



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① Número de publicación: **2 363 286**

② Número de solicitud: 200930905

⑤ Int. Cl.:  
**G01T 1/208** (2006.01)

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

② Fecha de presentación: **26.10.2009**

④ Fecha de publicación de la solicitud: **28.07.2011**

④ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:  
**28.07.2011**

⑦ Solicitante/s: **ONCOVISIÓN, GENERAL  
EQUIPMENT FOR MEDICAL IMAGING, S.A.**  
c/ Colón, 72 - 9º 18ª  
46004 Valencia, ES

⑦ Inventor/es: **Werner Lerche, Christoph;  
Herrero Bosch, Vicente;  
Sebastiá Cortés, Ángel  
Benlloch Baviera, José María y  
Sánchez Martínez, Filomeno**

⑦ Agente: **Pons Ariño, Ángel**

⑤ Título: **Procedimiento y circuito electrónico de lectura de las señales generadas por uno o más sensores pixelados.**

⑤ Resumen:

Procedimiento y circuito electrónico de lectura de las señales generadas por uno o más sensores pixelados. El objeto de la invención es un procedimiento y un circuito electrónico para la lectura de las señales generadas por uno o más sensores pixelados en un sistema de detección de radiación gamma, que permite reducir sustancialmente el número de canales electrónicos a digitalizar. El circuito electrónico de la invención es analógico y además se puede acoplar a otros circuitos iguales para adquirir las señales de sensores de mayor tamaño.

ES 2 363 286 A1

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y circuito electrónico de lectura de las señales generadas por uno o más sensores pixelados.

5 **Objeto de la invención**

El objeto de la invención es un procedimiento y un circuito electrónico de lectura de las señales generadas por uno o más sensores pixelados que permite reducir sustancialmente el número de canales electrónicos a digitalizar. La invención es aplicable a dispositivos empleados en la detección de luz o radiación gamma en imagen médica, así como en visión artificial y otras aplicaciones similares.

**Antecedentes de la invención**15 *Detectores para radiación gamma*

La detección de rayos gamma es indispensable en muchas aplicaciones de medicina nuclear, astrofísica y física experimental de altas energías. Debido a la naturaleza cuántica de los rayos gamma, su detección se realiza a través de su interacción con la materia del detector, y por lo tanto, se entiende como detección del rayo gamma la medida simultánea de varios parámetros clave (observables) de esta interacción, como por ejemplo la energía depositada y la posición de la interacción. La interacción del rayo gamma con la materia del detector consiste casi exclusivamente en la ionización múltiple de la materia por efectos elementales como el efecto fotoeléctrico o la dispersión Compton. Debido a que la naturaleza de estos procesos es estadística, tan sólo es posible predecir la probabilidad de que la interacción del rayo gamma con la materia del detector ocurra. Esta probabilidad de interacción depende tanto de la energía del rayo gamma como del coeficiente de atenuación másico de la materia con que interactúa. El coeficiente de atenuación másico depende a su vez del número atómico efectivo  $Z_{\text{eff}}$  de los componentes, de la densidad y del grosor del material que tiene que atravesar el rayo gamma. La probabilidad de interacción crece con  $Z_{\text{eff}}$  y decrece con la energía del rayo gamma. En caso de que el rayo gamma interactúe con la materia, se crea una carga por ionización múltiple (en el caso de detectores semiconductores) o se produce una emisión de luz (en el caso de cristales centelleantes) que ha de ser recolectada y analizada para obtener información sobre la interacción del rayo gamma. Por lo tanto, los detectores para rayos gamma se han de construir de tal manera que detengan el rayo gamma y a su vez detecten las cargas eléctricas liberadas por la ionización o la luz emitida. Las diferentes necesidades para una óptima recolección de la carga o de la luz y una elevada probabilidad de detección son incompatibles en muchos casos. Sobre todo en la detección de rayos gamma de energías medias y altas, donde se necesitan materiales con coeficientes de atenuación másico y con valores de  $Z_{\text{eff}}$  elevados y de un grosor considerable. Por esta razón, detectores gaseosos y de líquidos son los menos adecuados para la detección de rayos gamma, debido a su densidad y su  $Z_{\text{eff}}$  bajos.

Los detectores de semiconductores son adecuados únicamente para bajas energías, pudiéndose utilizar en la detección de rayos X y de forma limitada en gamma grafía. En Tomografía por Emisión de Positrones (PET), se han de detectar los fotones de aniquilación de 511 keV. Aunque hay semiconductores compuestos como el CdZnTe con una densidad de 5.8 g/cm<sup>3</sup> y un  $Z_{\text{eff}}$  de 49, por el momento no es posible obtener detectores suficientemente efectivos para su aplicación en la detección de rayos gamma de alta energía como PET, la Astrofísica o la Física experimental de altas energías. Esto se debe a que su grosor tiene que ser muy reducido para permitir una eficiente colección de la carga liberada.

Los detectores de centelleo evitan este conflicto de diseño, ya que convierten la carga de las ionizaciones por el rayo gamma en luz de centelleo. En lugar de carga, en este caso se recolectan los fotones de luz, lo que requiere el uso de fotodetectores como fotomultiplicadores de vacío, fotomultiplicadores de Silicio o fotodiodos. La cantidad total de la luz de centelleo es aproximadamente proporcional a la cantidad total de la energía liberada. Debido a que se pueden fabricar centelladores altamente transparentes a su propia luz de centelleo, es posible hacer el cristal de centelleo suficientemente grande y con un  $Z_{\text{eff}}$  elevado para garantizar una alta eficiencia de detección sin que esto perjudique la recolección de la luz de centelleo. No obstante, la energía liberada, y por lo tanto la cantidad de luz de centelleo, suele ser muy pequeña y normalmente se precisan medios de amplificación además de medios de detección de fotones de luz. En el caso de centelladores, se convierte la energía liberada por el rayo gamma en luz de centelleo y posteriormente se convierte en pulsos eléctricos mediante conversores opto-electrónicos como por ejemplo fotodiodos, foto-diodos de avalancha, foto-multiplicadores de vacío, foto-multiplicadores de silicio o similares. Los fotodiodos de avalancha, foto-multiplicadores de vacío, foto-multiplicadores de silicio amplifican intrínsecamente la carga creada a partir de los fotones de luz de centelleo detectados.

La generación de la luz de centelleo es isótropa en la gran mayoría de los cristales centelladores y obedece a una ley cuadrática inversa. Esto dificulta la determinación de los parámetros de interés como la energía y la posición de la fotoconversión del rayo gamma dentro del cristal de centelleo. Mientras que para la estimación de la energía basta detectar la cantidad total de luz de centelleo, la medida de la posición de la fotoconversión requiere fotodetectores sensibles a la posición. Éstos permiten mediante el algoritmo del centro de gravedad (COG), introducido por J. T. Wallmark [Wallmark1957], la estimación de dos de las tres coordenadas de la posición de la fotoconversión. Este algoritmo también es conocido como lógica de Anger. Debido a su eficiencia, este algoritmo sigue siendo el más utilizado para gammagrafía y PET hoy en día. Sin embargo, la utilización del COG en cristales monolíticos de elevado grosor introduce artefactos cerca de los bordes del cristal y no permite medir la profundidad de interacción (DOI), es

decir, la tercera coordenada de la posición de fotoconversión. La falta de una estimación de la DOI conduce al error de paralaje, también conocido como *radial elongation*, empeorando significativamente la resolución espacial en las regiones periféricas del campo de visión de la cámara de detección o del escáner PET.

5 Para remediar este problema, se desarrollaron varias técnicas para medir la DOI, como por ejemplo el método *phoswich*, el *light-sharing* y otros ([Moses1994, Bart1991]). La desventaja de estos métodos es que requieren foto-  
 detectores o centelladores adicionales, lo que incrementa considerablemente el precio del detector. El problema de  
 los artefactos se evita usando matrices de píxeles pequeños de centelladores ópticamente desacoplados entre sí. La  
 medición de dos coordenadas de la posición de fotoconversión se reduce así a identificar el píxel donde se ha produ-  
 10 cido la generación de luz de centelleo. Para esta implementación, la resolución intrínseca del detector viene dada por  
 el tamaño del píxel y, en consecuencia, una mejora de esta resolución requiere una reducción del tamaño del píxel.  
 Aunque esto conlleva problemas serios como el deterioro de la eficiencia del detector, una baja resolución energéti-  
 ca, difracción de Compton entre cristales e incremento del coste del detector, la tendencia actual se dirige hacia el  
 desarrollo de detectores con píxeles cada vez más pequeños. Este desarrollo conlleva un crecimiento exponencial del  
 15 número de píxeles en los fotodetectores sensibles a posición. En el caso de fotomultiplicadores sensibles a posición se  
 observa una duplicación del número de píxeles cada 7 años.

Un elevado número de píxeles beneficia a la resolución espacial del sistema, y por lo tanto a la calidad de la imagen  
 adquirida, pero deteriora la resolución en energía al disminuir el tamaño del píxel y conlleva problemas severos en la  
 20 realización del sistema de adquisición de datos. En el caso de digitalizar la señal de cada uno de los píxeles, el mismo  
 sistema de adquisición limita su número debido a que la complejidad crece rápidamente con el número de canales. Por  
 este motivo, es necesario realizar un procesamiento previo de las señales con el objeto de reducir el número de canales  
 electrónicos.

25 Todo detector de rayos gamma dispone de un sistema de adquisición de datos para hacer accesible la información  
 contenida en la distribución de la energía detectada a medios informáticos para su procesamiento y análisis. Este sis-  
 tema dependerá en su diseño y en sus prestaciones fuertemente del diseño del detector de rayos gamma. Debido a que  
 los detectores gaseosos y de semiconductores son poco aptos para su aplicación en PET, se discutirán a continuación  
 solamente las técnicas usadas con detectores de centelleo. Para detectores de centelladores segmentados, la adquisición  
 30 de datos está orientada a identificar el píxel en el que ha ocurrido la fotoconversión.

La segmentación del centellador en píxeles pequeños y alargados canaliza la luz hacia el fotodetector donde se  
 registra la cantidad de energía liberada por el rayo gamma en este píxel. Para la optimización de la recolección de la luz  
 de centelleo, se cubren todas las superficies con reflectantes. Debido al tamaño del píxel, a las superficies reflectantes  
 35 y al hecho de que solo se mide la cantidad total de la luz, no se obtiene ninguna información sobre la posición de la  
 fotoconversión del rayo gamma dentro del píxel. El detector de rayos gamma está en este caso constituido por una  
 multitud de píxeles que se acoplan ópticamente a una matriz de fotodetectores o a uno o varios fotodetectores sensibles  
 a la posición. El acople puede ser directo o a través de una guía de luz. La lectura de la matriz de fotodetectores o  
 de los fotodetectores sensibles a posición se puede realizar de diferentes maneras. Una solución obvia consiste en  
 40 acoplar exactamente cada segmento de centellador a un único píxel del fotodetector y digitalizar la señal de cada  
 píxel (por ejemplo [Pichler1997, Binkley2000]). Esta implementación permite fácilmente determinar la posición de  
 la fotoconversión del rayo gamma por la identificación del píxel y también permite una discriminación por energía.  
 Las desventajas de esta implementación es la necesidad de un alto número de canales electrónicos (uno por píxel),  
 la falta de la información de la DOI y una resolución espacial limitada por el tamaño del píxel. El problema de la  
 45 falta de información sobre la DOI se puede remediar con fotodetectores o cristales centelladores adicionales mediante  
 los métodos de *lightsharing* (por ejemplo [Moses1994]) y *phoswich* (por ejemplo [Seidel1999]) con el inconveniente  
 de encarecer los detectores por la necesidad de canales electrónicos adicionales (para el método de *lightsharing*) o  
 el muestreo de la forma de onda de la señal proveniente del fotodetector. Existen varias propuestas para Circuitos  
 Integrados para Aplicaciones Específicas (ASIC) para implementar estos métodos de lectura de los fotodetectores (por  
 50 ejemplo [Olli2007, Weng2002, Yeom2007]).

