiones de enmascaramiento 132 y de las regiones de no enmascaramiento 134 permanecen estacionarias, mientras que el elemento óptico 140 se reposiciona sucesivamente para cada muestra de formación de imágenes, para desplazar el ángulo direccional en el que el elemento óptico 140 dirige la radiación de la escena de imagen 150. De forma alternativa, el filtro de enmascaramiento 130 y el conjunto detector 110 se reposicionan juntos en relación con el elemento óptico 140 (esto es, en donde el filtro de enmascaramiento 130 permanece fijo respecto al conjunto detector 110) para ajustar la trayectoria óptica de la escena de imagen 150 en cada muestra de formación de imágenes. Cabe destacar que el tamaño real de las regiones representadas en los píxeles del detector puede variar, como, por ejemplo, ajustando las características del filtro de enmascaramiento 130 (p. ej., tamaño, cantidad y/o posiciones relativas de las regiones de no enmascaramiento 134) y/o ajustando las características ópticas del elemento óptico 140. En algunos detectores, como los detectores sellados al vacío y/o los detectores enfriados criogénicamente, resulta muy difícil reposicionar un filtro de enmascaramiento en relación con el conjunto detector, puesto que los dos componentes se deberían situar lo más cerca posible el uno del otro. Por

consiguiente, un mecanismo para reposicionar un filtro de enmascaramiento móvil necesitaría situarse dentro del recipiente Dewar de almacenamiento criogénico (matraz de vacío) junto con el filtro de enmascaramiento y el conjunto detector. Ello requiere que un mecanismo de este tipo sea excepcionalmente pequeño y rápido, y al mismo tiempo sea capaz de funcionar a temperaturas criogénicas. Además, el recipiente Dewar de almacenamiento criogénico requeriría un aumento significativo, así como un mecanismo de enfriamiento mejorado para soportar la carga de calentamiento adicional. De esta forma, si bien es factible aplicar un filtro de enmascaramiento móvil, los aspectos nombrados darían como resultado un detector con aplicaciones prácticas mínimas debido al elevado coste, al mayor consumo de energía, al mayor volumen y a la menor fiabilidad resultantes. Por ello, según una forma de realización de la técnica divulgada, se mantiene un filtro de enmascaramiento estacionario a una posición fija y una orientación en relación con el conjunto detector, mientras que la trayectoria óptica de la escena de imagen se ajusta sucesivamente en relación con el filtro de enmascaramiento estacionario entre las muestras de formación de imágenes.

Las distintas subregiones de los píxeles de imagen $IP_{x,y}$ de la escena de imagen 150 se pueden representar en cualquier orden o permutación. Por ejemplo, se puede representar primero una fila inferior de porciones de píxeles de imagen (esto es, los primeros subcuadros representados en la Fig. 2D) seguida de una fila superior, y así sucesivamente; o, de forma alternativa, se puede representar una primera columna de porciones de píxeles de imagen en un primer grupo de subcuadros, seguida de una columna adyacente, y así sucesivamente. Además, las subregiones representadas pueden ser no consecutivas dentro de un subcuadro determinado (p. ej., se puede adquirir simultáneamente un cuadrante superior izquierdo y un cuadrante inferior derecho del píxel de la imagen en un subcuadro, mientras que se adquieren simultáneamente un cuadrante superior derecho y un cuadrante inferior izquierdo del píxel de la imagen en un subcuadro posterior).

Después de que se hayan adquirido todos los subcuadros en sucesivas muestras de formación de imágenes, en donde cada subcuadro individual corresponde a una subregión representada distinta de cada píxel de imagen de la escena de imagen 150, se construye un cuadro de imagen final partiendo de todos los subcuadros adquiridos. Concretamente, se procesan y se combinan todas las subregiones representadas para cada píxel de imagen según un esquema de procesamiento de imagen adecuado. A continuación, se hace referencia a la Figura 3, que es una ilustración esquemática de un cuadro de imagen reconstruido, identificado con el número de referencia 164, formado partiendo de los subcuadros de imagen de las Figuras 2A, 2B, 2C y 2D, comparado con un cuadro de imagen normal, identificado con el número de referencia 162, del detector de imagen. El cuadro de imagen normal 162 incluye un total de 9 píxeles (3x3), mientras que el cuadro de imagen reconstruido 164 incluye un total de 144 subpíxeles (12x12), que proporcionan un aumento de resolución de 16 veces (esto es, aumentan el número de píxeles en un factor de cuatro a lo largo de los ejes horizontal y vertical). Particularmente, cada píxel individual en el cuadro de imagen reconstruido 164 (que corresponde a un píxel del cuadro de imagen 162) se compone de 16 subpíxeles dispuestos en una matriz de 4x4. Cada subpíxel del cuadro de imagen reconstruido 164 se forma partiendo de una combinación de los respectivos subcuadros en los que se había representado el subpíxel. Por ejemplo, el subpíxel 168 del cuadro de imagen 164 se forma basándose en los subcuadros 1 y 2 (Fig. 2A) y los subcuadros 5 y 6 (Fig. 2B), en los que se adquirió esa porción de subpíxel particular de la escena de imagen 150 (en distintas configuraciones).

El cuadro de imagen reconstruido 164 representa un aumento de la resolución de 16 veces respecto al cuadro de imagen 162, que es un cuadro de imagen que se obtendría como resultado de una formación de imágenes con el conjunto detector 110 (esto es, sin aplicar la técnica descrita). La resolución intrínseca del conjunto detector 110 se representa en una densidad de píxel de 3x3 (esto es, 3 filas por 3 columnas de píxeles = 9 píxeles en total), como se representa en el cuadro de imagen 162, mientras que el cuadro de imagen reconstruido 164 incluye 12x12 subpíxeles en la misma área fija del conjunto 110. Debido a ello, el cuadro de imagen final contiene un mayor detalle de imagen (esto es, en un factor de dieciséis) en comparación con un cuadro de imagen estándar, puesto que cada píxel del cuadro de imagen reconstruido se compone de dieciséis subpíxeles individuales, lo que proporciona cuatro veces el detalle o la información a lo largo de cada eje que de lo que estaría contenido en el píxel correspondiente del cuadro de imagen estándar.

