(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 445 116**

(51) Int. Cl.:

H03M 13/11 (2006.01)
H03M 13/19 (2006.01)
H03M 13/37 (2006.01)
H03M 13/47 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.06.2003** **E 10013228 (1)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.12.2013** **EP 2278720**

(54) Título: **Descodificación de códigos de reacción en cadena por inactivación**

(30) Prioridad:

11.06.2002 US 388129 P

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
28.02.2014

(73) Titular/es:

DIGITAL FOUNTAIN, INC. (100.0%)
5775 Morehouse Drive
San Diego, CA 92121, US

(72) Inventor/es:

SHOKROLLAHI, M. AMIN;
LASSEN, SOREN y
KARP, RICHARD

(74) Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 445 116 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

Descodificación de códigos de reacción en cadena por inactivación

Referencia cruzada a solicitud relacionada

La presente solicitud reivindica el beneficio de la Solicitud Provisional Estadounidense Nº 60 / 388.129, titulada "Descodificación de códigos de reacción en cadena mediante la inactivación", presentada el 11 de junio de 2002, cuyo contenido se incorpora a la presente memoria por referencia, en su totalidad, para todo fin.

Antecedentes de la invención

La presente invención se refiere a sistemas y procedimientos para descodificar datos y, más específicamente, a sistemas y procedimientos para descodificar códigos aditivos de información y códigos aditivos de información de múltiples etapas, mencionados en la presente memoria colectivamente como "códigos de reacción en cadena".

Los códigos de reacción en cadena han sido descritos previamente en las patentes del cesionario, tales como la Patente Estadounidense Nº 6.307.487, titulada "Generador y descodificador de códigos aditivos de información para sistemas de comunicación" (en adelante en la presente memoria, "Luby I") y la Solicitud de Patente Estadounidense Nº 10 / 032.156 (número de publicación US 2003 / 058958 A1, publicada el 27 de marzo de 2003 y patentada como US 7.068.729 B1), titulada "Generador y descodificador de código de múltiples etapas para sistemas de comunicación" (en adelante en la presente memoria, "Raptor"). Según lo descrito en la presente memoria, la descodificación por reacción en cadena es una forma única de corrección anticipada de errores que permite la reconstrucción de datos a partir de un conjunto de datos recibidos de un tamaño dado, sin considerar los paquetes de datos específicos recibidos. Los sistemas de comunicación que emplean códigos de reacción en cadena son capaces de comunicar información mucho más eficazmente, en comparación con los códigos tradicionales de FEC transmitidos mediante un carrusel de datos o protocolos basados en acuses de recibo, tales como los descritos en Luby I o Raptor.

La Fig. 1 ilustra un proceso ejemplar de codificación de datos usando códigos de reacción en cadena, en el cual un símbolo 170 de salida es generado a partir de varios símbolos de entrada. Los símbolos de entrada son indicados como 110(a) a 110(f). En algunas realizaciones la primera etapa del proceso de codificación es la codificación estática, según lo descrito en Raptor. Esta etapa puede producir los símbolos de origen, indicados como 120(a) a 120(f), y 160(a) a 160(c). En algunas realizaciones, la codificación estática puede ser sistemática, de modo que los valores de los símbolos 120(a) a 120(f) de origen sean iguales a los de 110(a) a 110(f). En algunas realizaciones, puede no haber ninguna codificación estática, en cuyo caso los símbolos de entrada coinciden con los símbolos de origen.

Una vez que los símbolos de origen han sido creados, los símbolos de salida son generados a partir de los símbolos de origen. En adelante en la presente memoria, un símbolo de salida y un símbolo de entrada son descritos como "asociados" si el valor del símbolo de entrada es usado para obtener el valor del símbolo de salida. La operación matemática que define esta asociación puede ser cualquier operación específica y, en una realización, el valor del símbolo de salida es el resultado de la operación lógica XOR de los valores de algunos de los símbolos de origen. Para cada símbolo de salida, el generador 140 de claves produce una clave, a partir de la cual el peso del símbolo de salida es determinado desde una tabla 150 de pesos. Una vez que el peso W está determinado, se escogen W símbolos de origen aleatorios, o seudo-aleatorios, y el valor del símbolo de salida es calculado como XOR de los valores de estos símbolos de origen. Por ejemplo, en la Figura 1, el peso del símbolo 170 de salida es igual a 3 y su valor está determinado como el XOR de los símbolos 120(a), 120(d) y 160(b) de origen. De manera correspondiente, el símbolo 170 de salida está asociado a los símbolos 120(a), 120(d) y 160(b) de origen. En adelante en la presente memoria, el término "grado" es usado como sinónimo de "peso".

La Fig. 2A ilustra un gráfico de descodificación usado en la descodificación de un código de reacción en cadena. Este gráfico de descodificación consiste en dos conjuntos de símbolos, los símbolos 220 (a) a (i) de origen y los símbolos 230 (a) a (l) de salida. Un símbolo de salida está conectado con un símbolo de origen si los símbolos de origen y de salida están "asociados", según lo descrito anteriormente.

La Fig. 2B ilustra una matriz de descodificación correspondiente al gráfico de descodificación de la Fig. 2A, que es útil en el proceso de descodificación. La matriz 200 de descodificación tiene tantas filas como símbolos de salida haya, tantas columnas como símbolos de origen haya, y está poblada con entradas "0" y "1". Un "1" se coloca en la posición (k, j) de la matriz de descodificación si el j-ésimo símbolo de origen está asociado al k-ésimo símbolo de salida.

En un típico proceso de descodificación por reacción en cadena, la descodificación comienza identificando un símbolo O_1 de salida asociado a un único símbolo de origen. El término "símbolo de salida de grado uno" se refiere al precitado símbolo de salida asociado a solamente un símbolo de origen. De manera similar, un símbolo de salida asociado a dos símbolos de origen sería denominado un símbolo de salida de "grado dos". Los símbolos de origen son denominados de manera similar, correspondiente al número de símbolos de salida a los cuales está asociado cada símbolo de origen.

Una vez que está identificado el símbolo O_1 de salida de grado uno, el símbolo de origen asociado de O_1 es recuperado y es eliminado del gráfico de descodificación. El proceso continúa identificando otro símbolo O_2 de salida de grado uno. Por ejemplo, en la situación ilustrada en la Fig. 2, O_1 podría ser el símbolo de salida indicado como 230(a). Una vez que su símbolo 220(b) de origen asociado es eliminado del Gráfico de Descodificación, hay tres símbolos de salida de grado uno, a saber, 230(c), 230(d) y 230(k).

El proceso continúa hasta que todos los símbolos de origen estén recuperados, o hasta que no haya ningún símbolo de salida de grado uno. Por ejemplo, en la situación de la Fig. 2, la siguiente secuencia de símbolos de salida es escogida para recuperar los correspondientes símbolos de origen:

Símbolo de salida	Símbolo de origen recuperado
230(a)	220(b)
230(c)	220(e)
230(h)	220(h)
230(d)	220(i)
230(i)	220(d)
230(b)	220(a)
230(j)	220(f)
230(g)	220(g)
230(e)	220(c)

En este caso, la descodificación es exitosa.