Para la reducción del número de canales electrónicos existen varios métodos. Uno consiste en establecer un umbral  
 para cada uno de los píxeles y contar los eventos que superan dicho umbral [Camp1998]. Esto impide la discriminación  
 por energía y por lo tanto limita la utilidad del método. En el caso de utilizar fotomultiplicadores con lectura del último  
 55 dínodo es posible usar este método sin impedir la discriminación por energía [Streun2002]. Otro método de reducción  
 de canales electrónicos aprovecha el hecho de que en una matriz de segmentos de centelladores es improbable que  
 haya dos fotoconversiones de dos rayos gamma independientes en el mismo instante, siempre que la actividad de la  
 fuente que se intenta detectar sea suficientemente baja, y la resolución de los conversores de análogo a digital (ADC)  
 sea muy superior a la requerida por la resolución espacial y la energética intrínseca del detector (US Pat. No. 7,342,232  
 60 B2). Esto permite dividir el rango máximo de entrada del ADC en varios intervalos, donde los valores de cada uno  
 de estos intervalos quedan reservados para un solo segmento de cristal. Mediante una transformación se adapta la  
 señal del correspondiente píxel del fotodetector al rango reservado para el segmento. Si se registra solo una única  
 fotoconversión en la ventana de la digitalización, el segmento del cristal donde esta ocurrió puede ser identificado de  
 forma inequívoca.

65 Otra posibilidad para la reducción del número de canales electrónicos es el algoritmo de centro de gravedad. Este  
 algoritmo sigue siendo uno de los más usados debido a su bajo coste, su fácil implementación mediante redes de  
 divisores de cargas y porque se puede combinar con los métodos *lightsharing* y *phoswich* para la detección de la

profundidad de interacción. No obstante, el COG presenta algunas desventajas, sobre todo si se utiliza en cristales monolíticos, aunque el uso de éstos permite la construcción de detectores más eficientes y más fáciles de montar. La desventaja más importante es la aparición de errores sistemáticos en la detección de la posición de fotoconversión cerca de los bordes. Otra importante desventaja es la falta de escalabilidad si se implementa mediante redes de divisores de carga y por último no permite usar el método de *lightsharing* para la detección de la profundidad de interacción. Se ha demostrado recientemente que las redes de división de carga pueden ser modificadas para estimar también la profundidad de interacción [Lerche2006, Benlloch2006] en cristales centelleadores monolíticos mediante la medición del momento de segundo orden de la distribución de la carga recolectada en el plano de foto-detección (Pub. No.: WO/2004/090572, Lerche *et al.*). También se ha demostrado, que con esta medida del momento de segundo orden se pueden corregir parcialmente los artefactos generados por el algoritmo del centro de gravedad en cristales monolíticos [Lerche2006]. Una integración de esta red de división de cargas con medida de profundidad de interacción en forma de ASIC [Herrero2007] mejora su rendimiento pero restringe su utilidad. Para la implementación de la red resistiva en el ASIC debe conocerse el número y la configuración de los segmentos del fotodetector. Aunque este ASIC específico se podría usar también para fotodetectores con un número menor de segmentos y similar configuración, el rendimiento del ASIC en esta aplicación no será óptimo. No es posible combinar varias redes resistivas con capacidad de medir el segundo momento de la distribución de luz detectada para su utilización en un fotodetector con un número mayor de segmentos. Por lo tanto, para cada configuración de los segmentos del fotodetector se ha de diseñar un ASIC dedicado. Otras limitaciones de esta solución se presentan por a) la elevada complejidad en el caso de fotodetectores con un número muy grande de segmentos, como el XP85022 de Burle Industries, que tiene 1024 segmentos, b) el hecho de la difícil implementación de la medida de momentos del orden superior a dos y c) el hecho de que los pesos para la computación de los momentos son *hard-coded*, es decir, una vez implementada la red resistiva, no se pueden cambiar estos pesos. Una posible solución para el cómputo de momentos de orden superior a dos se expone en US Pat. No. 4.550.432 (Andersson), aunque en este dispositivo se calculan los momentos de forma digital, lo que implica un elevado número de conversores ADC y de evaluaciones para cada distribución de carga que reduce fuertemente su utilidad para detectores de partículas, debido al escaso tiempo de que se dispone entre dos sucesos para realizar tanto la digitalización como los cálculos subsiguientes.

Por otro lado, casi todos los sistemas de detección de rayos gamma basados en cristales centelleantes son modulares. Cada módulo a su vez está constituido por un cristal monolítico (sin segmentar o parcialmente segmentado) o una matriz de cristales (píxeles) acoplados ópticamente a un foto-detector o una matriz de foto-detectores. Cada módulo detector funciona por tanto de modo independiente. Sin embargo, se plantea el caso de querer enlazar unos módulos con otros para implementar módulos de distintos tamaños más grandes a partir de un módulo elemental. En dicho caso, se precisa que el circuito electrónico de lectura sea escalable, es decir, que se pueda conectar con los circuitos de los módulos elementales vecinos de forma que el resultado funcione como un único módulo.

Finalmente, en la reducción del número de canales electrónicos es importante no deteriorar la calidad de la información resultante. Por ello, resultaría muy conveniente la introducción de la determinación analógica del tercer momento de la distribución de carga (skewness), cuarto momento (kurtosis), o momentos de orden superior. Dichos momentos mejorarían la información sobre la posición de interacción original sin aumentar sustancialmente el número de señales a digitalizar. Por ejemplo, el tercer momento de la distribución de luz puede ser relevante para mejorar la resolución espacial en la región cercana al borde del cristal. Teóricamente, a partir de la determinación precisa de todos los momentos cartesianos de la distribución de carga es posible reconstruir el punto de impacto en 3D del rayo gamma en un cristal monolítico.

Debido al rápido crecimiento del número de segmentos en los fotodetectores y en los detectores de semiconductores segmentados se han ideado varios métodos para la lectura rápida y eficiente de los canales electrónicos incluyendo esquemas para la reducción del número necesario de conversores analógico-digitales. En la medicina nuclear los dispositivos anteriores se basan o en el algoritmo de centro de gravedad introducido por Hal Anger, US. Pat. No. 3.011.057, en versiones mejoradas de este método, por ejemplo Pub. No.: WO/2004/090572, Lerche *et al.*, o en la agrupación de los segmentos a lo largo de las coordenadas espaciales, de tal forma que esta etapa de la electrónica realiza las proyecciones de la distribución de señal a lo largo de los ejes de coordenadas espaciales. Ejemplos de dispositivos que utilizan este método se describen en US. Pat. No. 4.675.526, Rogers *et al.*, US. Pat. No. 4.622.467 Britten *et al.* Estos métodos presentan siempre por lo menos una de las siguientes desventajas:

1. Los parámetros de la expansión en funciones base no son reprogramables (*No son reprogramables por el cambio posterior de parámetros de la expansión en funciones de base*), porque se realizan con componentes como resistencias o condensadores con valores fijos. Esto reduce significativamente su utilidad ya que implica el ajuste irreversible de los valores de estos componentes a los requisitos de un solo tipo de fotodetectores.

2. La topología de la electrónica no es escalable. Es decir, no permite conectar varios módulos de esta electrónica con el fin de abarcar un número mayor de segmentos o varios módulos de detección entre sí.

3. La implementación no permite un cambio de las funciones de base de la expansión de la distribución de señal. La implementación del método de centro de gravedad únicamente sirve para la computación de los primeros momentos cartesianos pero no permite el cómputo de los coeficientes de Fourier u otros.

4. La implementación de divisores de carga en ASICs no permite escalabilidad de forma sencilla debido a la topología y la elevada tolerancia en valor absoluto de las resistencias o capacidades utilizadas.

5. La implementación de divisores de carga resistiva o capacitivas sin desacoplo hace imposible la ecualización pasiva por medio de *shunts* de las señales de los segmentos en caso de que éstos sean muy desiguales como, por ejemplo, en fotomultiplicadores sensibles a posición.

## 5 *Visión Artificial*

Los sistemas de visión artificial se usan para la inspección automática de productos fabricados o durante el ciclo de producción, por ejemplo en la producción de microchips, automóviles, medicamentos e incluso alimentos. Estos sistemas permiten la detección de objetos, de su orientación, la medición de su tamaño, el reconocimiento de defectos y la realización de otras tareas. Para ello existen varios algoritmos que trabajan sobre la imagen digitalizada. Un método ampliamente usado es la expansión en conjuntos de funciones que incluye la computación de los momentos de la imagen [Nadler1993], [Hornberg2006]. De especial interés son los momentos centrales de segundo orden (descripción más adelante), ya que permiten detectar la extensión y la orientación de la imagen de un objeto. Pero también los momentos de orden superior contienen información adicional sobre la imagen. Para mejorar el rendimiento y reducir los costes de los sistemas de visión, estos se integran últimamente por completo en un solo microchip. Estos dispositivos son ASICs (Application Specific Integrated Circuit) que contienen un sensor de imagen CMOS, por ejemplo [Sohn2002], los medios de digitalización para las cargas capturados en los píxeles y también uno o varios núcleos de microprocesadores. De este modo permiten el tratamiento de imágenes y la extracción de propiedades de éstas en el mismo chip electrónico que adquiere la imagen, lo que incluye una clara ventaja con respecto al tiempo de procesamiento de imagen y también al coste del sistema.

### Breve descripción de las figuras

Figura 1 muestra la topología típica de un sensor pixelado genérico.

Figura 2 muestra una etapa de entrada de un circuito electrónico de lectura según la invención que realiza proyecciones a lo largo de las coordenadas espaciales antes de la expansión en funciones base.

Figura 3 muestra un módulo de un circuito electrónico de lectura según la invención que realiza la multiplicación de una señal de entrada con pesos programables para una dimensión espacial.

Figura 4 muestra una primera realización de circuito electrónico de lectura según la invención para la expansión en funciones base con previas proyecciones a lo largo de las coordenadas espaciales que emplea los módulos de las figuras 2 y 3.

Figura 5 muestra una segunda realización de circuito electrónico de lectura según la invención para la expansión en funciones base sin previas proyecciones a lo largo de las coordenadas espaciales.

Figura 6 muestra un módulo de un circuito electrónico de lectura según la invención que genera los pesos unidimensionales para la computación de los momentos cartesianos.

Figura 7 muestra un módulo de un circuito electrónico de lectura según la invención que realiza la multiplicación de una señal de entrada con los pesos unidimensionales.

Figura 8 muestra un módulo de un circuito electrónico de lectura según la invención que realiza la multiplicación de una señal de entrada con combinaciones lineales de los pesos unidimensionales.

Figura 9 muestra una tercera realización de circuito electrónico de lectura según la invención que realiza la computación de los momentos cartesianos separados por coordenadas espaciales empleando los módulos de las figuras 6 y 7.

Figura 10 muestra una cuarta realización de circuito electrónico de lectura según la invención que realiza la computación de los momentos cartesianos empleando los módulos de las figuras 6 y 8.

Figura 11 muestra como se combinan varios circuitos electrónicos de lectura según las realizaciones anteriores cuando el número  $M \times N$  de segmentos del sensor pixelado es mayor que el número de segmentos que puede procesar un único circuito electrónico de lectura.

Figura 12 muestra un ejemplo de aplicación de la invención a un detector de rayos gamma con un único cristal de centelleo y un único fotodetector sensible a posición.