Se aprecia que se pueden obtener factores de aumento de la resolución alternativos (esto es, la cantidad en la que se aumenta la resolución de la imagen) modificando el incremento de desplazamiento entre subcuadros y la cantidad de reducción del factor de relleno (esto es, la cantidad en la que se reduce la región activa de los píxeles del detector). Por ejemplo, para aumentar la resolución de imagen en un factor de 9 (a lo largo de los ejes horizontal y vertical), el incremento de desplazamiento se ajustaría para que fuera aproximadamente de un noveno (1/9) de la anchura del píxel del detector, mientras que cada muestra de formación de imágenes representaría una subregión que ocupara un área de aproximadamente un noveno (1/9) de los píxeles de la imagen (esto es, que corresponde a un factor de reducción del factor de relleno de 1/9 o aproximadamente 11 %). Por ejemplo, se puede utilizar un filtro de enmascaramiento 130 que tenga ventanas o regiones de no enmascaramiento 134 que sean un noveno (1/9) del tamaño de los píxeles del detector para proporcionar una formación de imágenes del tamaño de la subregión del píxel de imagen deseado, en lugar del filtro de enmascaramiento 130 formado en las Figuras 2A-2D, que incluye ventanas que son un cuarto (1/4) del tamaño de píxel del detector. Se obtendría un total de 81 subcuadros por microbarrido (después de un incremento del desplazamiento de un noveno (1/9) de la anchura del píxel del detector entre los subcuadros), a partir de los cuales se puede reconstruir un cuadro de imagen final de mayor resolución.

Cabe destacar que la reducción del factor de relleno de los píxeles del detector sirve para reducir la sensibilidad total del detector, puesto que solo llega al conjunto detector una fracción de toda la radiación de la escena de imagen. Para compensar este efecto, el número f (también conocido como la «relación focal», definida como la relación entre el diámetro de la pupila de entrada y la longitud focal de la lente) de la óptica del detector se disminuye en un factor 5 que corresponde a la cantidad de reducción del factor de relleno (o con el incremento de desplazamiento entre muestras de formación de imágenes). Por consiguiente, se recibe más radiación desde la escena de imagen, lo que compensa la reducción en la radiación recibida que resulta de la reducción del factor de relleno. La reducción del número f también proporciona una función de transferencia de modulación (MTF) óptica mejorada, que generalmente representa la habilidad del detector de distinguir entre detalles en la imagen adquirida, lo que le permite al detector 10 soportar la resolución espacial mejorada del cuadro de imagen reconstruido. De esta forma, la técnica divulgada aumenta el rendimiento del detector IR de formación de imágenes reduciendo esencialmente la sensibilidad del detector (reduciendo el factor de relleno) y compensando esta reducción al proporcionar una óptica de detector adecuada que proporciona un nivel adecuado de sensibilidad total junto con una resolución espacial de imagen sustancialmente mayor.

A continuación, se hace referencia a la Figura 4, que es una ilustración esquemática de un gráfico, identificado generalmente con el número de referencia 170, que muestra la función de transferencia de modulación (MTF) en función de la frecuencia espacial de distintas cantidades de reducción del factor de relleno según la técnica divulgada. El gráfico 170 representa la MTF del detector en función de la frecuencia espacial o «la frecuencia de muestreo del detector» (en correspondencia con una representación normalizada de la resolución espacial). Al realizar el 20 «microbarrido normal» para aumentar la resolución del detector (esto es, sin reducir el factor de relleno de los píxeles del detector), se limita el aumento de resolución (la información adicional que se puede obtener de la imagen) en la frecuencia de Nyquist del detector (en donde la frecuencia de Nyquist es igual a la mitad de la frecuencia de muestreo espacial del píxel). Por ejemplo, cuando se forman imágenes sin ninguna reducción del factor de relleno (esto es, «100 %FF»), el desplazamiento entre cada microbarrido a incrementos de menos de la mitad de la separación del 25 píxel del detector no aumentaría la resolución de imagen total más allá de un factor de $x2$ (puesto que la MTF llega a cero más allá del punto de frecuencia de «microbarrido $2X$ » en el gráfico y, con ello, es esencialmente inutilizable para la formación de imágenes). Por el contrario, cuando se realiza el microbarrido junto con la reducción del factor de relleno, se puede aumentar la resolución espacial de la imagen del detector en un factor mayor (esto es, no está limitada por la frecuencia de Nyquist del detector) mientras que sigue obteniendo información adicional de la imagen. 30 Por ejemplo, si el factor de relleno se reduce al 25 % del área total activa de píxel («25 %FF»), se puede efectuar un microbarrido a incrementos de desplazamiento de hasta $1/4$ de la separación del píxel del detector (aumentando así la resolución de imagen en $x4$ a lo largo de cada eje = total de $x16$), mientras que sigue siendo posible distinguir entre la información adicional (puesto que la MTF sigue estando por encima de cero). Reduciendo aún más el factor de relleno se puede efectuar un microbarrido a frecuencias mayores/incrementos de desplazamiento menores para 35 proporcionar un aumento de la resolución aún mayor. Cabe destacar que la cantidad potencial de reducción del factor de relleno (y, con ello, el aumento de resolución potencial) que se puede realizar realmente para un detector de imagen determinado está limitada generalmente por restricciones del diseño optomecánico. Estas limitaciones en la capacidad de diseñar y fabricar la óptica de alta resolución adecuada pueden variar según el diseño y los requisitos particulares del sistema.