El precedente proceso de descodificación por reacción en cadena encuentra dificultades cuando no se halla ningún símbolo de salida de grado uno. En algunos casos, el proceso de descodificación puede detenerse prematuramente y el descodificador puede indicar un error. Alternativamente, el descodificador puede usar otros algoritmos más complejos, como la eliminación Gaussiana, para completar la descodificación, si es posible. Sin embargo, el tiempo de ejecución de la eliminación Gaussiana puede ser prohibitivamente largo para aplicaciones donde se desea una descodificación rápida, especialmente cuando el número de símbolos de entrada no recuperados, en el momento en que no se hallan más símbolos de salida de grado uno, es grande. Esto llevaría a un algoritmo de descodificación cuyo sobregasto de cálculo es significativamente mayor que el de un descodificador por reacción en cadena, y puede por tanto ser indeseable en ciertas aplicaciones.

Por esta razón, el diseño de sistemas de codificación por reacción en cadena se hace usualmente de manera que garantice que el descodificador no se detenga prematuramente. Este requisito puede imponer condiciones más restrictivas en el diseño del código que las que pueden ser posibles usando un descodificador más complejo. Por ejemplo, puede imponer que el grado medio de un símbolo de salida sea mayor que en otros casos y de ese modo puede llevar a una reducción en las prestaciones del codificador y del descodificador. Más generalmente, este procedimiento de descodificación fuerza que el diseño de la tabla de pesos sea de tal forma como para garantizar el éxito del precitado algoritmo de descodificación con alta probabilidad, y por ello puede imponer restricciones sobre el conjunto de posibles tablas de pesos.

Lo que se necesita, por lo tanto, es un nuevo algoritmo de descodificación que ofrezca ventajas de cálculo similares a las del descodificador por reacción en cadena, y que sea capaz de continuar descodificando incluso si no se halla ningún símbolo de salida de grado uno en alguna etapa de la descodificación.

Sumario

La presente invención proporciona procedimientos y descodificadores para descodificar un código de reacción en cadena, incluso cuando no se halla ningún símbolo de salida de grado uno en el código. Esto se logra seleccionando un símbolo de origen que esté asociado a un símbolo de salida de grado dos o superior (es decir, un símbolo de salida que esté asociado a dos o más símbolos de entrada). El símbolo de origen asociado al símbolo de salida de grado dos o superior es desactivado luego en un intento de producir un símbolo de salida de grado uno. El símbolo de origen desactivado es recuperado resolviendo un sistema de ecuaciones que representan el código de reacción en cadena. El proceso de

inactivación puede ser repetido, bien sucesivamente hasta que sea identificado un símbolo de salida de grado uno, y / o bien toda vez que el proceso de descodificación sea incapaz de localizar un símbolo de salida de grado uno.

Breve descripción de los dibujos

La Fig. 1 ilustra un proceso ejemplar de codificación de datos usando códigos de reacción en cadena.

La Fig. 2A ilustra un proceso ejemplar para descodificar símbolos de salida codificados por reacción en cadena.

La Fig. 2B ilustra una matriz de descodificación correspondiente al gráfico de descodificación de la Fig. 2A.

La Fig. 3 ilustra un panorama de los procesos usados para descodificar códigos de reacción en cadena, de acuerdo a una realización de la presente invención.

La Fig. 4A ilustra una primera realización del proceso de arranque mostrado en la Fig. 3.

La Fig. 4B ilustra una segunda realización del proceso 310 de arranque mostrado en la Fig. 3.

La Fig. 5 ilustra una primera realización del proceso de selección y desactivación de símbolos de origen mostrado en la Fig. 3.

La Fig. 6 ilustra una realización del proceso de recuperación de símbolos de origen mostrado en la Fig. 3.

La Fig. 7A ilustra una segunda realización del proceso de selección de símbolos de origen mostrado en la Fig. 3.

La Fig. 7B ilustra un gráfico de descodificación para una cadena de grado 2, de acuerdo a una realización de la presente invención.

La Fig. 8A ilustra una matriz de descodificación modificada, de acuerdo a la presente invención.

La Fig. 8B ilustra el proceso de aplicar la eliminación Gaussiana a la matriz de descodificación, de acuerdo a una realización de la presente invención.

Las Figs. 9A y 9B ilustran un ejemplo de descodificación por inactivación, usando gráficos de descodificación y matrices, de acuerdo a una realización de la presente invención.

La Fig. 10A ilustra un gráfico modificado de descodificación, útil en la descodificación de un código de reacción en cadena de múltiples etapas, de acuerdo a una realización de la presente invención.

La Fig. 10B ilustra una matriz modificada de descodificación correspondiente al gráfico 10A modificado de descodificación.

La Fig. 11A ilustra un sistema ejemplar de ordenador operable para ejecutar códigos de instrucción correspondientes a procesos de los procedimientos descritos, de acuerdo a la presente invención.

La Fig. 11B ilustra un diagrama simplificado de bloques de sistema del sistema ejemplar de ordenador usado para ejecutar códigos de instrucción correspondientes a los procedimientos descritos, de acuerdo a la presente invención.

Las Figs. 12A a 12B muestran gráficos que describen varios miles de simulaciones por ordenador del descodificador por inactivación para diversos valores del número N de símbolos de entrada.

Para mayor claridad y conveniencia, las características y componentes que están identificados en dibujos anteriores retienen sus números de referencia en los dibujos siguientes.

Descripción detallada de algunas realizaciones ejemplares

Los siguientes términos son usados en toda la extensión de la solicitud y están concebidos para tener el significado indicado:

El término “activo” se refiere a un posible estado de un símbolo de origen. El estado activo de un símbolo de origen no es permanente, y el estado activo de un símbolo de origen puede cambiar, bien a un estado “inactivo”, un “estado recuperable”, o bien un estado “recuperado”, según son definidos más adelante estos términos.

Los términos “desactivado” o “inactivo” se refieren a otro estado de un símbolo de origen. El estado de un símbolo de origen desactivado no es necesariamente permanente, y un símbolo de origen inactivo puede ser reactivado en procesos según la presente invención.

El término “recuperable” se refiere a otro estado más de un símbolo de origen, que indica que el valor del símbolo de origen puede ser recuperado si son recuperados los valores de algunos otros símbolos de origen. En una realización específica de la invención, un símbolo de origen puede tornarse “recuperable” mediante la inactivación de uno o más símbolos de origen.

El término “símbolo de origen recuperado” se refiere a un símbolo de origen cuyos valores han sido determinados. El valor de un símbolo de origen puede ser determinado, ya sea directamente, p. ej., a partir del valor de un símbolo de salida, el cual está unívocamente asociado al mismo, o bien indirectamente, p. ej., a partir del valor de un símbolo de origen desactivado.

La Fig. 3 ilustra un panorama de los procesos usados para descodificar códigos de reacción en cadena, de acuerdo a una realización de la presente invención. Los procesos incluidos en la rutina ejemplar 300 de descodificación incluyen un proceso 310 de arranque, un proceso 320 de selección y desactivación de símbolos de origen y un proceso 330 de recuperación de valores de símbolos de origen.