Figura 13 muestra un ejemplo de aplicación de la invención a un detector de rayos gamma con un único cristal de centelleo y un único fotodetector sensible a posición cuando el número de segmentos del fotodetector es mayor que el número de segmentos que un único circuito electrónico de lectura puede procesar.

Figura 14 muestra una aplicación de la invención a un detector de rayos gamma con varios cristales de centelleo y varios fotodetectores sensibles a posición.

**Descripción de la invención**

En esta patente se describe un procedimiento y un circuito electrónico de lectura de las señales generadas por uno o más sensores pixelados que consigue una reducción sustancial del número de canales electrónicos a digitalizar. El procedimiento es llevado a cabo por un circuito electrónico de lectura basado en componentes analógicos que permite codificar la información original recogida por el o los sensores pixelados a través de los coeficientes de una base de funciones. El circuito electrónico de lectura de la invención es reprogramable, lo cual permite su utilización con distintas bases de funciones, y además es escalable, de modo que se puede combinar con otros circuitos electrónicos de lectura idénticos adyacentes.

El procedimiento y circuito electrónico de lectura de la invención es útil en diferentes campos de aplicación. Por ejemplo, dentro del campo de la imagen médica es aplicable a detectores de rayos gamma formados por uno o varios cristales centelleantes monolíticos y uno o varios foto-detectores sensibles a la posición o una matriz de foto-detectores que forman el plano de detección. Otro campo de aplicación es el de la visión artificial y reconocimiento de patrones, especialmente para el seguimiento de un objeto en una secuencia (rápida) de imágenes, donde se requiere la computación muy rápida y repetida de los momentos espaciales de bajo orden (US Pat. No. 4.550.432 Andersson). La arquitectura de la presente invención reúne todos los requerimientos, ya que permite la computación instantánea de varios momentos en paralelo. Una aplicación más del circuito electrónico de lectura de la invención es el cómputo instantáneo de los parámetros de impacto de un rayo gamma detectado en detectores de radiación para física experimental de altas energías, física médica y astrofísica. Para esta aplicación se precisan muy pocos coeficientes y por lo tanto la invención permite la realización de detectores con muy pocos canales de conversores de analógico a digital. La invención se puede aplicar también al procesamiento de imágenes tomadas con un fotosensor pixelado por análisis de los momentos de las imágenes.

El procedimiento y circuito electrónico de lectura invención permite realizar la expansión en un conjunto de funciones de base de una distribución bidimensional mostrada con un sensor pixelado de  $M \times N$  segmentos. Para esto, se multiplican las  $M \times N$  señales con pesos dependiendo de las posiciones de los segmentos dentro del sensor y se suman las señales pesadas dando lugar a los coeficientes que representan la contribución de la correspondiente función de base a la señal total. El circuito electrónico de lectura de la invención está formado por componentes analógicos, permitiendo así obtención instantánea de los coeficientes, y además es interconectable con otros dispositivos de lectura iguales. Así, se pueden interconectar varios circuitos electrónicos idénticos con el fin de realizar la expansión en el caso de que el número  $M \times N$  de los segmentos del sensor sea mayor que el número de segmentos que un único circuito puede procesar. Otra ventaja importante del circuito electrónico de lectura de la invención es que los pesos son programables con lo cual permite la expansión con diferentes conjuntos de funciones de base. Además, el circuito electrónico de lectura de la invención se puede integrar en el propio sustrato del sensor o sensores, ya sean fotodetectores o detectores de otro tipo.

Más específicamente, la invención se basa en el hecho de que una función  $f(x)$  se puede aproximar por una superposición de un conjunto de funciones ortogonales  $P_i(x)$ :

$$f(x) \approx \tilde{f}(x) = \sum_{i=0}^N \alpha_i P_i(x) \tag{1}$$

donde los coeficientes  $\alpha_i$  se calculan según

$$\alpha_i = \int_a^b f(x) P_i(x) dx \tag{2}$$

y las funciones  $P_i(x)$  cumplen

$$\int_a^b P_i(x) P_j(x) dx = \delta_{ij} \tag{3}$$

Ejemplos para conjuntos de funciones ortogonales son los polinomios de Legendre, los polinomios de Gegenbauer, los polinomios de Chebyshev, los polinomios de Laguerre, los polinomios de Hermite, los polinomios de Zernike, las funciones trigonométricas usadas en las series de Fourier y muchas otras más. Los coeficientes  $\alpha_i$  se llaman momentos de Legendre, Chebyshev, etc., según los polinomios que se usan en ecuación 2. En caso de la expansión de Fourier,

los  $\alpha_i$  son las frecuencias espaciales y las funciones  $P_i(x)$  son las exponenciales  $\exp(ijx)$  con  $j = \sqrt{-1}$ . En caso de que las funciones  $P_i(x)$  son monomios de la forma  $x^i$ , los coeficientes  $\alpha_i$  son los momentos cartesianos de la función  $f(x)$ . Aunque los monomios no son ortogonales, es posible reconstruir  $f(x)$  a partir de los  $\alpha_i$ . Las ecuaciones 1, 2, y 3 se pueden generalizar para funciones  $f(\bar{x})$  donde  $\bar{x} \in \mathfrak{R}^n$  y  $n > 1$ . El objetivo de esta invención es implementar la computación de los coeficientes  $\alpha_i$  de forma analógica y programable para que con el mismo circuito electrónico de lectura se puedan implementar diferentes funciones de base  $P_i(x)$ . El hecho de que el circuito electrónico de lectura sea analógico lo hace suficientemente rápido para el uso en detectores de partículas y el hecho de que los pesos  $P_i(x)$  sean programables lo hace suficientemente flexible y escalable para permitir su uso en detectores de partículas con un gran rango de segmentos.

La siguiente descripción de la invención se realiza en relación a un sensor pixelado genérico, que según la aplicación puede ser un fotodetector sensible a posición, un fotodetector segmentado, uno o varios sensores gamma centelleador, sensores de imagen CMOS, u otros conocidos para un experto en la materia. El sensor pixelado dispone de una matriz de  $N \times M$  segmentos (1) de área finita  $\Omega_{l,k}$  con  $l=1 \dots N$  y  $k=1 \dots M$ . En consecuencia, la ecuación (2) se convierte en

$$\alpha_i = \sum_{l=1}^N P_i(x_l) \int f(x) dx \quad (4)$$

en el caso unidimensional y en

$$\alpha_{ij} = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^M P_i(x_l) P_j(x_k) \iint f(x,y) dx dy \quad (5)$$

en el caso bidimensional, donde  $x_l$  y  $x_k$  son los centros de los segmentos (1) y  $\iint f(x,y) dx dy$  representa la carga recogida por el segmento  $\Omega_{l,k}$  del sensor. Así, en caso de tratarse de un fotodetector que convierte la carga a luz de centelleo,  $\iint f(x,y) dx dy$  representaría la luz de centelleo recogida por el segmento  $\Omega_{l,k}$ . Un objetivo de la presente invención es la implementación de una electrónica que computa de forma analógica los coeficientes  $\alpha_{ij}$  siendo  $P_i(x_l)$  y  $P_j(x_k)$  los pesos que se pueden ajustar por lo menos parcialmente mediante la programación posterior a la implementación del circuito. En lugar de implementar la electrónica para la computación de los coeficientes  $\alpha_{ij}$  es posible reducir el problema bidimensional de la ecuación (5) a dos problemas unidimensionales

$$\alpha_i = \sum_{l=1}^N P_i(x_l) \int f(x,y) dy \quad (6)$$

$$\alpha_j = \sum_{k=1}^M P_j(x_k) \int f(x,y) dx$$

donde  $\int f(x,y) dy$  es la proyección de  $f(x,y)$  a lo largo del eje  $x$  y  $\int f(x,y) dx$  es la proyección de  $f(x,y)$  a lo largo del eje  $y$ . Esto reduce considerablemente la complejidad del circuito electrónico de lectura y el número de registros para los pesos programables. En caso de implementar la ecuación (5) para los primeros  $Q$  coeficientes a lo largo de las direcciones  $x$  e  $y$  es necesario guardar  $M \times N \times (Q+1)$  pesos independientes, mientras que el conjunto de ecuaciones (6) solo requiere  $(M+n) \times (Q+1)$ . La desventaja de usar el conjunto de ecuaciones (6) consiste en un *Signal to Noise Ratio* (SNR) reducido, sobre todo si se implementan los momentos de tal manera que los coeficientes  $\alpha$  representan los momentos cartesianos. En este caso, los monomios  $P_i(x_l) P_j(x_k) = x^i x^{jk}$  con  $i$  y  $j$  elevados, amplifican de forma considerable el ruido de la  $f(x,y)$  detectada. Este efecto puede ser reducido usando otros polinomios como los de Legendre, Chebychev, Zernike etc. La proyección de  $f(x,y)$  a lo largo de los ejes  $x$  e  $y$  se consigue uniendo los segmentos del detector a lo largo de las columnas (2) y las filas (3) en figura 1. Existen fotodetectores que disponen inherentemente de esta configuración como por ejemplo *crossed wire position sensitive photomultiplier o micro strip detectors*.

Para la computación simultánea de las dos proyecciones se han de introducir medios de copia de la señal o medios de división proporcional según la figura 2. En esta figura, 4 es un búfer de ganancia variable pero de igual ganancia para todos los  $M \times N$  segmentos. Este búfer permite la adaptación de impedancia y de la señal de entrada  $S^{in}$ , ya que esta puede ser voltaje, corriente o carga pero siempre corresponde a  $\iint f(x,y) dx dy$ ,  $\int f(x,y) dy$  o  $\int f(x,y) dx$ . Esa señal se divide o multiplica mediante el componente (5) y los buffer (6) adaptan la señal a las siguientes etapas (figuras 3, 5, 7 y 8) para desacoplar la salida del detector del resto de los elementos. La presente invención facilita de esta manera un procesamiento previo de la señal para su apropiado acondicionamiento. El hecho de que la ganancia de (4) sea variable

y con el mismo valor para todos los  $M \times N$  segmentos permite el ajuste de la sensibilidad del circuito electrónico de lectura para los requisitos de diferentes sensores.

La Figura 3 muestra la etapa para el cómputo de los coeficientes  $\alpha$  según la ecuación (6). Los multiplicadores analógicos (7) multiplican la señal  $S^m$  por unos coeficientes que son (*una señal estática que representa*) los pesos  $P_i(x_i)$  y  $P_j(x_k)$ , proporcionados por el convertidor digital-analógico (8). Estas multiplicaciones dan lugar a las señales  $S_1, S_2, \dots, S_{Q+1}$ , donde  $Q$  es el orden del coeficiente con el orden más alto que se pretende implementar. Para memorizar los valores adecuados de los pesos  $P_i(x_i)$  y  $P_j(x_k)$  se implementan medios de memorización (9) y medios de transferencia de datos digitales (10) (buses en serie o paralelos). Las  $M \times N$  copias  $S_x$  (figura 2) se suman para todos los etapas que están en la misma columna. Las  $M \times N$  copias  $S_y$  se suman para todas las etapas de entrada que están en la misma fila. Estas sumas se usan como señal de entrada  $S^m$  para la etapa de la figura 3.

La figura 4 muestra una primera realización del circuito electrónico de lectura de la invención donde las señales pesadas  $S^x_1, S^y_1, S^x_2, S^y_2, \dots, S^x_{Q+1}, S^y_{Q+1}$  se suman separadamente para las dos direcciones espaciales y para cada orden del coeficiente donde los elementos (11) son las etapas de entrada según la figura 2 y los elementos (12) son los módulos de superposición pesada según la figura 3. El superíndice de  $S^x_1, S^y_1, S^x_2, S^y_2, \dots, S^x_{Q+1}, S^y_{Q+1}$  diferencia la coordenada espacial de los dos conjuntos de señales  $S_1, S_2, S_{Q+1}$ . Para una mejor claridad, se han omitido en figura 4 los buses y registros necesarios para la memorización y la programación de los pesos variables.