Haciendo de nuevo referencia a la Figura 1, se puede aplicar el medio de reducción del factor de relleno 120 utilizando cualquier dispositivo, mecanismo o técnica operativa adecuados para reducir el factor de relleno de los píxeles del detector en la cantidad deseada. Por ejemplo, el medio de reducción del factor de relleno 120 se puede aplicar, 40 alternativamente, mediante solo un filtro de enmascaramiento que se repositone y/o reoriente sucesivamente para obtener distintas muestras de formación de imágenes, o mediante solo un elemento óptico que ajuste la trayectoria óptica de la radiación de la escena de imagen 150 en incrementos sucesivos para cada muestra de formación de 45 imágenes. También de forma alternativa, el medio de reducción del factor de relleno 120 se puede aplicar configurando el conjunto detector 110 de forma que la región activa (fotosensible) de los píxeles sea menor que la región activa potencialmente máxima. Por ejemplo, los píxeles se pueden configurar de forma electrónica, de manera que solo esté activa una región de subpíxel seleccionada durante cada muestra de formación de imágenes.

La técnica divulgada se puede aplicar a todo tipo de detectores IR, se puede poner en funcionamiento en cualquier punto dentro del rango de longitud de onda de aproximadamente 1 a $15\ \mu\text{m}$, abarcando las longitudes de onda LWIR, MWIR y SWIR. La técnica divulgada se puede aplicar particularmente a cámaras de formación de imágenes térmicas y, particularmente, a formadores de imágenes térmicos sellados al vacío y enfriados criogénicamente, en donde el término «enfriados criogénicamente», como se utiliza en la presente memoria, abarca distintos tipos de detectores 50 de baja temperatura, que incluyen aquellos que funcionan a temperaturas por encima de lo que se podrían considerar temperaturas criogénicas según distintas definiciones (por ejemplo, incluyendo temperaturas entre aproximadamente $-150\ ^\circ\text{C}$ (123 K) y aproximadamente $-120\ ^\circ\text{C}$ (153 K). 55

Según la técnica divulgada, se proporciona un método para aumentar la resolución de un detector IR de formación de imágenes que comprende un conjunto detector bidimensional de píxeles fotosensibles dispuestos en una matriz. El método incluye el proceso de exponer sucesivamente el conjunto detector a una escena de imagen, adquirir varias 60 muestras de formación de imágenes de la escena de imagen, en donde para cada muestra de información de imágenes se reduce la región de los píxeles que acumula radiación incidente de la escena de imagen de tal forma que solo se representa una porción del área de los píxeles de la escena representada en el píxel correspondiente

5 del conjunto detector. El método incluye además el proceso de desplazar sucesivamente la escena de imagen en relación con el conjunto detector en un incremento del desplazamiento igual a una fracción de la anchura del píxel de los píxeles del conjunto para proporcionar una formación de imágenes de regiones de subpíxel sucesivas en cada una de las muestras de formación de imágenes. El método incluye además el proceso de reconstruir un cuadro de imagen con una resolución mayor, en un factor definido por el incremento de desplazamiento, que la resolución intrínseca del detector, partiendo de las muestras de formación de imágenes adquiridas.

El experto en la materia apreciará que la técnica divulgada no se limita a lo que se ha mostrado particularmente y se ha descrito arriba.

REIVINDICACIONES

1. Aparato (100) para aumentar la resolución de un detector infrarrojo de formación de imágenes, que comprende: un conjunto detector infrarrojo bidimensional de píxeles fotosensibles (111) dispuesto en una matriz (110), en donde dicho conjunto detector tiene un valor de factor de relleno, exponiéndose dicho conjunto detector sucesivamente a una escena de imagen (150) para adquirir varias muestras de formación de imágenes de dicha escena; caracterizado por que:
- dicho detector infrarrojo de formación de imágenes se enfría criogénicamente y se sella al vacío;
- dicho conjunto detector puede funcionar en un rango de longitud de onda de 1 a 15 μm ;
- dicho aparato comprende además:
- un filtro de enmascaramiento (130) que tiene un patrón único y está dispuesto entre dicho conjunto detector y dicha escena de imagen, y se mantiene a una posición fija respecto a dicho conjunto detector, en donde dicho filtro de enmascaramiento se configura para enmascarar (112) parte de una región activa de dichos píxeles dentro de dicho rango de longitud de onda, reduciendo así dicho valor del factor de relleno en una cantidad de reducción del factor de relleno para cada una de dichas muestras de formación de imágenes, de forma que solo se representa una subregión (154) de una región de píxel de dicha escena de imagen en un píxel enmascarado correspondientemente de dicho conjunto detector;
- una óptica (140) dispuesta entre dicho filtro de enmascaramiento y dicha escena de imagen, de forma que dicha óptica se configura para dirigir dicha escena de imagen a dicho conjunto detector mediante dicho filtro de enmascaramiento;
- un medio de desplazamiento para desplazar sucesivamente la trayectoria óptica de dicha escena de imagen en relación con dicho conjunto detector entre cada una de dichas muestras de formación de imágenes, en un incremento de desplazamiento correspondiente a dicha cantidad de reducción del factor de relleno y menor que una región activa no enmascarada (114) de un píxel fotosensible enmascarado, en donde cada píxel fotosensible enmascarado de dicho conjunto detector recibe subregiones parcialmente superpuestas en dichas muestras de formación de imágenes; y
- un procesador configurado para reconstruir un cuadro de imagen a partir de dichas muestras de formación de imágenes adquiridas, en donde dicho cuadro de imagen reconstruido tiene una resolución mayor que una resolución intrínseca de dicho conjunto detector en un factor definido por dicha cantidad de reducción del factor de relleno.
2. El aparato de la reivindicación 1, en donde dicho filtro de enmascaramiento comprende un recubrimiento dispuesto en el conjunto detector.
3. El aparato de la reivindicación 1, en donde dicho filtro de enmascaramiento comprende configurar dicho conjunto detector de forma que una región fotosensible de dichos píxeles de dicho conjunto sea menor que una región fotosensible potencialmente máxima de dichos píxeles.
4. El aparato de la reivindicación 1, en donde dicho medio de desplazamiento se configura para desplazar una trayectoria óptica de dicha escena de imagen en relación con dicho filtro de enmascaramiento y dicho conjunto detector reposicionando dicha óptica respecto a dicho filtro de enmascaramiento y a dicho conjunto detector.
5. El aparato de la reivindicación 1, en donde dicho medio de desplazamiento se configura para desplazar una trayectoria óptica de dicha escena de imagen en relación con dicho filtro de enmascaramiento y dicho conjunto detector reposicionando juntos dicho filtro de enmascaramiento y dicho conjunto detector respecto a dicha óptica.
6. El aparato de la reivindicación 1, en donde se selecciona un número f de dicha óptica según dicha cantidad de reducción del factor de relleno para proporcionar una sensibilidad seleccionada de dicho detector.
7. El aparato de la reivindicación 6, en donde dicha sensibilidad seleccionada de dicho detector corresponde a un nivel adecuado de sensibilidad total.
8. El aparato de la reivindicación 1, en donde dicho detector es un detector térmico de formación de imágenes.
9. Método para aumentar la resolución de un detector infrarrojo de formación de imágenes que comprende un conjunto detector infrarrojo bidimensional de píxeles fotosensibles dispuesto en una matriz, en donde dicho conjunto detector tiene un valor de factor de relleno, en donde el método comprende los procesos de: exponer sucesivamente dicho conjunto detector a una escena de imagen para adquirir varias muestras de formación de imágenes infrarrojas de la escena; caracterizado por que:
- dicho detector infrarrojo de formación de imágenes se enfría criogénicamente y se sella al vacío;
- dicho conjunto detector puede funcionar dentro de un rango de longitud de onda de 1 a 15 μm ;
- se enmascara parte de una región activa de dichos píxeles dentro de dicho rango de longitud de onda, reduciendo así dicho valor de factor de relleno en una cantidad de reducción del factor de relleno para cada una de dichas muestras de formación de imágenes, mediante un filtro de enmascaramiento que tiene un patrón único, mantenido en una posición fija respecto a dicho conjunto detector, de forma que solo se representa una subregión de una región de píxel de dicha escena de imagen en un píxel enmascarado correspondiente de dicho conjunto detector;