La Fig. 4A ilustra una primera realización del proceso 310 de arranque ilustrado en la Fig. 3. Inicialmente, en 311 se toma una determinación en cuanto a si están o no presentes algunos símbolos de salida de grado uno. Si es así, el símbolo de origen asociado a ese símbolo de salida es recuperado en 312. El proceso vuelve luego a 311, donde se toma una determinación subsiguiente en cuanto a si permanecen o no algunos otros símbolos de salida de grado uno en el código. Si en 311 no queda ningún símbolo de salida de grado uno, el proceso avanza al proceso 320 de selección y desactivación de símbolos de origen, descrito adicionalmente más adelante.

La Fig. 4B ilustra una segunda realización del proceso 310 de arranque ilustrado en la Fig. 3. En esta realización, un símbolo de salida de grado uno es identificado en 315. Posteriormente, en 316, es recuperado el símbolo de origen asociado al símbolo de salida identificado. Luego, en 317, se toma una determinación en cuanto a si queda o no algún otro símbolo de salida de grado uno. Si es así, el proceso vuelve a 316, donde es recuperado el símbolo de origen asociado. Si no es así, el proceso avanza a los procesos de selección y desactivación de símbolos de origen descritos más adelante.

En una realización de la invención, la recuperación de los símbolos de origen descritos en 310 ocurre temporalmente antes de la recuperación de símbolos de origen desactivados y recuperables, mencionados en 320. Sin embargo, la invención no está limitada a ello, y la recuperación de los símbolos de origen identificados en 310 puede ocurrir de manera esencialmente concurrente con la recuperación de los símbolos de origen, desactivados y recuperables, en el proceso 330, en realizaciones alternativas de la presente invención.

La Fig. 5 ilustra una primera realización del proceso 320 de selección y desactivación de símbolos de origen, ilustrado en la Fig. 3. Inicialmente, en 321, es seleccionado un símbolo de origen activo que esté asociado a un símbolo de salida de grado dos o más (es decir, un símbolo de salida asociado a dos o más símbolos de origen). La manera por la cual un símbolo de origen específico es seleccionado entre un cierto número de símbolos de origen similares es descrita en mayor detalle más adelante. Luego, en 322, el símbolo de origen específico seleccionado es desactivado. Posteriormente, en 323, se toma una determinación en cuanto a si existen o no algunos símbolos de salida de grado uno, para su descodificación. En algunas realizaciones, la desactivación precedente producirá uno o más símbolos de salida de grado uno. En otras realizaciones, la desactivación precedente no dará como resultado un símbolo de salida de grado uno. En este último caso, el proceso repite el proceso de 321 a 323, según se describe más adelante.

Si el proceso de desactivación de 322 da como resultado la producción de uno o más símbolos de salida de grado uno, el proceso continúa en 324, donde el símbolo de origen asociado a un símbolo de salida de grado uno es declarado como recuperable. El proceso vuelve entonces a 323, donde se toma una determinación en cuanto a si quedan o no algunos símbolos de salida adicionales de grado uno. Los procesos de 323 y 324 son repetidos hasta que todos los símbolos de salida de grado uno producidos por el precedente proceso de desactivación sean declarados como recuperables.

Si la desactivación del símbolo de origen seleccionado en 322 no da como resultado un símbolo de salida de grado uno, o bien, una vez que todos los símbolos de origen asociados a un símbolo de salida de grado uno son declarados como recuperables en 324, el proceso continúa desde 323 a 325, donde se toma una determinación en cuanto a si quedan o no algunos símbolos de origen asociados a símbolos de salida de grado dos o más. Si es así, el proceso vuelve a 321, donde otro símbolo de origen activo, asociado a un símbolo de salida de grado dos o más, es seleccionado y desactivado, y se comprueba la presencia de símbolos de salida de grado uno. Una o más iteraciones de los procesos pueden ocurrir, por ejemplo, allí donde la desactivación de un primer símbolo de origen, asociado a un símbolo de salida de grado dos o más, no dé como resultado un símbolo de salida de grado uno, pero queden símbolos de origen adicionales asociados a un símbolo de salida de grado dos (o más). En este caso, la subsiguiente desactivación de otro símbolo de origen asociado a un símbolo de salida de grado dos (o más) puede producir uno o más símbolos de salida de grado uno. El proceso se repite hasta que todos los símbolos de origen hayan sido recuperados (mediante el proceso 310 de arranque), desactivados (mediante 322) o declarados como recuperables (mediante 325), punto en el cual el proceso avanza al

proceso 330 de recuperación de valores de símbolos de origen.

La Fig. 6 ilustra una realización del proceso 330 de recuperación de símbolos de origen ilustrado en la Fig. 3. Inicialmente, en 332, son recuperados los valores de uno o más símbolos de origen desactivados en 322. En una realización específica, por ejemplo, en la cual es usada la eliminación Gaussiana en el proceso de descodificación, todos los valores de símbolos de origen desactivados son recuperados en este proceso. Posteriormente, en 334, los valores de uno o más símbolos de origen, declarados como recuperables en el proceso 325, son determinados usando los valores recuperados de los símbolos de origen desactivados. En una implementación, tal como la precitada, en la cual se usa la eliminación Gaussiana, los valores de todos los símbolos de origen recuperables son determinados en este proceso. En realizaciones alternativas de 332 y 334, son determinados los valores de uno o más de, pero no todos, los símbolos de origen recuperables. Esto puede ser ventajoso cuando, por razones de necesidad, oportunidad, coste, etc., una descodificación completa del código de reacción en cadena no es requerida o posible. Los procesos de 332 y 334 están adicionalmente ilustrados en una realización específica más adelante.

La Fig. 7A ilustra una segunda realización del proceso 321 de selección de símbolos de origen, por la cual un símbolo de origen activo, asociado a un símbolo de salida de grado al menos dos, es seleccionado para su desactivación. Inicialmente, en 702, es identificado un símbolo de origen activo asociado a un símbolo de salida de grado dos o más. Luego, en 704, se toma una determinación en cuanto al número de símbolos de origen que son potencialmente recuperables (es decir, símbolos de origen que pueden tornarse recuperables sin inactivación adicional de símbolos de origen) si fuera desactivado el símbolo de origen identificado. Luego, en 706, se hace una comparación entre el número de símbolos de origen potencialmente recuperables y un número predefinido, por lo cual, si el número de símbolos de origen potencialmente recuperables supera el número predefinido, el símbolo de origen identificado es seleccionado para su desactivación en 322. Si el número de símbolos de origen potencialmente recuperables no iguala o supera el número predefinido, entonces el proceso vuelve a 702, donde es identificado otro símbolo de origen asociado a un símbolo de salida de grado dos o más.