La figura 5, por otro lado, muestra una segunda realización del circuito electrónico de lectura de la invención donde se implementa directa de la ecuación (5) de manera directa, sin previas proyecciones de la distribución de carga  $f(x,y)$  a lo largo de los ejes  $x$  e  $y$ , en este caso, precisa una para cada uno de los  $N \times M$  segmentos del detector. La señal  $S_{lk}$  del segmento  $(l,k)$  se desacopla con el buffer (18) de ganancia variable como en el caso de la figura 2 y se entrega a los multiplicadores (16) que multiplican la señal con los pesos estáticos  $P_i(x_i)P_j(x_k)$  que se obtienen con los multiplicadores (15) a partir de los pesos estáticos  $P_i(x_i)$  y  $P_j(x_k)$ . Los convertidores digital-analógicos (13) y los medios de memorización (14) proporcionan estos pesos estáticos, donde los medios de memorización (14) se programan mediante un bus de datos digitales (17). Para coeficientes hasta el orden  $Q$ , se precisan  $(Q+1)^2+2(Q+1)$  elementos de multiplicación de señales, aunque es posible omitir algunos órdenes debido a posibles simetrías de  $f(x,y)$  o si el correspondiente coeficiente contiene poca información a cerca de la distribución  $f(x,y)$ . Las copias pesadas  $S_{1,1}, S_{1,2}, \dots, S_{Q+1,Q+1}$  se suman separadamente para cada orden del coeficiente  $\alpha_{ij}$ . Con el fin de reducir el número de los elementos necesarios para la computación de los coeficientes  $\alpha_{ij}$ , se puede restringir la flexibilidad del circuito. Si se renuncia a la posibilidad de permitir pesos  $P_i(x_i)$  y  $P_j(x_k)$  dejando como única opción a los monomios  $x^i$  y  $y^j$ , la ecuación (5) se convierte en

$$\alpha_{ij} = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^M x_l^i x_{k^j} \int \int f(x,y) dx dy, \quad (7)$$

siéndolos  $\alpha_{ij}$  momentos cartesianos aproximados de la distribución  $f(x,y)$ . Para la implementación de la ecuación (7) en un circuito tan solo hay que generar las potencias  $x^i$  e  $y^j$  hasta el orden  $Q$  máximo que se pretende implementar y con los valores de  $x$  e  $y$  variables y programables. El producto de las potencias  $x^i$  e  $y^j$  se multiplica por la señal  $\int \int f(x,y) dx dy$  recogida por el segmento  $\Omega_{lk}$ . Estos  $M \times N \times (Q+1)$  productos se suman sobre los  $M \times N$  segmentos separadamente para cada orden del coeficiente  $\alpha_{ij}$ .

La figura 6 muestra una cascada de multiplicadores (19) que generan a partir de la señal  $S_x$  las potencias  $(S_x)^r$  con  $r=1, 2, \dots, Q$ ,  $S_x$  es una señal estática, que se proporciona por el conversor de digital a análogo (20), los medios de memorización (21) y el bus de datos digitales (22). A cada uno de los  $M \times N$  segmentos del fotodetector o del detector de radiación se conecta una etapa de multiplicación según las figuras 7 u 8.

En la implementación según la figura 7, los momentos cartesianos de la distribución  $f(x,y)$  se tratan de forma independiente para las dos direcciones espaciales  $x$  e  $y$ . Un búfer (24) de ganancia variable equivalente al búfer (6) de la figura 2 desacopla la señal  $S_{lk}$  del detector y la señal en su salida se reparte en varios multiplicadores (23) que realizan la multiplicación entre la señal y el peso. Los resultados de estas operaciones se suman separadamente para cada orden de los coeficientes  $\alpha_i$  y  $\alpha_j$  a través de los buses  $\sum S_0, \sum S^x_1, \sum S^y_1, \sum S^x_2, \dots, \sum S^x_Q$  y  $\sum S^y_Q$ , siendo  $\sum S_0$  la carga total que reciben los  $M \times N$  segmentos en su conjunto.

En la implementación según la figura 8 se permite la computación de combinaciones lineales de los momentos a lo largo de las dos direcciones espaciales. Un búfer (27) de ganancia variable equivalente al búfer (6) de la figura 2 desacopla la señal  $S_{lk}$  del detector y la señal en su salida se reparte en varios multiplicadores (25) que realizan la multiplicación entre la señal y un peso conjunto que se obtiene a partir de un peso o varios pesos en la dirección  $x$  y un peso o varios pesos en la dirección  $y$ . El elemento (25) representa una red funcional que implementa la combinación lineal de las entradas y que en los casos más simple es una única adición o una única multiplicación.

Los resultados de estas operaciones se suman separadamente para cada orden de los coeficientes  $\alpha_{ij}$  a través de los buses  $\sum S_{0,0}$   $\sum S_{1,1}$ ,  $\sum S_{1,2}$ , ...,  $\sum S_{Q,Q}$ , siendo  $\sum S_{0,0}$  la carga total que reciben los  $M \times N$  segmentos en su conjunto. Según las necesidades de la aplicación se pueden omitir ordenes intermedios, (por ejemplo por las simetrías  $f(x,y)$ ). También es posible combinar las soluciones según la figura 7 y la figura 8.

La Figura 9 muestra una tercera realización del circuito electrónico de lectura de la invención en caso del trato independiente de los momentos cartesianos en las direcciones  $x$  y  $y$ . Con un total de  $M+N$  módulos (28) para la generación de pesos según el circuito en figura 6 se generan las potencias para  $(M+N) \times Q$  pesos  $(S_x^1)^1, \dots, (S_x^1)^Q, \dots, (S_x^N)^1, \dots, (S_x^N)^Q$  y  $(S_y^1)^1, \dots, (S_y^1)^Q, \dots, (S_y^M)^1, \dots, (S_y^M)^Q$  a partir de los  $M+N$  valores  $S_x^l$  y  $S_y^l$  o os en los registros (21) (figura 6). Ya que los pesos  $(S_x^1)^1, \dots, (S_x^1)^Q, \dots, (S_x^N)^1, \dots, (S_x^N)^Q$  y  $(S_y^1)^1, \dots, (S_y^1)^Q, \dots, (S_y^M)^1, \dots, (S_y^M)^Q$  se obtienen por multiplicación reiterada de los valores almacenadas  $S_x^l$  y  $S_y^l$ , el circuito según la figura 9 computa los momentos cartesianos del conjunto de señales de entrada  $S_{1,k}$ . Los  $(M+N) \times Q$  coeficientes se reparten a los  $M \times N$  multiplicadores de señales (29) según la figura 7, que multiplican cada una de las señales de entrada  $S_{1,k}$  con los pesos. Para mejor visibilidad, la figura 9 solo muestra 6 de los  $M+N$  módulos para la generación de pesos y 3 de los  $M \times N$  multiplicadores de señales. Las  $M \times N \times Q$  señales resultantes se suman con sumadores analógicos sobre todos los módulos (29) según su orden  $Q$  y dirección espacial para obtener los  $(M+N) \times Q$  momentos cartesianos  $\sum (S_x^1)^1, \dots, \sum (S_x^Q)^1, \dots, \sum (S_x^1)^Q, \dots, \sum (S_x^Q)^Q$ .

La Figura 10 muestra una cuarta realización del circuito electrónico de lectura de la invención en caso de usar combinaciones lineales de los momentos en las direcciones  $x$  y  $y$ . De nuevo, se usa un total de  $M+N$  módulos (30) para la generación de pesos según el circuito en figura 6 y se generan las potencias necesarias para  $(M+N) \times Q$  pesos  $(S_x^1)^1, \dots, (S_x^1)^Q, \dots, (S_x^N)^1, \dots, (S_x^N)^Q$  y  $(S_y^1)^1, \dots, (S_y^1)^Q, \dots, (S_y^M)^1, \dots, (S_y^M)^Q$  a partir de los  $M+N$  valores  $S_x^l$  y  $S_y^l$  o os en los registros (21) (figura 6). Aunque los pesos  $(S_x^1)^1, \dots, (S_x^1)^Q, \dots, (S_x^N)^1, \dots, (S_x^N)^Q$  y  $(S_y^1)^1, \dots, (S_y^1)^Q, \dots, (S_y^M)^1, \dots, (S_y^M)^Q$  se obtienen por multiplicación reiterada de los valores almacenadas  $S_x^l$  y  $S_y^l$ , ahora depende de la función  $f$  (parte 25) implementado en el circuito de la figura 8, si el circuito según la figura 10 computa los momentos cartesianos del conjunto de señales de entrada  $S_{1,k}$ , o no. Los  $(M+N) \times Q$  coeficientes se reparten a los  $M \times N$  módulos (25) de función  $f$  según la figura 8 donde se crean coeficientes compuestos por la función  $f$ , por ejemplo  $S_x^1 + S_y^1$ ,  $S_x^1 \times S_y^1$  o similares, siendo  $p$  y  $q$  exponentes entre 0 y  $Q$ . Cada uno de estos coeficientes compuestos se multiplican (multiplicadores 26) con cada una de las señales de entrada  $S_{1,k}$ . Las señales resultantes se suman con sumadores analógicos sobre todos los módulos (31) según su orden  $Q$  para obtener los  $M \times N \times Q$  coeficientes compuestos  $\sum (S_x^1 \circ S_y^1), \sum (S_x^Q \circ S_y^1), \sum (S_x^1 \circ S_y^2), \dots, \sum (S_x^Q \circ S_y^Q)$ , (donde  $\circ$  representa el operador de la función  $f$ ). Para mejor visibilidad, la figura 10 solo muestra 6 de los  $M+N$  módulos para la generación de pesos y 3 de los  $M \times N$  multiplicadores de señales. También es posible combinar las soluciones según figura 9 y figura 10.

La implementación de los circuitos electrónicos de lectura de las figuras 4, 5, 9 y 10 se puede realizar mediante ASICs circuitos discretos o circuitos híbridos. Especialmente en los casos de fotomultiplicadores de silicio o en detectores de radiación sensibles a posición como por ejemplo *micro strip detectors*, esto permitirá integrar los segmentos del fotodetector o del detector de radiación y una variante de los circuitos electrónicos de lectura de las figuras 4, 5, 9 o 10 en el mismo sustrato del detector o fotodetector.

Otra posibilidad de implementación sería el uso de circuitos módulos híbridos o módulos discretos. Como los pesos para la computación de los coeficientes  $\alpha_{ij}$  o  $\alpha_i$  y  $\alpha_j$  son programables por medios de registros y un bus de datos digitales, se pueden usar varios ASIC, módulos híbridos o módulos discretos en conjunto según figura 11, para calcular dichos coeficientes en el caso de que los números  $N$  y  $M$  son mayores que las entradas previstas del circuito según las figuras 4, 5, 9 o 10, la ecuación (5) se puede reescribir de forma

$$\alpha_{i,j} = \sum \sum \alpha_{i_\lambda j_\theta}, \text{ con} \tag{8}$$

$$\alpha_{i_\lambda j_\theta} = \sum_{l_\lambda} \sum_{k_\theta} P_{i_\lambda}(x_{l_\lambda}) P_{j_\theta}(x_{k_\theta}) \int \int f(x,y) dx dy$$

donde la suma parcial  $\alpha_{i_\lambda j_\theta}$  se calcula en el circuito  $(\lambda, \theta)$  de los  $\lambda \times \theta$  ASIC's 33 o módulos híbridos 33 o módulos discretos 33, siendo  $\lambda = 1, 2, \dots, \wedge$  y  $\theta = 1, 2, \dots, \Theta$ . De esta manera se generan  $Q \times \wedge \times \Theta$  señales  $\alpha_{i_\lambda j_\theta}$  que se sumaran según su orden con  $Q$  sumadores externos adicionales 32. También existe la posibilidad de usar un ASIC, un módulo híbrido o un módulo discreto adicional según las figuras 4, 5, 9 o 10 para realizar esta suma.