- 5 se desplaza sucesivamente la trayectoria óptica de dicha escena de imagen en relación con dicho conjunto detector entre cada una de dichas muestras de formación de imágenes, en un incremento de desplazamiento correspondiente a dicha cantidad de reducción del factor de relleno y menor que una región activa no enmascarada de un píxel fotosensible enmascarado, en donde cada píxel fotosensible enmascarado de dicho conjunto detector recibe subregiones parcialmente superpuestas en dichas muestras de formación de imágenes; y
- 10 se reconstruye un cuadro de imagen partiendo de dichas muestras de formación de imágenes adquiridas, en donde dicho cuadro de imagen reconstruido tiene una resolución mayor que una resolución intrínseca de dicho conjunto detector en un factor definido por dicha cantidad de reducción del factor de relleno.
10. El método de la reivindicación 9, que comprende además el proceso de seleccionar un número f de una óptica de detector según dicha cantidad de reducción del factor de relleno para proporcionar una sensibilidad seleccionada de dicho detector.
11. El método de la reivindicación 10, en donde dicha sensibilidad seleccionada de dicho detector corresponde a un nivel adecuado de sensibilidad total.

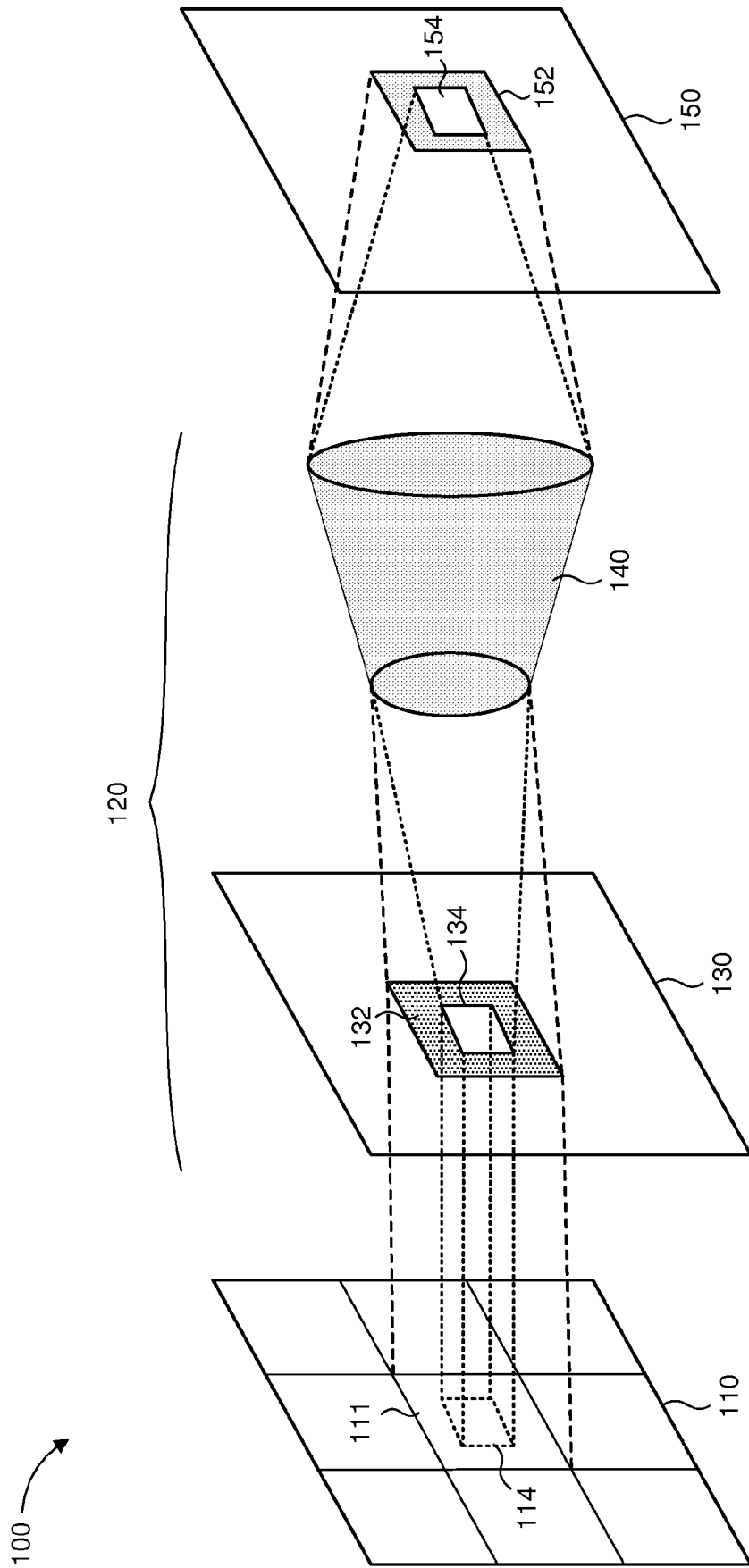


FIG. 1

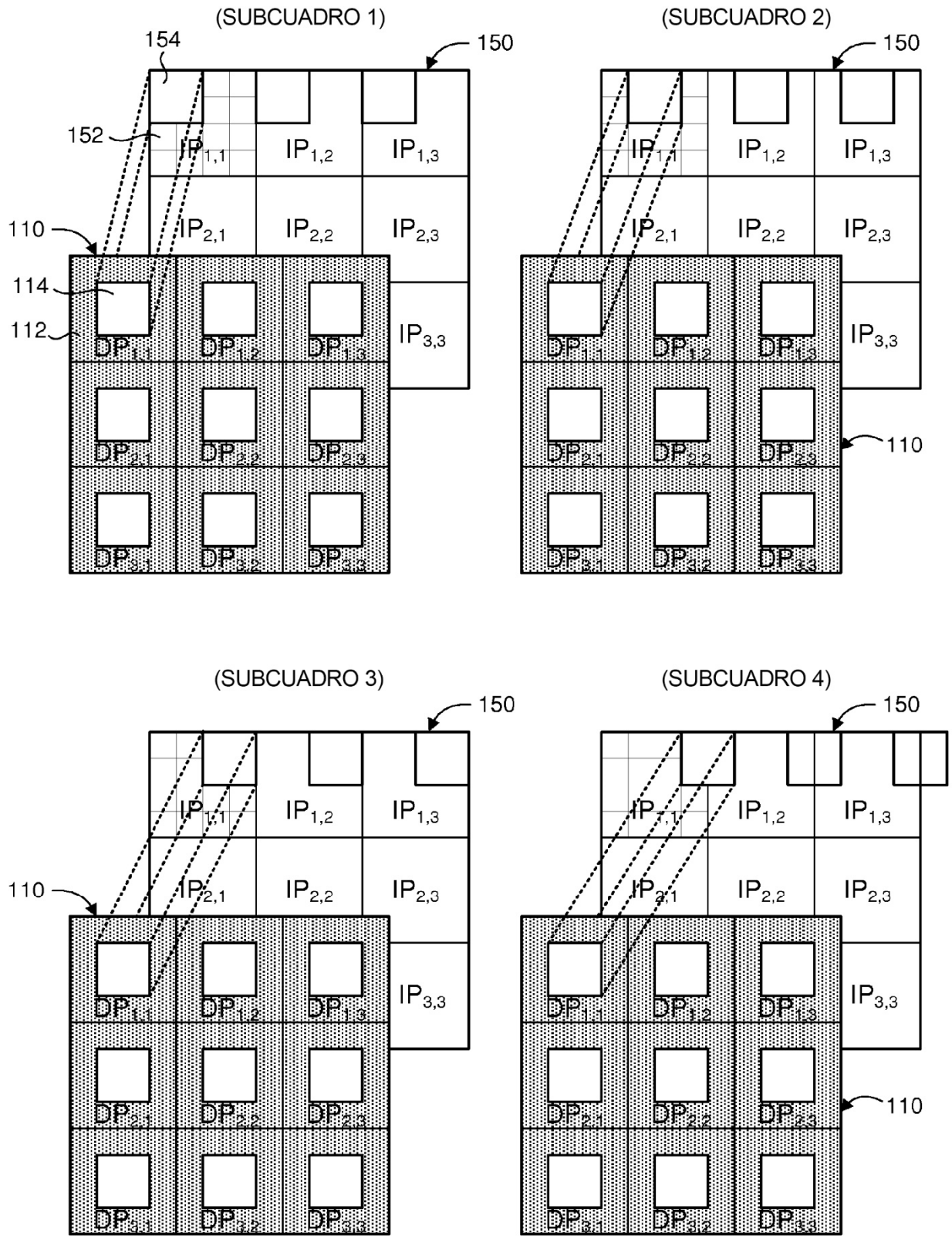


FIG. 2A