Los expertos en la tecnología apreciarán que pueden ser usados otros criterios de selección para seleccionar símbolos de origen a fin de obtener el mayor número de símbolos de salida de grado uno. Por ejemplo, en un proceso, el símbolo de origen asociado al mayor número de símbolos de salida es seleccionado para su desactivación. En otra realización, un símbolo de origen es seleccionado aleatoriamente entre un grupo de aquellos símbolos de origen asociados a dos o más símbolos de salida. En otra realización adicional más, es identificado un símbolo de salida que está asociado a un número predeterminado de símbolos de origen, p. ej., el mínimo. Posteriormente, todos los símbolos de origen, menos uno, son seleccionados para su desactivación.

En otra realización del proceso de selección de símbolos de origen, puede ser recuperada una cadena de símbolos de origen. En este proceso, ha de ser identificado un símbolo de salida de grado dos, de modo tal que uno de sus símbolos de origen asociados esté asociado a su vez a un segundo símbolo de salida de grado dos, y tal que uno de sus símbolos de origen asociados esté asociado a su vez a un tercer símbolo de salida de grado dos, y así sucesivamente. Tal cadena de símbolos de salida se llamará una cadena de grado dos en adelante en la presente memoria.

La Fig. 7B ilustra un gráfico de descodificación de una cadena de grado dos, de acuerdo a una realización de la presente invención. Los símbolos de salida que participan en una posible cadena de grado 2 son 720(a), 720(c), 720(d), 720(e) y 720(h). La desactivación, por ejemplo, del símbolo 710(a) de origen reduce el grado del símbolo 720(c) de salida a uno, lo que hace recuperable al símbolo 710(f) de origen, lo que a su vez reduce a uno el grado del símbolo 720(e) de salida. Esto hace recuperable al símbolo 710(b) de origen, lo que reduce a uno los grados de 720(a) y 720(d), y estos hacen recuperables a 710(g) y 710(e). Como puede verse, si el número de símbolos de salida en una tal cadena es k, y si cualquiera de los símbolos de origen asociados de cualquiera de los símbolos de salida en una tal cadena es desactivado, entonces la existencia de un símbolo de salida de grado uno está garantizada para k etapas consecutivas de descodificación por inactivación. Este proceso puede incluir adicionalmente identificar un símbolo de salida de grado dos que lleve a una cadena de grado 2 de longitud máxima, y desactivar un símbolo de origen asociado al símbolo de salida identificado.

Cualquiera de los procesos de selección de símbolos de origen puede incluir adicionalmente un “proceso de retroceso”, por el cual es reactivado el símbolo de origen desactivado, y otro símbolo de origen es seleccionado para su desactivación, de acuerdo a los procedimientos presentados en la presente memoria. La invención no está limitada a los procesos ejemplares por los cuales un símbolo de origen es seleccionado para su desactivación, y puede ser usado en la presente invención cualquier procedimiento en el cual sea seleccionado un símbolo de origen asociado a dos o más símbolos de salida.

Como se ha explicado anteriormente con referencia a la Fig. 2B, una matriz de descodificación es útil en la descodificación de códigos de reacción en cadena. Con referencia específica al proceso de descodificación que usa la inactivación, la matriz 200 de descodificación de la Fig. 2B puede ser modificada para asimilar la inclusión de símbolos de origen inactivos. Específicamente, allí donde la secuencia de índices de símbolos de origen inactivos, durante el proceso

de descodificación, es la secuencia i_1, i_2, ..., i_n, y el número de símbolos de origen es K, entonces la descodificación por inactivación produce las matrices P y Q de permutación, donde Q intercambia las columnas i_1 y K-n+1, i_2 y K-n+2, ..., e i_n y K, y de modo que P ● M ● Q tenga la forma dada en la Figura 8B. La matriz de descodificación modificada mostrada en la Fig. 8A consiste en una matriz triangular inferior L, y submatrices A, B y C. Las columnas de la submatriz A corresponden a los símbolos de origen inactivos. La tarea del descodificador es resolver el sistema de K' ecuaciones lineales con K incógnitas x_1, ..., x_K, dado por

$$\mathbf{P \bullet M \bullet Q \bullet (Q^{-1} \bullet x) = P \bullet b,}$$

en la que x es el vector columna (x_1, ..., x_K) y b es el vector que consiste en los valores de los K' símbolos de salida recibidos. En la práctica, las matrices P y Q pueden no ser almacenadas como matrices completas, sino como permutaciones calculadas rastreando el proceso de la Descodificación por Inactivación. Esta forma requiere usualmente mucha menos memoria que el almacenamiento de una matriz completa. Como puede ser apreciado por los expertos en la tecnología, el proceso de recuperación no depende de la permutación específica de las columnas de la matriz de descodificación ilustrada, y pueden ser usadas otras permutaciones de columnas en realizaciones alternativas según la presente invención.

De las muchas formas posibles para calcular la solución x del sistema de ecuaciones dado anteriormente, ilustraremos en lo siguiente una posibilidad. Esto se ofrece solamente con fines descriptivos, y no está concebido para limitar el alcance de la presente invención.

Para la descripción del núcleo del algoritmo, es ventajoso indicar el vector Q^{-1} ● x como y, y redefinir la tarea de descodificar como la tarea de calcular el vector y. Una vez que y está calculado, x puede ser calculado eficazmente como la permutación de y descrita por Q. Además, la matriz P ● M ● Q se indica como N; el vector P ● b se indica como c, es decir, c es la permutación de b descrita por P, que es nuevamente de cálculo eficaz. La tarea es entonces calcular el vector y que satisface N ● y = c, en la que N tiene la forma dada en la Fig. 8A.

Para resolver este sistema, la eliminación Gaussiana puede ser aplicada a la matriz N. Las filas de la submatriz B son eliminadas por las filas de la matriz triangular inferior L. La misma transformación es aplicada al vector c. Esta acción transforma la matriz B en la matriz que consiste en ceros, y la matriz C es transformada en una matriz D distinta, obtenida aplicando las mismas etapas de eliminación a las matrices A y C. Esta transformación se muestra en la Figura 8B. Suponiendo que han sido desactivados n símbolos de origen, y que hay K símbolos de origen y K' símbolos de salida, la submatriz L tiene (K-n) filas y (K-n) columnas, la matriz A tiene (K-n) filas y n columnas, y la matriz D tiene (K'-K+n) filas y n columnas. Las submatrices L y A en la matriz transformada son las mismas que las correspondientes submatrices en la matriz N. El vector b también está transformado en otro vector f con dos componentes: el vector d dado en 870, que consiste en los primeros K-n componentes de f, y el vector e en 875, que consiste en los componentes restantes de f. De manera correspondiente, el vector desconocido y en 820 es subdividido en dos subvectores. El vector u consiste en las primeras K-n entradas de y, y el vector z consiste en las restantes n entradas.