## Realizaciones preferentes de la invención

### *Detectores de rayos gamma*

5 Según se ha mencionado previamente en el presente documento, una aplicación de la presente invención son los detectores de rayos gamma empleados en dispositivos como PETs y SPECTs. La necesidad de obtener más información sobre la posición tridimensional de la fotoconversión es especialmente importante para la detección de radiación de altas energías. Esto requiere materiales muy densos y pesados para la realización del detector y por tanto reduce la utilidad de detectores de radiación basados en semiconductores y favorece el uso de la combinación de centelladores y fotodetectores. La figura 12 muestra un ejemplo de circuito electrónico de lectura de acuerdo con la invención aplicado a este caso, apreciándose el centelleador (35), medios de acoplamiento óptico (36), el fotodetector (37) sensible a posición o un conjunto de fotodetectores, siendo 38 el circuito electrónico de lectura de la invención. En este primer ejemplo, el número de entradas del circuito electrónico de lectura cumple  $N_c > N_{fd} > M_c > M_{fd}$ , donde  $N_{fd}$ ,  $M_{fd}$  son los números de segmentos del fotodetector sensible a posición o un conjunto de fotodetectores. Es decir, el circuito electrónico de lectura 38 tiene más entradas que píxeles el fotodetector 37, por lo que un único circuito electrónico de lectura 38 es suficiente para la lectura de todas las señales.

En caso contrario, es decir, si  $N_c < N_{fd}$ ,  $M_c < M_{fd}$  se usa la implementación según figura 13, donde (39) es el centelleador, (40) medios de acoplamiento óptico, (41) el fotodetector sensible a posición o un conjunto de fotodetectores y (42) el circuito electrónico de lectura de la invención. Puesto que las salidas se procesarán con el sumador (33) de la figura 11, no hay ningún incremento en el número requerido de canales electrónicos.

La presente invención se puede usar también para superar la limitación en el tamaño del detector impuesto por el tamaño reducido del cristal centelleador. Una gran variedad de centelleadores sólo se pueden fabricar hasta un tamaño límite, dado por el proceso de producción. En el caso de que el detector de rayos gamma deba tener dimensiones mayores que el tamaño límite del centelleador, se pueden unir dos o más cristales de centelleo, como se muestra en la figura 14. Aunque cada uno de los cristales (43) tenga su propio fotodetector sensible a posición o conjunto de fotodetectores (45) y su propio circuito electrónico de lectura (46) según la invención, se puede considerar el detector como un solo módulo ya que las salidas se procesarán con el sumador (33) de la figura 11. En la figura 14, (44) son los medios de acoplamiento óptico.

### *Visión Artificial*

35 Para la utilización de la presente invención en el campo de la visión artificial se puede conectar cualquier implementación según las figuras 3 a 8 al sensor de imagen CMOS integrado en el sistema de visión en el chip. En este caso, es posible conectar un circuito electrónico de lectura con  $N \times N$  entradas a la matriz de los  $N \times N$  píxeles del sensor de imagen CMOS integrado. Esto permite computar los momentos globales de la imagen por medios analógicos y por lo tanto instantáneos para su posterior digitalización con un bloque de conversores analógico-digital. Para el funcionamiento correcto y para operaciones que no son posibles con el presente circuito electrónico de lectura, el sistema debe seguir disponiendo de la lógica de control para los píxeles y del sistema de lectura convencional de lectura/digitalización. Muchas aplicaciones en visión artificial requieren la computación de momentos locales, es decir momentos computados a partir de los valores de un pequeño subconjunto de  $M \times L$  píxeles, con  $M < N$  y  $L < N$ . Para poder computar los momentos locales con el circuito electrónico de lectura se precisa de una matriz de  $M \times L$  células de memoria analógica, por ejemplo elementos Sample & Hold, que se puede conectar entre el sensor de imagen CMOS y el circuito de expansión. Alternativamente, un bloque puede realizar operaciones previas, realizables de forma analoga, como por ejemplo filtros de contorno, basado en el gradiente discreto y una posterior comparación para seleccionar solo valores por encima de un cierto umbral. También es posible proporcionar medios para este tipo de pre-procesamiento analógico y adicionalmente una matriz de  $M \times L$  células de memoria analógica. Para el caso  $M=N$  y  $L=1$ , el circuito de expansión computa los momentos sobre una fila de los píxeles del sensor de imagen CMOS.

## Referencias

- 55 [Nadler1993] Pattern Recognition Engineering, Morton **Nadler**, Eric P **Smith**, *John Wiley & Sons Inc.* 1993.
- [Hornberg2006] Handbook of Machine Vision, Alexander **Hornberg**, *Wiley-VCH*, 2006.
- [Sohn2002] CMOS active pixel sensor, Sohn, *Il-young* (Yongin-shi, KR), United States Patent 6365950.
- 60 [Moses1994] Design studies for a pet detector module using a pin photodiode to measure depth of interaction, **Moses et al.**, *IEEE Transactions on Nuclear Science* (ISSN 0018-9499), vol. 41, no. 4, pt. 1, p. 1441-1445 (1994).
- [Bart1991] A depth-encoded PET detector, **Bartzakos et al.**, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 38, no. 2, pp. 732-738 (1991).

## ES 2 363 286 A1

[Seidel1999] Depth identification accuracy of a three layer phoswich PET detector module, **Seidel et al.**, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 46, no. 3, pp. 485-490 (1999).

5 [Camp1998] A readout chip for a 64x64 pixel matrix with 15-bit single photon counting **Campbell et al.** *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 45, no. 3, pt. 1, pp. 751-753 (1998).

[Olli2007] A front-end readout mixed chip for high-efficiency small animal PET imaging, *Nucl. Ins. Met. A*, vol. 571, pp. 312-316 (2007).

10 [Weng2002] A High-Speed, Low-Noise CMOS 16-Channel Charge-Sensitive Preamplifier ASIC for APD-Based PET Detectors, *IEEE Nuclear Science Symposium Record*, vol. 1, pp. 539-543 (2002).

[Wallmark 1959] A new semiconductor cell using lateral photoeffect, *Proceedings of the IRE*, vol. 45, no. 4, pp. 474-483, 1957.

15 [Yeom2007] A waveform sampling front-end ASIC for readout of GSO/APD with DOI information, *Nucl. Ins. & Meth. A*, Volume 571, 381-384 (2007).

20 [Cherry1997] MicroPET: a high resolution PET scanner for imaging small animals. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 44, pp. 1161-1166 (1997).

[Pichler1997] Studies with a prototype high resolution PET scanner based on LSO-APD modules, *IEEE Nuclear Science Symposium* (1997).

25 [Binkley2000] A power-efficient, low-noise, wideband, integrated. CMOS preamplifier for LSO/APD PET systems, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 47, no. 3, pp. 810-817 (2000).

[Streun2002] A PET system with free running ADCs, *Nucl. Ins. & Meth. A*, vol. 486, pp. 18-21 (2002).

30 [Lerche2005] Depth of interaction within continuous crystals from the width of its scintillation light distribution. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 52(3):560-572, 2005.

[Benlloch2006] Gamma Ray Detector with Interaction Depth Coding, US Patent N° 2006/0192128 A1.

35 [Lerche2006] Depth of interaction enhanced gamma-ray imaging for medical applications. **Christoph W. Lerche**, (Universidad de Valencia), Ph.D. *Thesis*, 2006.

[Herrero2007] Front-end circuit for position sensitive silicon and vacuum tube photomultipliers with gain control and depth of interaction measurement, *Nucl. Ins. & Meth. A*, Volume 576(1):118-122, June 2007.

40

45

50

55

60

65

# ES 2 363 286 A1

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de las señales generadas por uno o más sensores pixelados (37, 41, 45) de  $M \times N$  segmentos (1), que realiza el cálculo de coeficientes de expansión en un conjunto de funciones de base de la distribución bidimensional de señales, **caracterizado** porque está formado por componentes analógicos.
- 10 2. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con la reivindicación 1, que además es interconectable con otros circuitos de lectura (38, 42, 46) iguales, permitiendo el tratamiento de señales generadas por sensores pixelados (37, 41, 45) de mayor tamaño que el del circuito de lectura (38, 42, 46)
- 15 3. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además comprende medios de memorización (9, 13, 14) programables para el almacenamiento de los pesos empleados en la expansión, de modo que es posible realizar la expansión según diferentes funciones de base.
- 20 4. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con la reivindicación 3, donde los pesos corresponden a polinomios de Legendre, polinomios de Gegenbauer, polinomios de Chebyshev, polinomios de Laguerre, polinomios de Zernike o a funciones trigonométricas usadas en series de Fourier.
- 25 5. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el sensor o sensores pixelados (37, 41, 45) es uno de los siguientes: fotodetectores sensibles a la posición, fotodetectores segmentados, sensores de radiación gamma centelleador y sensores de imagen CMOS.
- 30 6. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que está integrado en el sustrato del sensor (37, 41, 45).
- 35 7. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende:
- 40  $(M \times N)$  bloques de copia (11), que doblan la señal  $S^{ln}$  generada por cada segmento (1) del sensor pixelado (37, 41, 45);
- $(M+N)$  sumadores, que suman las señales  $S^{ln}$  por filas (3) y columnas (2);
- $(M+N)$  bloques de cálculo (12), cada uno de los cuales comprende  $Q+1$  multiplicadores (7) y  $Q+1$  medios de memorización (9) conectados a  $Q+1$  convertidores digital-analógico (8), donde se multiplica la suma de las señales  $S^{ln}$  de cada columna y de cada fila por los  $Q+1$  primeros pesos de la expansión almacenados en los medios de memorización (9), obteniéndose los coeficientes  $S_1, S_2 \dots S_{Q+1}$ ; y
- 45  $(Q+1)$  sumadores, que suman los coeficientes  $S_1, S_2 \dots S_{Q+1}$  para cada orden el coeficiente por filas (3) y columnas (2).
- 50 8. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-6, que comprende, para cada uno de los  $M \times N$  segmentos (1) del sensor pixelado (37, 41, 45):
- $2(Q+1)$  medios de memorización (14) que almacenan respectivamente los pesos correspondientes a los ejes  $x$  e  $y$ , que están conectados a  $2(Q+1)$  convertidores digital analógico (13);
- $2(Q+1)$  multiplicadores (15), que multiplican las diferentes combinaciones de los pesos correspondientes a los ejes  $x$  e  $y$ ; y
- $(Q+1)^2$  multiplicadores (16), que multiplican los resultados obtenidos por los multiplicadores (15) por las señales  $S^{ln}$  de cada segmento (1) del sensor pixelado (37, 41, 45).
- 55 9. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-6, que comprende:
- 60  $(M+N)$  módulos (28) que generan los  $(M+N) \times Q$  momentos cartesianos de las señales  $S_{lk}$  generadas por los segmentos (1) del sensor pixelado (37, 41, 45), comprendiendo cada uno cuyos módulos (28) una cascada de multiplicadores (19) que generan los pesos  $(S_x)^r$ , donde  $S_x$  se obtiene de un bus de datos digitales (22) conectado a unos medios de memorización (21) y a un conversor digital-analógico (20); y
- 65  $(M \times N)$  multiplicadores (29) que multiplican las señales  $S_{lk}$  por los pesos  $(S_x)^r$ , comprendiendo cada uno de los multiplicadores (29) un búfer (24) de ganancia variable que reparte la salida entre varios multiplicadores (23) que realizan la multiplicación entre la señal  $S_{lk}$  y los pesos, y unos sumadores que suman separadamente los resultados de la operación anterior para cada orden de los coeficientes.