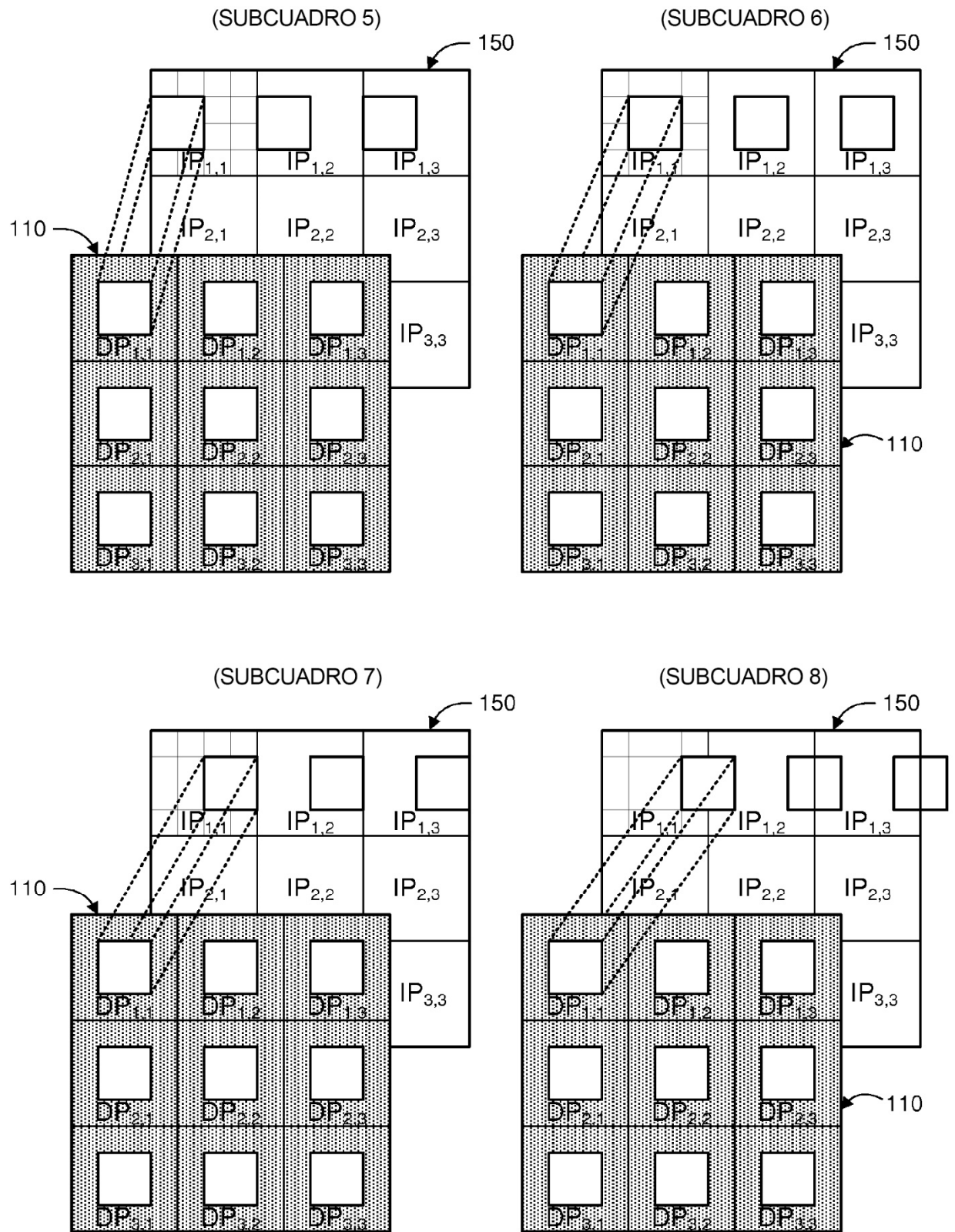


FIG. 2B

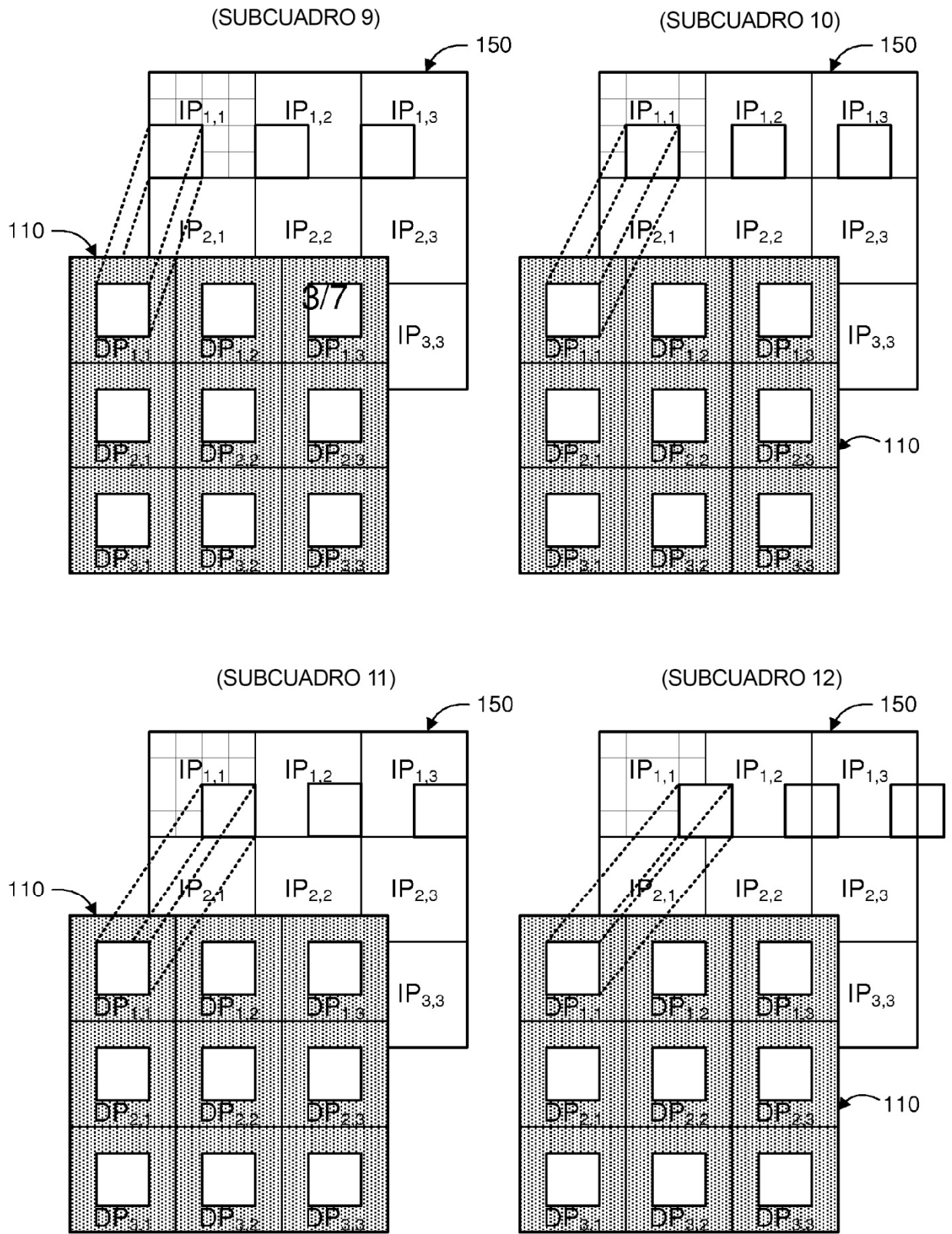


FIG. 2C

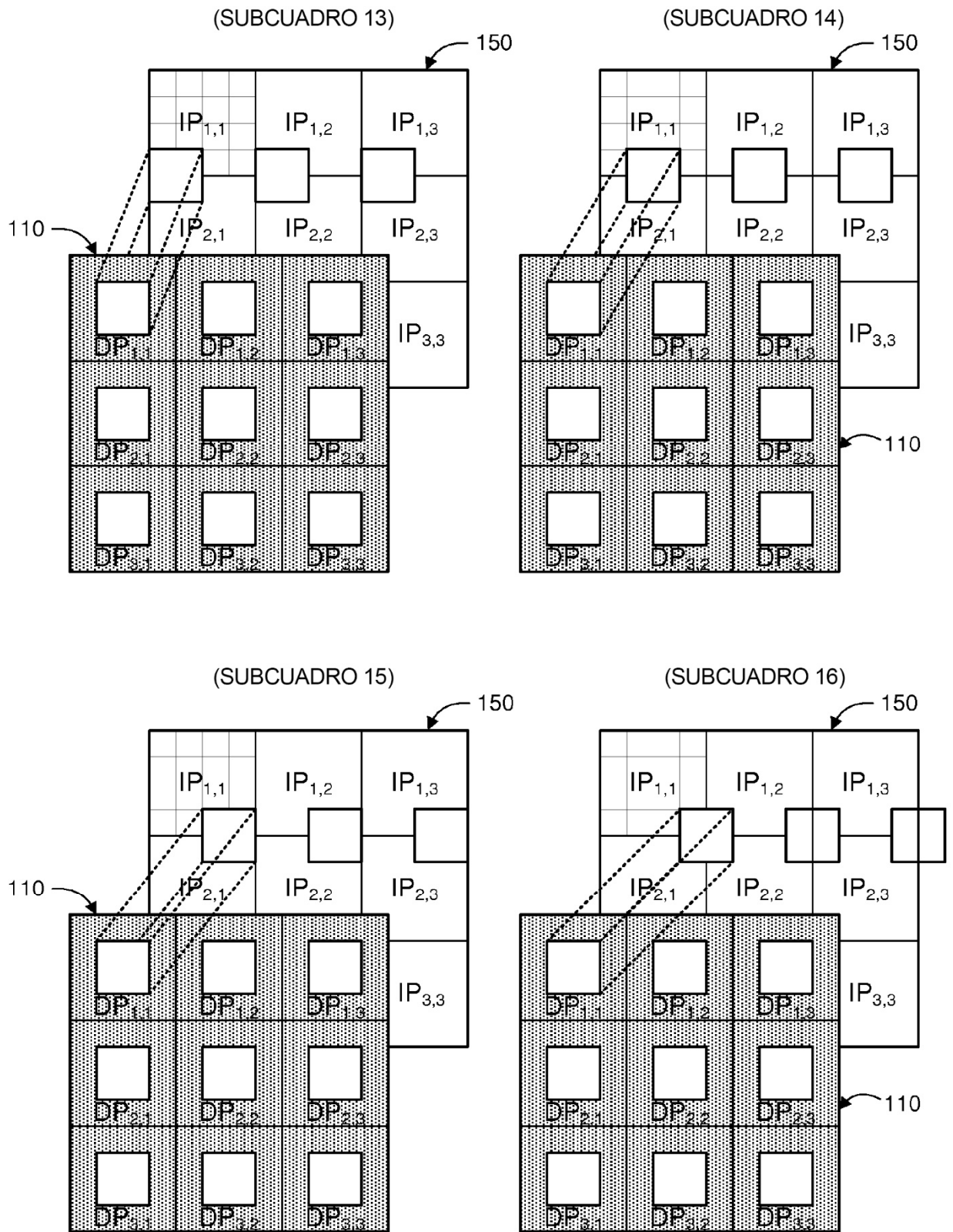


FIG. 2D

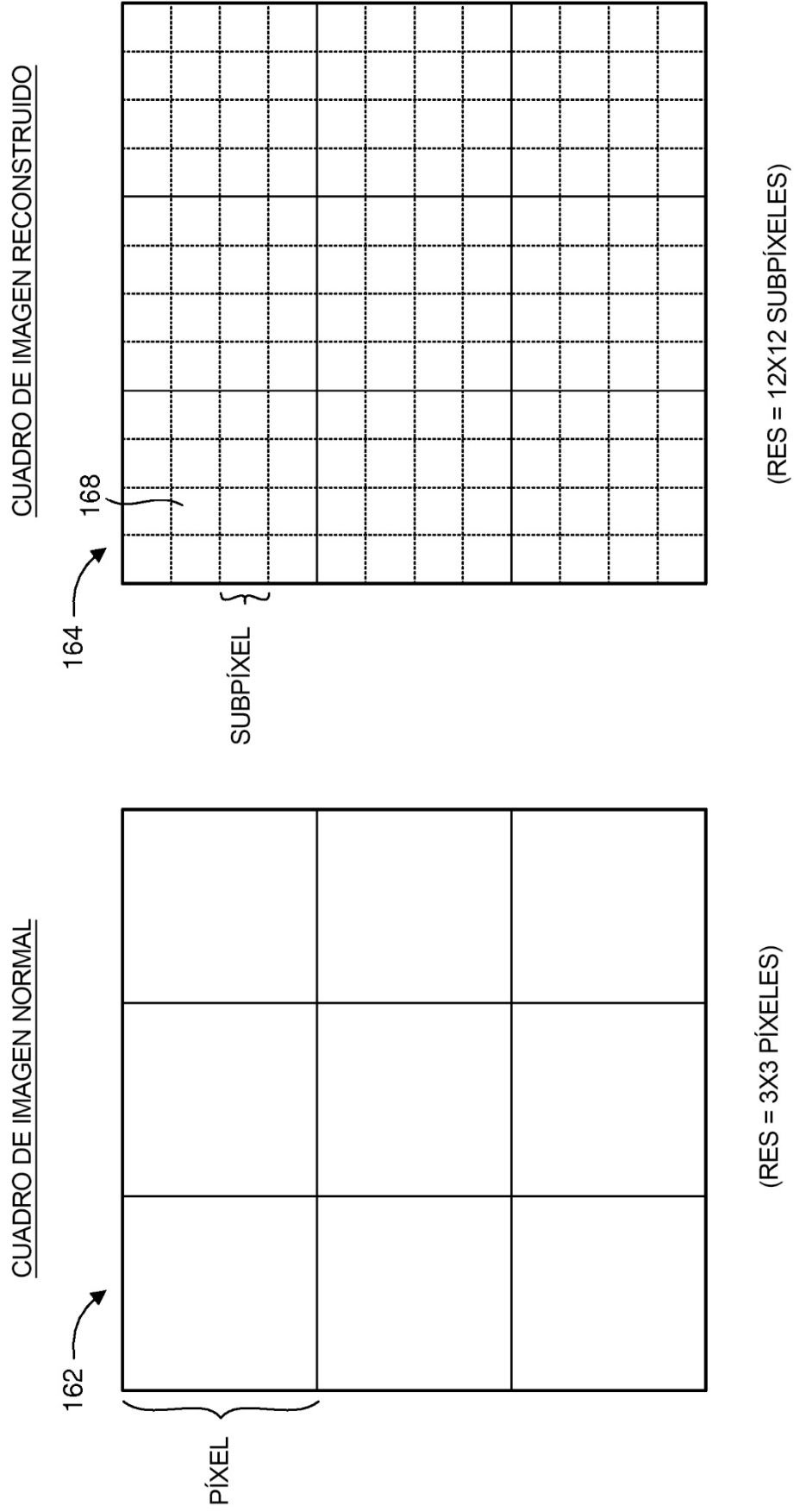


FIG. 3

170 → Frecuencias de MTF y de Nyquist para la anchura de píxel = separación de píxel / 1, 2, 4

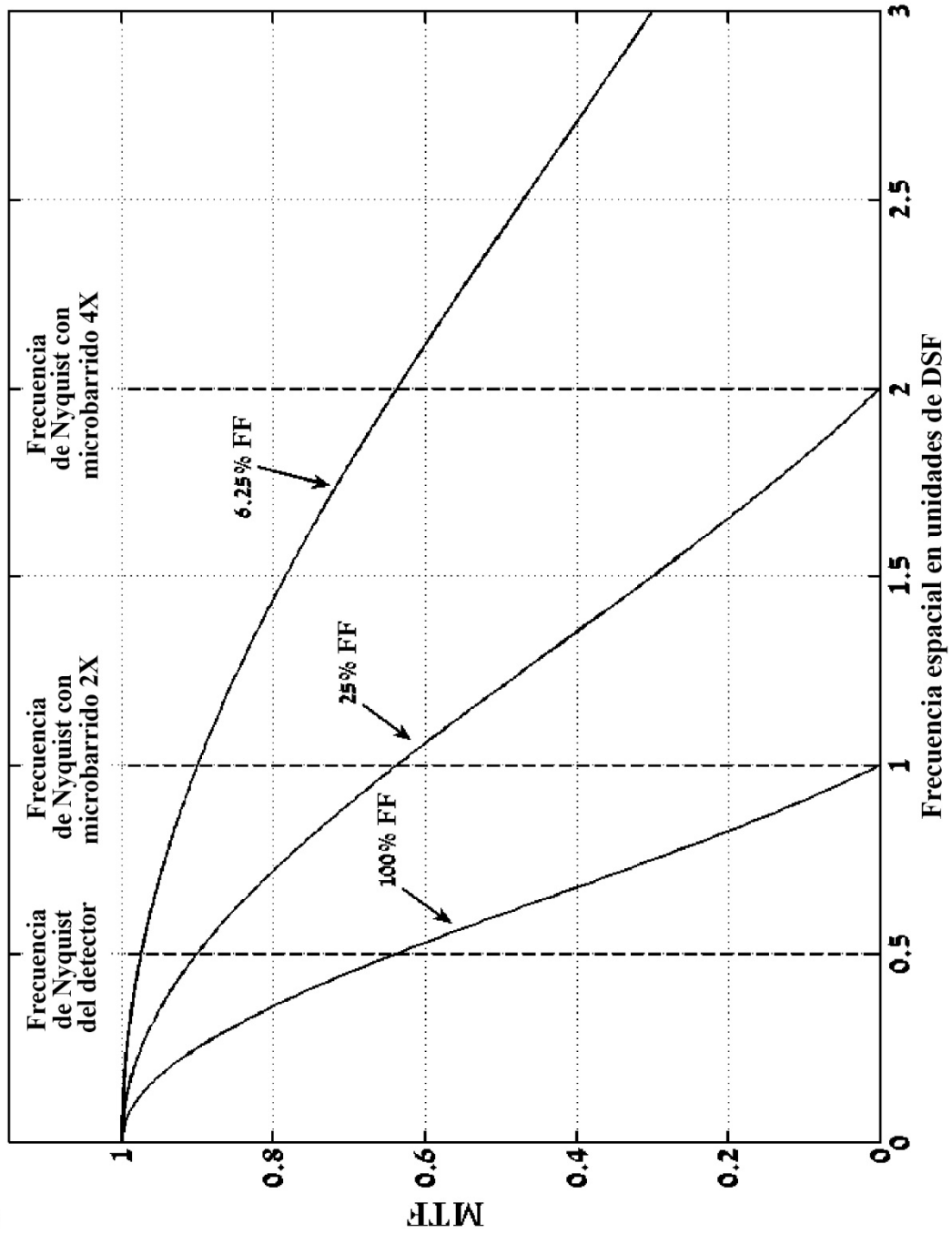


FIG. 4