Esta eliminación transforma el sistema original de ecuaciones en dos sistemas distintos: el sistema dado por D ● z = e y el sistema L ● u + A ● z = d. Los valores del vector desconocido z corresponden a los valores de los símbolos de origen correspondientes a los símbolos de origen inactivados. Una vez que estos valores son hallados a partir del conjunto de ecuaciones D ● z = e, los valores restantes dados por u pueden ser hallados de una gran variedad de formas. En algunas realizaciones de la presente invención, estos valores pueden ser hallados multiplicando la matriz A por z, efectuando la operación lógica XOR del vector resultante con d para obtener un vector g, y resolviendo el sistema de ecuaciones L ● u = g. En algunas realizaciones, este último sistema puede ser resuelto usando un descodificador por reacción en cadena. En otras realizaciones adicionales, el valor de cada símbolo de origen, correspondiente a un símbolo de origen inactivo, es sometido a una operación XOR con los valores de los símbolos de salida correspondientes a los símbolos de salida vecinos, asociados a dicho símbolo de origen, y el símbolo de origen inactivo es eliminado del correspondiente gráfico de descodificación (no mostrado). Esto produce un nuevo gráfico restringido de descodificación, con todos los símbolos de origen inactivos eliminados. Luego puede ser aplicada una descodificación normal por reacción en cadena al Gráfico de Descodificación restringido, para recuperar los otros símbolos de origen.

El sistema de ecuaciones D ● z = e puede ser resuelto de una gran variedad de formas. En algunas realizaciones, este sistema puede ser resuelto usando el algoritmo de eliminación Gaussiana. En otras realizaciones, la descodificación por inactivación puede ser aplicada recursivamente para obtener los valores desconocidos de los símbolos de origen inactivos. También pueden ser aplicados otros procedimientos para resolver sistemas de ecuaciones lineales.

En algunas realizaciones del descodificador por inactivación, el proceso de descodificación puede comenzar antes de que todos los símbolos de salida hayan sido introducidos en el gráfico de descodificación. En estas realizaciones, toda vez que el gráfico de descodificación no tiene más símbolos de salida de grado uno, y tiene al menos un símbolo de origen activo, las estrategias descritas anteriormente pueden ser empleadas para determinar si se inactiva un símbolo de origen o si se introduce otro símbolo de salida en el Gráfico de Descodificación, si existe un tal símbolo de salida. En los casos donde el

proceso de descodificación comienza antes de que todos los símbolos de salida hayan sido recogidos, la creación de la matriz de descodificación, y el proceso de eliminación para la matriz de descodificación, pueden tener lugar de manera esencialmente concurrente con el proceso de recepción, efectuándose una o más etapas del proceso de eliminación con la recepción de cada nuevo símbolo de salida. Alternativamente, más de un símbolo de salida podría ser recogido a la vez, y la descodificación podría avanzar hasta que todos dichos símbolos de salida estén procesados; si no todos los símbolos de origen son recuperados en este punto, otro conjunto de símbolos de salida podría ser solicitado y procesado, hasta que todos los símbolos de origen hayan sido recuperados.

Las Figs. 9A y 9B ilustran un ejemplo de descodificación por inactivación que usa los precitados gráficos y matrices de descodificación, según una realización de la presente invención. El gráfico de descodificación original de la Fig. 9A contiene seis símbolos de origen indicados como 910(a) a 910(f), y siete símbolos de salida indicados como 920(a) a 920(g). Como puede verse, la descodificación convencional por reacción en cadena ni siquiera puede comenzar en este gráfico, ya que no hay ningún símbolo de salida de grado uno. Desactivando el símbolo 910(f) de origen, la descodificación por reacción en cadena puede comenzar, y en cada etapa se halla un símbolo de salida de grado uno.

La Fig. 9B ilustra la permutación que ocurre dentro de la matriz de descodificación como resultado del proceso de inactivación. La desactivación del símbolo 910(f) da como resultado la desactivación de la última columna de la matriz. Las columnas restantes pueden luego ser transformadas en una forma triangular inferior. La secuencia de círculos y flechas indica el orden en el cual han de ser permutadas las filas y columnas, observando que una posición a la que apunta la k-ésima flecha debe ser permutada con la posición (k, k) de la nueva matriz triangular inferior. Por ejemplo, las permutaciones deben ser hechas en un orden tal que la posición (2,4) se convierta en la posición (1,1), la posición (1,1) se convierta en la posición (2,2), la posición (3,5) se convierta en la posición (3,3), etc.

La Fig. 10A ilustra un gráfico 1000 de descodificación modificado, útil en la descodificación de un código de reacción en cadena de múltiples etapas, tal como el descrito en Raptor. El gráfico 1000 incluye una pluralidad de símbolos 1020(a) a (f) de origen y símbolos 1050 de salida de múltiples etapas, que incluyen colectivamente los símbolos 1052(a) a (g) de salida anteriormente descritos, y los símbolos 1055(a) a (d) de comprobación. Los símbolos 1052 de salida son según lo anteriormente descrito, estando cada uno asociado a uno o más símbolos de origen. Cada uno de los símbolos 1055 de comprobación también está asociado a uno o más símbolos de origen, y describe la relación matemática entre dos o más símbolos de origen. Por ejemplo, el símbolo 1055(a) significa que la operación XOR de los valores de los símbolos de origen, correspondientes a los símbolos 1020(a), 1020(b), 1020(e) y 1020(f) de origen, es cero. La interrelación entre símbolos de origen puede ser impartida por un proceso de codificación estática, tal como un código de control de paridad de baja densidad, y similares.

Como ejemplo específico, donde se usa un código de control de paridad de baja densidad para el proceso de codificación estática, luego un cierto número de símbolos de salida de múltiples etapas, igual al número de símbolos de comprobación en este código, puede ser añadido al gráfico de descodificación, fijado su valor en 0, y el gráfico de descodificación puede ser aumentado por el gráfico del código de control de paridad de baja densidad, entre los símbolos de origen y los símbolos de comprobación, y el gráfico de descodificación puede ser reemplazado por el nuevo gráfico. La elección de códigos de control de paridad de baja densidad no es esencial para esta solicitud. En general, para cualquier tipo de codificación estática, la correspondiente matriz de control de paridad define un gráfico bipartito por el cual puede ser aumentado el gráfico de descodificación.

La Fig. 10B ilustra una matriz 1070 de descodificación modificada que corresponde al gráfico 10A de descodificación modificado. La matriz 1070 de descodificación modificada está poblada con ceros y unos, y tiene tantas columnas como símbolos de origen haya, y tantas filas como el número conjunto de símbolos de salida y símbolos de comprobación. De manera correspondiente, la matriz 1070 de descodificación modificada consiste en dos conjuntos de filas, uno correspondiente a los símbolos de salida, y uno correspondiente a los símbolos de comprobación. Allí donde hay K' símbolos de salida, C símbolos de comprobación y K símbolos de origen, la matriz de descodificación modificada puede ser descompuesta en una submatriz M_o que consiste en K' filas y K columnas, y una matriz M_e que consiste en C filas y K columnas. Si x_1, ..., x_K indican los valores desconocidos de los símbolos de origen, y b_1, ..., $b_{K'}$ indican los valores conocidos de los símbolos de salida recibidos, la tarea del descodificador puede ser resolver el sistema de ecuaciones dado por $M_o \bullet x = b$, y $M_c \bullet x = 0$. El sistema combinado de ecuaciones sería como el dado en la Fig. 10B.