## ES 2 363 286 A1

10. Circuito electrónico de lectura (38, 42, 46) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-6, que comprende:

5 (M+N) módulos (28) que generan los (M+N)×Q momentos cartesianos de las señales  $S_{ik}$  generadas por los segmentos (1) del sensor pixelado (37, 41, 45), comprendiendo cada uno cuyos módulos (28) una cascada de multiplicadores (19) que generan los pesos ( $S_x$ )<sup>r</sup>, donde  $S_x$  se obtiene de un bus de datos digitales (22) conectado a unos medios de memorización (21) y a un conversor digital-analógico (20); y

10 (M×N) multiplicadores (31) que multiplican las señales  $S_{ik}$  por unos coeficientes compuestos, comprendiendo cada uno de los multiplicadores (31) un búfer (27) de ganancia variable que reparte la salida entre varios multiplicadores (26) que realizan la multiplicación entre la señal  $S_{ik}$  y los coeficientes compuestos, y unos sumadores que suman separadamente los resultados de la operación anterior para cada orden de los coeficientes, y donde los coeficientes compuestos se obtienen por medio de un bloque de función f (25).

15

11. Procedimiento de lectura (38, 42, 46) de las señales generadas por uno o más sensores pixelados (37, 41, 45) de M×N segmentos (1), que realiza el cálculo de coeficientes de expansión en un conjunto de funciones de base de la distribución bidimensional de señales, **caracterizado** porque comprende la operación de implementar ecuación

20 
$$\alpha_{ij} = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^M P_i(x_l)P_j(x_k) \iint f(x,y)dx dy$$
 mediante componentes analógicos.

12. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 11, donde se simplifica la ecuación

25 
$$\alpha_{ij} = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^M P_i(x_l)P_j(x_k) \iint f(x,y)dx dy,$$
 de modo que se obtienen los coeficientes de expansión implementando las ecuaciones:

$$\alpha_i = \sum_{l=1}^N P_i(x_l) \int f(x,y)dy \text{ y } \alpha_j = \sum_{k=1}^M P_j(x_k) \int f(x,y)dx .$$

30

35

40

45

50

55

60

65

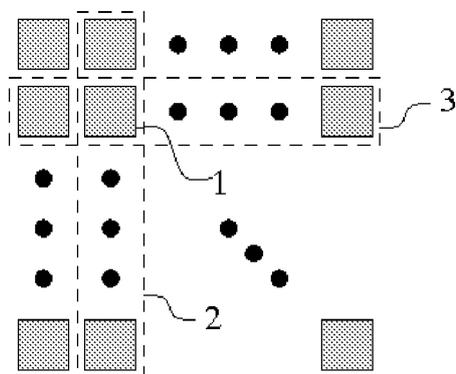


FIG 1

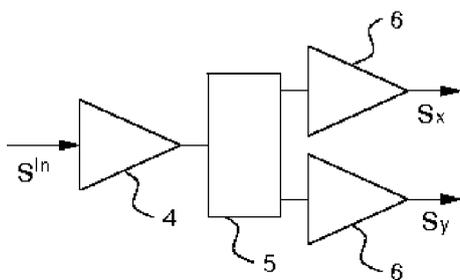


FIG 2

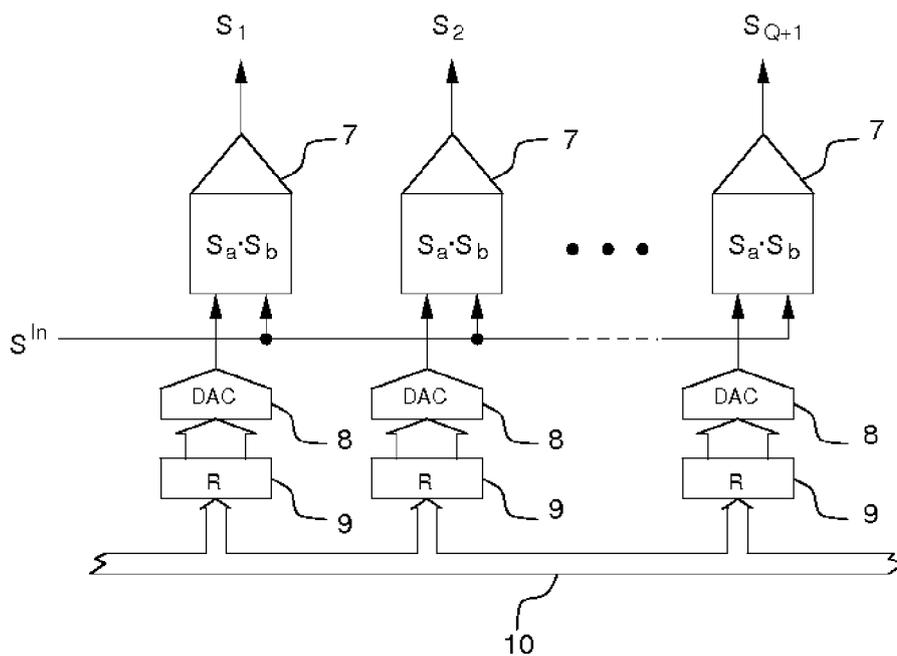


FIG 3

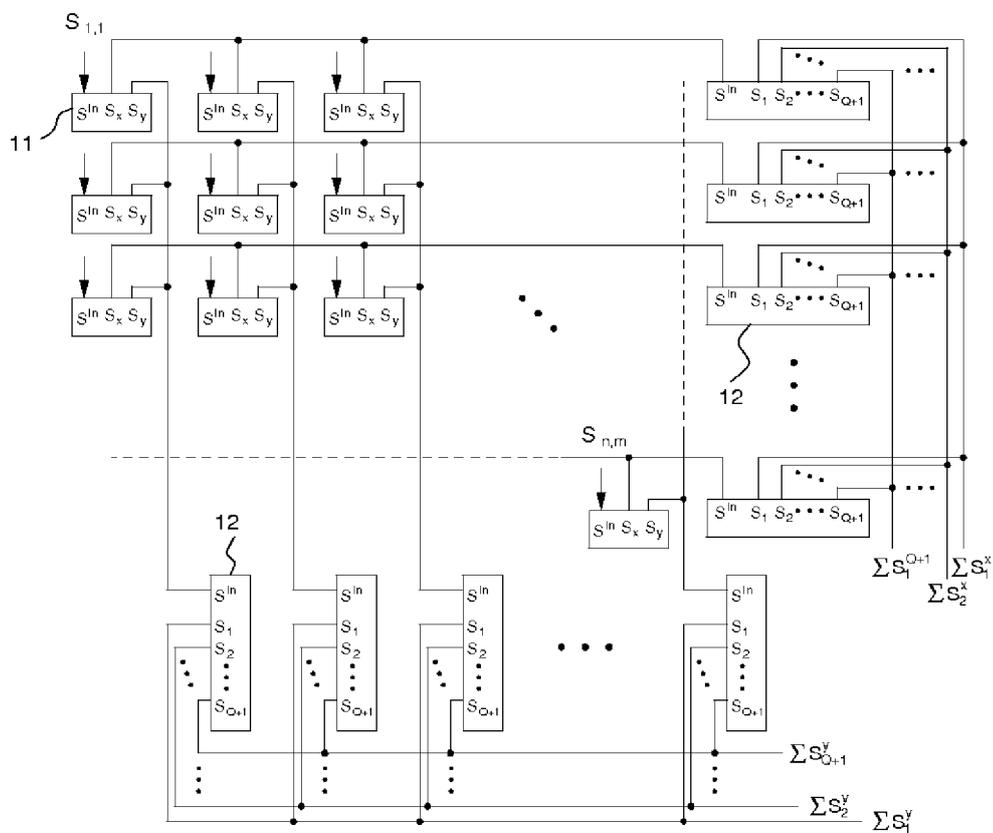


FIG 4

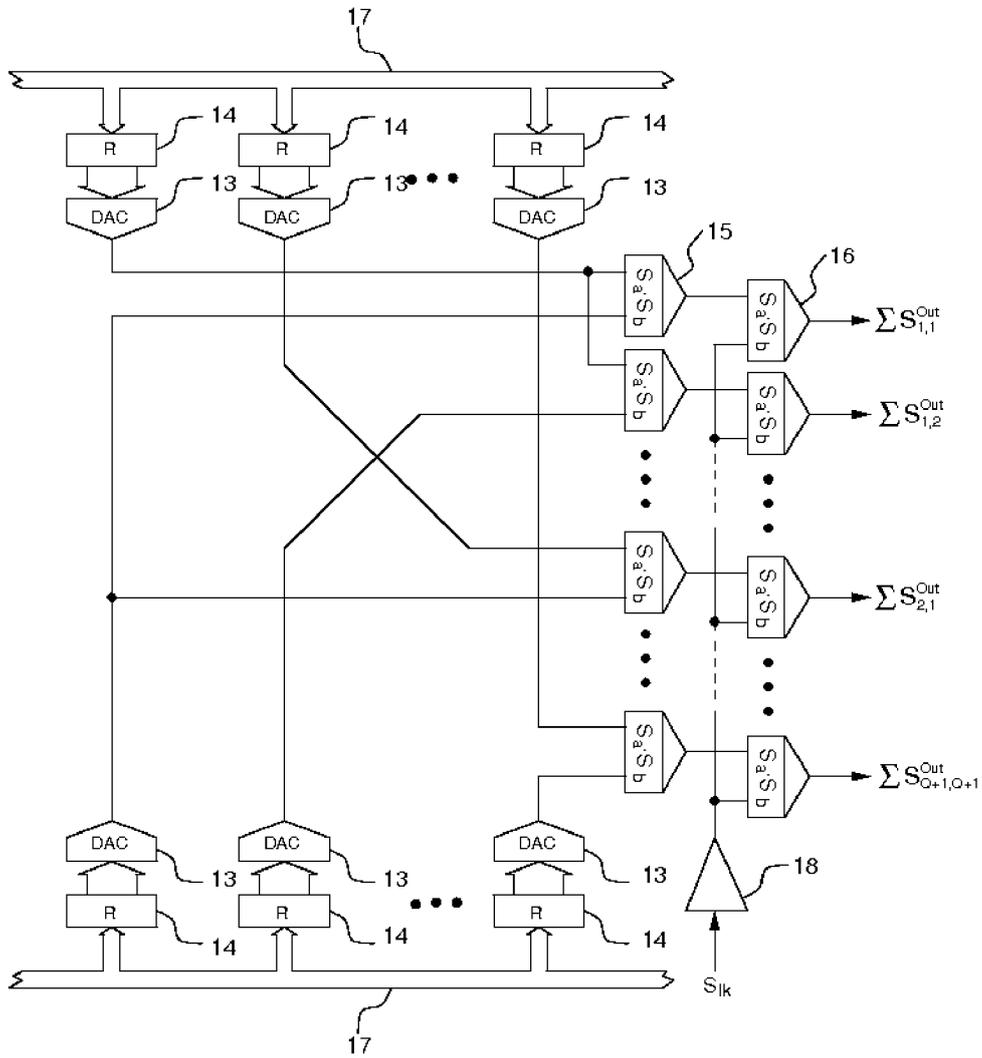


FIG 5

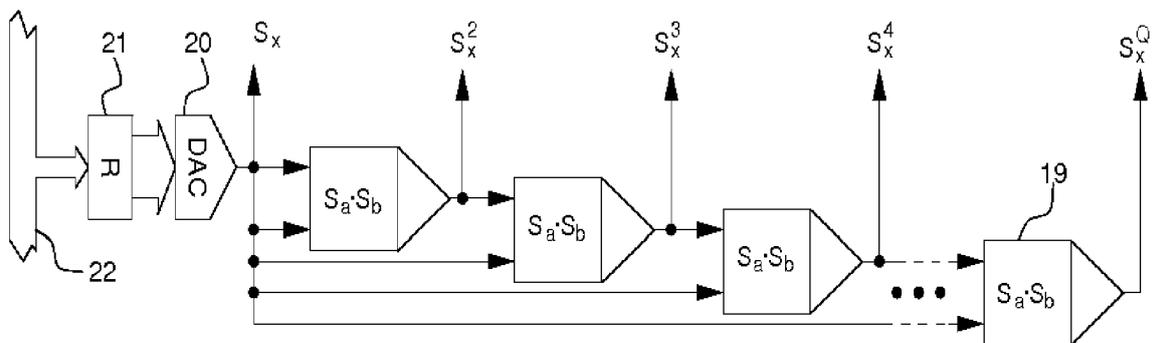


FIG 6

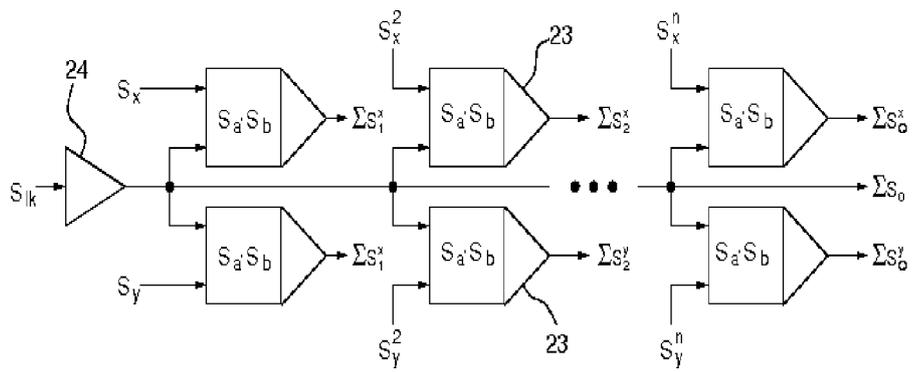


FIG 7

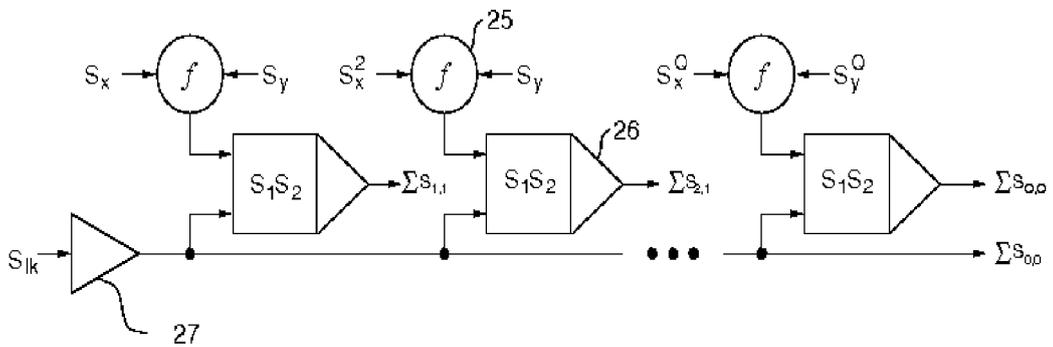


FIG 8

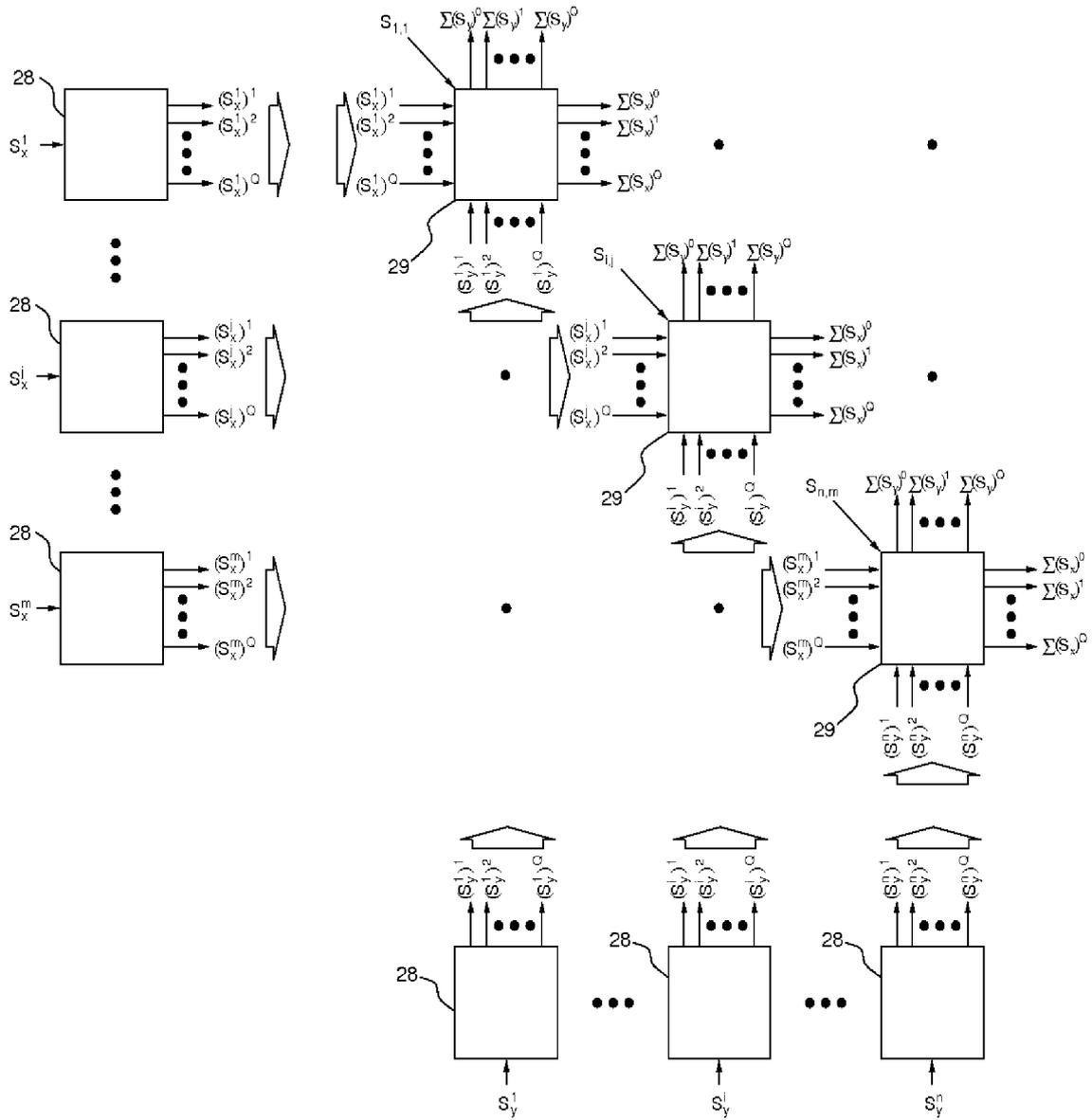


FIG 9

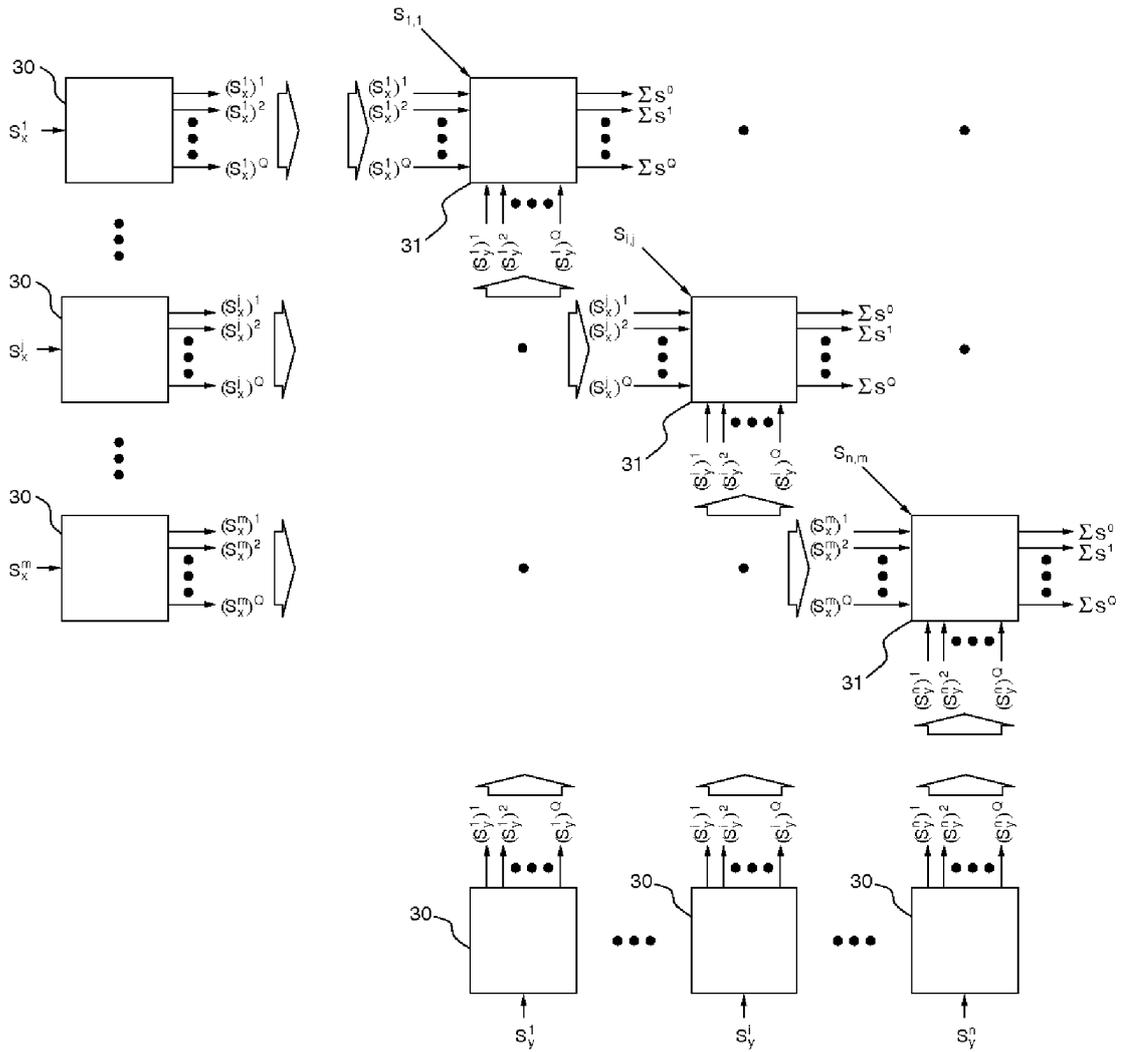


FIG 10

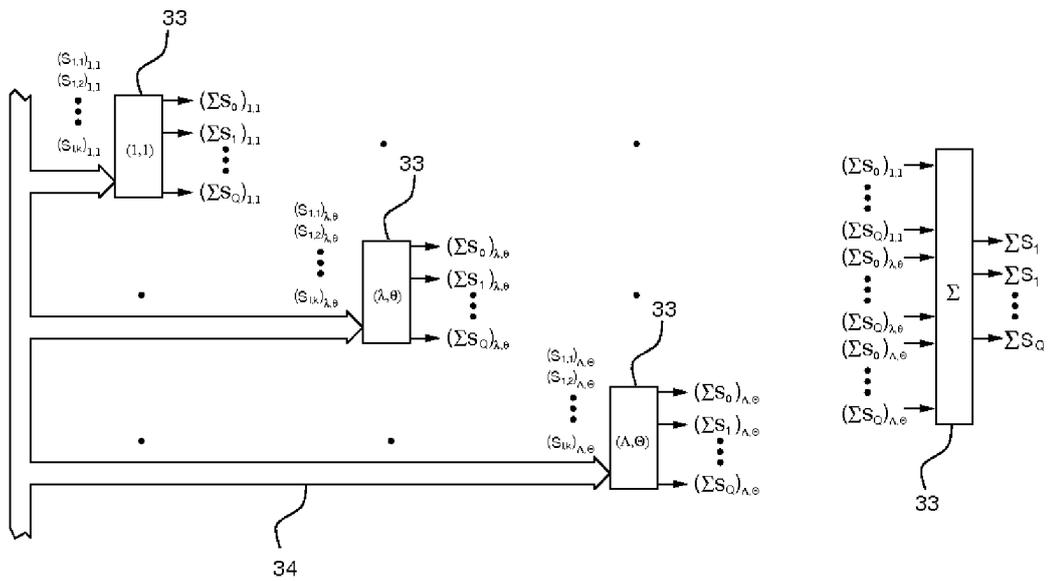


FIG 11

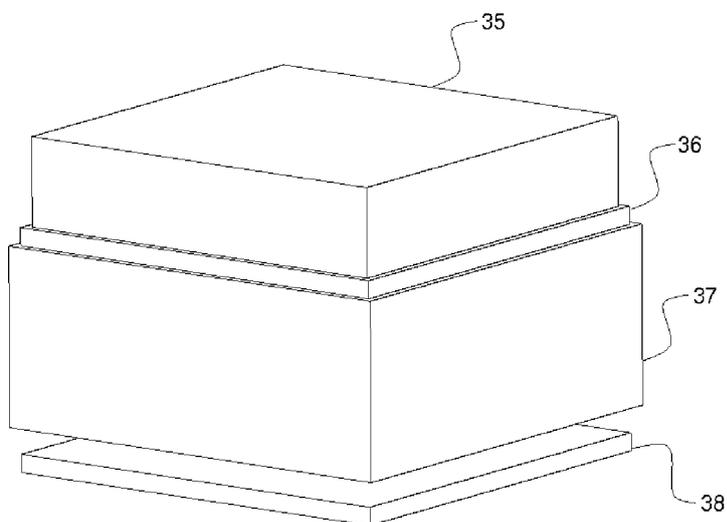


FIG 12

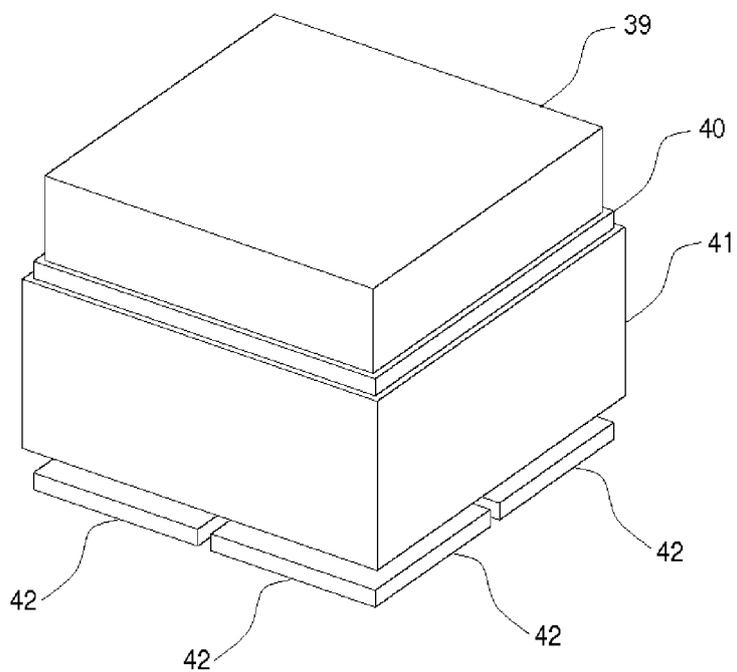
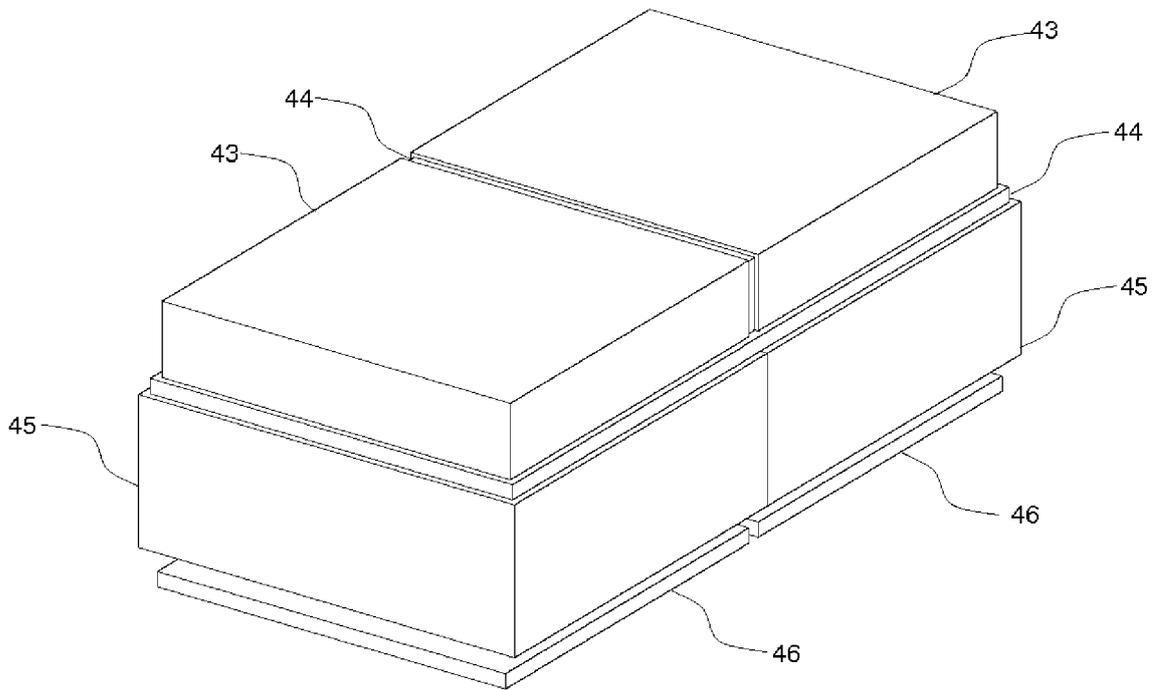


FIG 13



**FIG 14**



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 200930905

②② Fecha de presentación de la solicitud: 26.10.2009

③② Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: **G01T1/208** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	Herrero V et al. "PESIC: an integrated front-end for PET applications", 15th Real-Time Conference - IEEE-NPSS Technical Committee on Computer Applications in Nuclear and Plasma Science, 2007, Piscataway, NJ, USA, páginas 364 – 369	1 - 12
A	Lerche C W et al. "Depth of interaction detection for gamma-ray imaging", Nuclear Instruments & Methods in Physics research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated equipment, 11.03.2009, vol. 600, nº 3, páginas 624-634	1 - 12
A	Gao W et al. "A Low-noise front-end readout chip integrated with a high-resolution TDC for APD-based small-animal PET, 2009 1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their applications, IEEE, Piscataway,NJ,USA, páginas 1-6	1 - 12
A	Mbow N A et al. "A Full-Custom Mixed-Signal CMOS Front-End Readout Chip for High Efficiency Small Animal PET Imaging", Electronics, Circuits and Systems, 2007, IEEE, Piscataway,NJ,USA, páginas 475 – 478	1 - 12

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
13.07.2011

Examinador  
A. Cárdenas Villar

Página  
1/5



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 200930905

②② Fecha de presentación de la solicitud: 26.10.2009

③② Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **G01T1/208** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	Kishishita T et al. "Development of a low-noise, two dimensional amplifier array", Nuclear Instruments & Methods in Physics research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated equipment, 11.01.2009, vol. 598, nº 2, páginas 591 – 597	1 - 12
A	Lerche C W et al. Maximum likelihood positioning for gamma-ray imaging detectors with depth of interaction measurement", Nuclear Instruments & Methods in Physics research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated equipment, 01.06.2009, vol. 604, nº 1-2, páginas 359 – 362	1 - 12