En algunas realizaciones de esta invención, la descodificación por inactivación puede proceder de la misma manera descrita anteriormente, siendo el gráfico de descodificación de la Fig. 9A reemplazado por el gráfico de descodificación modificado de la Fig. 10A, y la matriz de descodificación de 8B reemplazada por la matriz de descodificación modificada de la Fig. 10B. En otras realizaciones, los distintos símbolos del gráfico 1000 de descodificación modificado pueden recibir distintas prioridades durante las distintas fases de la descodificación. Por ejemplo, la descodificación puede comenzar procesando símbolos de salida solamente, y recurriendo a símbolos de comprobación de grado uno solamente si no queda ningún símbolo de salida de grado uno. En algunas aplicaciones, esto puede llevar a menores recursos de memoria y de cálculo, según los símbolos de comprobación son inyectados en el gráfico de descodificación modificado por criterios básicos de necesidad.

Cada uno de los procedimientos descritos en la presente memoria puede ser puesto en práctica en una multitud de formas distintas (es decir, software, hardware, o una combinación de ambos) y en una gran variedad de sistemas. En una realización, los procedimientos descritos pueden ser implementados como códigos de instrucción almacenados en un disco legible por ordenador, en memoria (volátil o no volátil), o bien residir dentro de un procesador (ordenador, procesador incrustado y similares). Además, un sistema para descodificar un código de reacción en cadena, usando las técnicas de inactivación descritas en la presente memoria, puede comprender un ordenador u otra máquina programable de ese tipo, con una memoria operable para almacenar y / o ejecutar códigos de instrucción correspondientes a los procesos descritos en la presente memoria.

La Fig. 11A ilustra un sistema ejemplar de ordenador operable para ejecutar códigos de instrucción correspondientes a procesos de los procedimientos descritos. El sistema 1110 de ordenador incluye un monitor 1114, una pantalla 1112, un gabinete 1118 y un teclado 1134. Un ratón (no mostrado), un lápiz de luz u otras interfaces de Entrada / Salida, tales como las interfaces de realidad virtual, también pueden ser incluidas para proporcionar comandos de Entrada / Salida. El gabinete 1118 aloja un controlador 1116 para medios extraíbles tales como CD o DVD, y un controlador de disco rígido (no mostrado). El sistema 1110 de ordenador puede incluir controladores y / o interfaces de controlador, operables para registrar o leer datos, código de instrucción y otra información necesaria para ejecutar los procedimientos de la presente invención. El gabinete 1118 también aloja componentes usuales de ordenador (no mostrados), tales como un procesador, memoria y similares.

La Fig. 11B ilustra un diagrama simplificado de bloques de sistema del sistema 1110 ejemplar de ordenador usado para ejecutar códigos de instrucción correspondientes a los procedimientos descritos. Según se muestra en la Fig. 11A, el sistema 1110 de ordenador incluye el monitor 1114 que, optativamente, es interactivo con el controlador 1124 de Entrada / Salida. El sistema 1110 de ordenador incluye adicionalmente subsistemas tales como la memoria 1126 del sistema, el procesador central 1128, el altavoz 1130, el disco extraíble 1136, el teclado 1134, el disco fijo 1137 y la interfaz 1138 de red. Otros sistemas de ordenador adecuados para su uso con los procedimientos descritos pueden incluir subsistemas adicionales, o menos subsistemas. Por ejemplo, otro sistema de ordenador podría incluir un procesador adicional. Las flechas tales como 1140 representan la arquitectura del bus de sistema del sistema 1110 de ordenador. Sin embargo, estas flechas 1140 son ilustrativas de cualquier esquema de interconexión que sirva para enlazar los subsistemas. Por ejemplo, un bus local podría ser utilizado para conectar el procesador central 1128 con la memoria 1126 del sistema. El sistema 1110 de ordenador mostrado en la Fig. 11B no es más que un ejemplo de un sistema de ordenador adecuado para su uso con la presente invención. Otras configuraciones de subsistemas adecuados para su uso con la presente invención serán inmediatamente evidentes para alguien medianamente experto en la tecnología.

En consecuencia, en algunas realizaciones de la presente invención, el mecanismo de descodificación por inactivación es usado para reducir el sobregasto de recepción de la codificación por reacción en cadena cuando el contenido original entero debe ser reconstruido.

En otras realizaciones de la presente invención, el descodificador por inactivación es usado para reducir el grado medio de un símbolo de salida, y reducir por tanto los recursos de cálculo usados para crear símbolos de salida.

Otra propiedad de un sistema de codificación por reacción en cadena que usa un descodificador por inactivación es que puede ser diseñada una tabla de pesos en la cual ninguno de los símbolos de salida pueda ser de grado uno. Esto significa que ninguno de los símbolos de salida de un sistema de codificación de ese tipo contiene el valor de un símbolo de entrada. En algunas realizaciones, esta propiedad puede ser usada para reducir el grado medio de los símbolos de salida, reduciendo por ello la carga de cálculo en el codificador. Además, en algunas aplicaciones, esta propiedad puede ser usada para dar a la transmisión un nivel leve de seguridad ante acceso no autorizado a los datos originales.

Ejemplo de descodificación por inactivación

Una realización de un sistema de codificación por reacción en cadena, según lo revelado en Raptor, está descrita por el número de símbolos de datos, indicado como N, una codificación estática que genera R símbolos de codificación estáticos y un codificador dinámico descrito por una tabla de pesos. En algunas realizaciones también puede ser especificado un sobregasto de recepción que da buenas garantías probabilísticas del éxito del descodificador. En otras realizaciones, los símbolos de salida pueden ser recogidos hasta que sea posible la descodificación completa, y no hay ninguna necesidad de especificar un sobregasto de recepción.

La siguiente tabla describe diversos parámetros para un descodificador ejemplar por inactivación, dando la primera columna la gama para el valor N, dando la segunda información sobre la generación de símbolos de codificación estáticos, dando la tercera la tabla de pesos para la generación de símbolos de codificación dinámicos y, finalmente, dando la cuarta el número de símbolos de codificación estáticos calculados:

1-200	9	1	S0	5% + 130

200-970	9	1	S1	5% + 130
970-1250	9	1	S1	5% + 140
1250-1320	9	1	S1	5% + 130
1320-2100	3	0,5	S1	5% + 110
	5	0,5		
2100-2500	1	2/3	S1	5% + 100
	9	1/3		
2500-4100	1	2/3	S1	5% + 100
	8	1/3		
4100-5000	1	2/3	S1	5% + 100
	7	1/3		
5000-8100	1	2/3	S2	5% + 100
	7	1/3		
8100-16500	1	2/3	S2	5% + 100
	6	1/3		
16500-65536	1	2/3	S2	5% + 100
	5	1/3		
>65536	1	2/3	S2	5% + 100
	4	1/3		

Por ejemplo, la novena fila en la tabla significa que si N está entre 5000 y 8100, entonces el número R de símbolos de codificación estáticos es el entero más pequeño mayor o igual a 0,05*N + 100. En todos los casos, la primera etapa del codificador estático puede usar primero un código de Hamming para codificar los símbolos originales, según lo descrito en Raptor. La segunda etapa puede usar un código de control de paridad de baja densidad. En el ejemplo dado por la novena fila, la matriz de control de paridad de este código consiste en dos submatrices. La primera tiene $\lfloor 2*R/3 \rfloor$ filas y N+R columnas, donde $\lfloor a \rfloor$ indica el mayor entero más pequeño o igual que a. La segunda submatriz tiene $R-\lfloor 2*R/3 \rfloor$ filas y N+R columnas. Cada una de estas submatrices es escogida aleatoriamente, sujeta a la condición de que en la primera matriz cada columna tiene exactamente 1 entrada no nula, y en la segunda matriz cada columna tiene exactamente 7 entradas no nulas.