A	DE 102005015017 A1 (National Health Research Institutes, Zhunan, Miaoli, TW) 08.12.2005 Todo el documento	1 - 12
A	EP 1617237 A1 (CSIC) 18.01.2006 Todo el documento	1 - 12
A	WO 2004008177 A1 (Europ Organisation for Nuclear et al.) 22.01.2004 Todo el documento	1 - 12

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
13.07.2011

Examinador  
A. Cárdenas Villar

Página  
2/5

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01T

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, NPL, INSPEC, BIOSIS, MEDLINE

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 13.07.2011

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1 - 12	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b>	Reivindicaciones 1 - 12	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	Herrero V et al. "PESIC: an integrated front-end for PET applications", 15th Real-Time Conference - IEEE-NPSS Technical Committee on Computer Applications in Nuclear and Plasma Science, 2007, Piscataway, NJ, USA, páginas 364 – 369	
D02	Lerche C W et al. "Depth of interaction detection for gamma-ray imaging", Nuclear Instruments & Methods in Physics research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated equipment, 11.03.2009, vol. 600, nº 3, páginas 624-634	
D03	Gao W et al. "A Low-noise front-end readout chip integrated with a high-resolution TDC for APD-based small-animal PET, 2009 1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their applications, IEEE, Piscataway,NJ,USA, páginas 1-6	
D04	Mbow N A et al. "A Full-Custom Mixed-Signal CMOS Front-End Readout Chip for High Efficiency Small Animal PET Imaging", Electronics, Circuits and Systems, 2007, IEEE, Piscataway,NJ,USA, páginas 475 – 478	
D05	Kishishita T et al. "Development of a low-noise, two dimensional amplifier array", Nuclear Instruments & Methods in Physics research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated equipment, 11.01.2009, vol. 598, nº 2, páginas 591 – 597	
D06	Lerche C W et al. Maximum likelihood positioning for gamma-ray imaging detectors with depth of interaction measurement", Nuclear Instruments & Methods in Physics research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated equipment, 01.06.2009, vol. 604, nº 1-2, páginas 359 – 362	
D07	DE 102005015017 A1 (National Health Research Institutes, Zhunan, Miaoli, TW) 08.12.2005Todo el documento	
D08	EP 1617237 A1 (CSIC) 18.01.2006Todo el documento	
D09	WO 2004008177 A1 (Europ Organisation for Nuclear et al.) 22.01.2004Todo el documento	

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**

Los documentos citados D01 - D09 reflejan diferentes aspectos del estado de la técnica pero, en opinión de esta Administración, no afectan ni a la novedad ni a la actividad inventiva de la solicitud en estudio según lo especificado en los artículos 6 y 8 de la Ley de Patentes.