Las tablas de pesos correspondientes a S0, S1 y S2 están dadas por:

Tabla de pesos para S0

Peso	Probabilidad
7	1

Tabla de pesos para S1

Peso	Probabilidad
1	0,0221538
2	0,492912
3	0,166059
4	0,0768401
5	0,0803003
8	0,0636444
9	0,0353027
19	0,0439408
20	0,0188495

Tabla de pesos para S2

Peso	Probabilidad
1	0,008199
2	0,507871
3	0,171036
4	0,074750
5	0,084950
8	0,057682
9	0,038307
19	0,057200

Los pesos medios de S1 y S2 son 4,254 y 4,154, respectivamente.

Si el sobregasto de recepción está fijado en 5% o 50, el que sea mayor, entonces puede ser demostrado matemáticamente que la probabilidad de fallo en la descodificación por inactivación es menor que 10^{-13}. El ejemplo concreto dado aquí es solamente con fines ilustrativos. Las variaciones de los números efectivos llevan a diseños que están dentro del alcance de esta invención.

Las Figs. 12A a 12B muestran gráficos que describen varios miles de simulaciones de ordenador del descodificador por inactivación, para diversos valores del número N de símbolos de entrada. El eje horizontal indica N, y el eje vertical indica el número de símbolos de origen inactivos en el Gráfico de Descodificación Modificado. Cada punto representa una ronda de simulación. La Figura 10 (a) muestra los resultados para la gama de N entre 1 y 140.000. La Figura 10(b) es la ampliación de la Figura 10(a) para la gama de N entre 1 y 16.000.

Como puede apreciarse, en algunas de las ejecuciones, el número de símbolos de origen inactivos es cero, lo que significa que el descodificador normal por reacción en cadena habría completado la descodificación. Sin embargo, allí donde N está entre 1 y 10.000, en la mayoría de los casos el número de símbolos de origen inactivos es mayor que uno. En estos casos el descodificador normal por reacción en cadena habría fallado. El número de símbolos de origen inactivados es muy frecuentemente cero si el número N de símbolos de origen es mayor que 20.000. En estos casos, el descodificador es especialmente rápido, dando a la vez garantías probabilísticas excepcionalmente buenas para la descodificación exitosa.

La descripción precedente ha sido presentada con fines de ilustración y descripción. No está concebida para ser exhaustiva ni para limitar la invención a la forma exacta revelada y, obviamente, muchas modificaciones y variaciones son posibles a la luz de la revelación anterior. Las realizaciones descritas fueron escogidas a fin de explicar de la mejor manera los principios de la invención y su aplicación práctica, para permitir por ello a otros expertos en la técnica utilizar de la mejor manera la invención en diversas realizaciones y con diversas modificaciones, según se adecuen al uso específico contemplado. Se pretende que el alcance de la invención esté definido por las reivindicaciones adjuntas a la presente descripción.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento (300) de descodificación de una secuencia de símbolos (220, 710, 910) de entrada a partir de símbolos (230, 720, 920) de salida recibidos, transportados en forma codificada por un canal de comunicación, siendo la forma codificada de acuerdo a un código de reacción en cadena, comprendiendo el procedimiento:

almacenar una pluralidad de símbolos de salida recibidos, que han sido transportados por el canal de comunicación, teniendo cada símbolo de salida recibido un grado de uno o más, en donde el grado de un símbolo de salida representa el número de símbolos de entrada a los cuales está asociado un símbolo de salida, y siendo el símbolo de salida un símbolo de salida de código de reacción en cadena, y siendo tal que un símbolo desconocido, entre los símbolos de entrada asociados al símbolo de salida, puede ser recuperado si son conocidos valores de los otros símbolos de entrada asociados al símbolo de salida;

proporcionar almacenamiento para un estado, para símbolos de entrada, en donde el estado para un símbolo de entrada es un valor que puede tener un valor activo o un valor inactivo;

procesar símbolos de salida en un proceso de reacción en cadena, en en el que los símbolos de entrada son recuperados (316) a partir de símbolos de salida de grado uno, y a los símbolos de salida de grado mayor que uno, que están asociados a los símbolos de entrada recuperados, se les reduce su grado en consecuencia, generando por ello símbolos de salida adicionales de grado uno, que pueden ser usados para recuperar símbolos de entrada;

determinar (317, 311) si el proceso de reacción en cadena se atasca por falta de símbolos de salida de grado uno para recuperar símbolos de entrada;

modificar (321, 322) un estado para al menos un símbolo de entrada, desde el valor activo al valor inactivo, cuando el descodificador determina, en la etapa de determinación, que no quedan símbolos de salida de grado uno para la recuperación de símbolos de entrada;

resolver (332) los valores de los símbolos de entrada que tienen un estado igual al valor inactivo, resolviendo un sistema de ecuaciones que representan el código de reacción en cadena; y

usar (334) los valores resueltos para resolver símbolos de entrada adicionales.

2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el cual la resolución de valores de símbolos de entrada inactivados, a partir de símbolos de salida asociados, es realizada usando la eliminación Gaussiana.

3. El procedimiento de la reivindicación 1, en el cual un valor de un símbolo de salida es el resultado de la operación lógica XOR sobre un cierto número de símbolos de entrada, y el número de símbolos de entrada es el grado del símbolo de salida.

4. El procedimiento de la reivindicación 1, en el cual la modificación del estado comprende:

seleccionar (321) un símbolo de entrada activo asociado al mayor número de símbolos de salida; y

modificar (322) un estado del símbolo de entrada activo seleccionado.

5. El procedimiento de la reivindicación 1, en el cual la modificación comprende:

seleccionar (321) un símbolo de entrada activo, de acuerdo a una selección al azar, entre los símbolos de entrada asociados a símbolos de salida de grado dos; y

modificar (322) un estado para el símbolo de entrada seleccionado.

6. El procedimiento de la reivindicación 5, que comprende adicionalmente repetir la modificación (312, 322) del estado, y luego continuar el procesamiento para resolver (332) los valores de los símbolos de entrada que tengan un estado igual al valor inactivo.

7. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende adicionalmente cambiar un estado, para al menos un símbolo de entrada inactivo cualquiera, al valor activo si el número de símbolos de entrada potencialmente recuperables no supera un número predefinido, y cambiar un estado, para otro símbolo de entrada activo, a un valor inactivo.

8. El procedimiento de la reivindicación 1, en el cual la recuperación de los símbolos de entrada inactivados a partir de símbolos de salida asociados comprende recuperar los valores de todos los símbolos de entrada inactivados antes de recuperar símbolos de entrada no inactivados.

9. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, teniendo el código de reacción en cadena una pluralidad

de símbolos de salida de múltiples etapas y dicha pluralidad de símbolos de entrada, siendo dichos símbolos de entrada descodificados a partir de dichos símbolos de salida de múltiples etapas, transportados por dicho canal de comunicación, comprendiendo cada uno de los símbolos de salida de múltiples etapas dicho símbolo de salida, o bien un símbolo de comprobación, en donde un símbolo de comprobación se obtiene por codificación estática de símbolos de entada, en donde cada uno de los símbolos de salida de múltiples etapas está asociado a uno o más símbolos de entrada, siendo denominados los símbolos de salida de múltiples etapas, asociados a uno o más símbolos de entrada, símbolos de salida de múltiples etapas de grado uno o más, en el que al menos un símbolo de salida de múltiples etapas está asociado a al menos dos símbolos de entrada, siendo denominados los símbolos de salida de múltiples etapas, asociados a dos o más símbolos de entrada, símbolos de salida de múltiples etapas de grado dos o más.

10. Un producto de programa de ordenador que comprende un medio de almacenamiento legible por ordenador, que comprende instrucciones para hacer que un ordenador lleve a cabo el procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.

11. Un descodificador (1110) configurado para descodificar símbolos (220, 710, 910) de entrada, según un proceso de descodificación por reacción en cadena, usando los símbolos (230, 720, 920) de salida recibidos, asociados a los símbolos de entrada, en donde el descodificador comprende un procesador que, al ejecutar códigos de instrucción para descodificar los símbolos de entrada, usando los símbolos de salida, realiza operaciones que comprenden:

determinar (317, 311) si el proceso de reacción en cadena se atasca por falta de símbolos de salida de grado uno para recuperar símbolos de entrada;

modificar (321, 322) un estado para al menos un símbolo de entrada, desde el valor activo al valor inactivo, cuando el descodificador determina, en la etapa de determinación, que no quedan símbolos de salida de grado uno para la recuperación de símbolos de entrada;

resolver (332) los valores de los símbolos de entrada que tienen un estado igual al valor inactivo, resolviendo un sistema de ecuaciones que representan el código de reacción en cadena; y

usar (334) los valores resueltos para resolver símbolos de entrada adicionales.

12. El descodificador de la reivindicación 11, en el cual la resolución (332) es realizada por un descodificador por inactivación, configurado para reducir un grado medio asociado a la pluralidad de símbolos de salida.

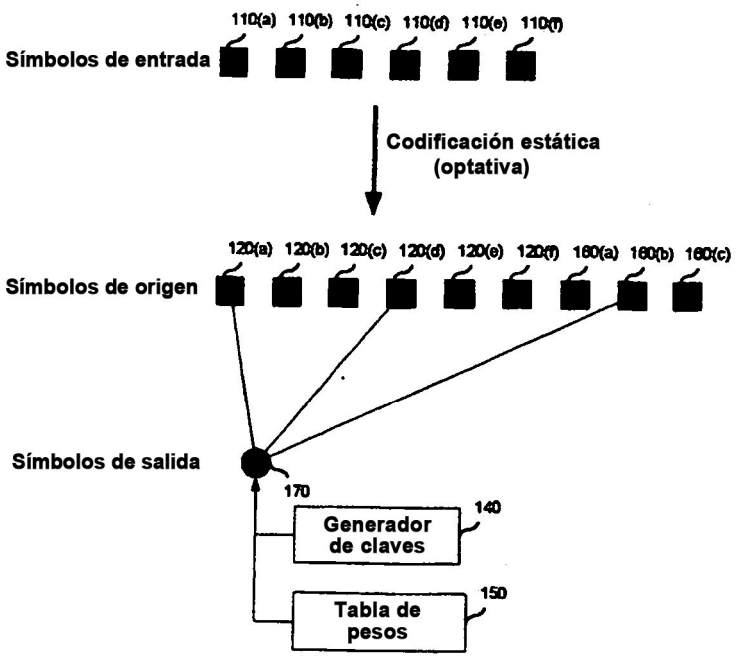
110(a) 110(b) 110(c) 110(d) 110(e) 110(f)
Símbolos de entrada
Codificación estática
(optativa)
120(a) 120(b) 120(c) 120(d) 120(e) 120(f) 160(a) 160(b) 160(c)
Símbolos de origen
Símbolos de salida
170
Generador de claves
140
Tabla de pesos
150

Fig. 1

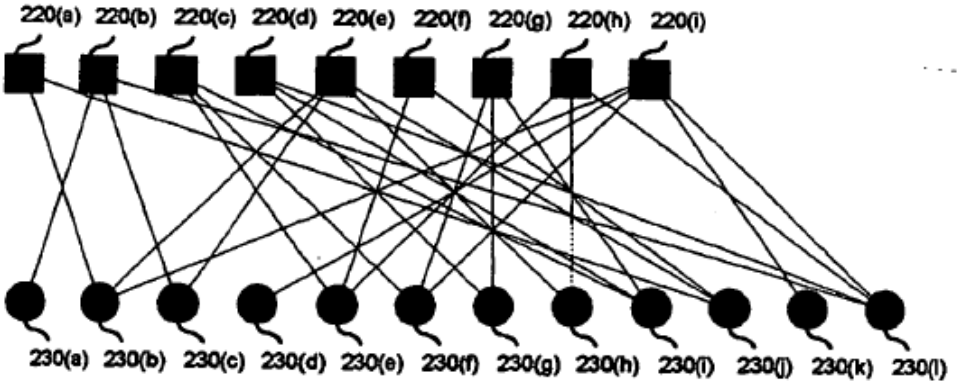

Fig. 2A

200

$$
\begin{bmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1
\end{bmatrix}
$$

Fig. 2B

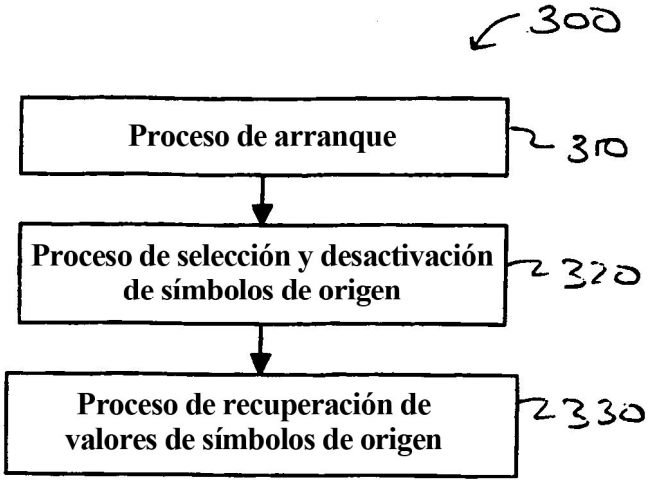
300
Proceso de arranque
310
Proceso de selección y desactivación de símbolos de origen
320
Proceso de recuperación de valores de símbolos de origen
330

Fig. 3

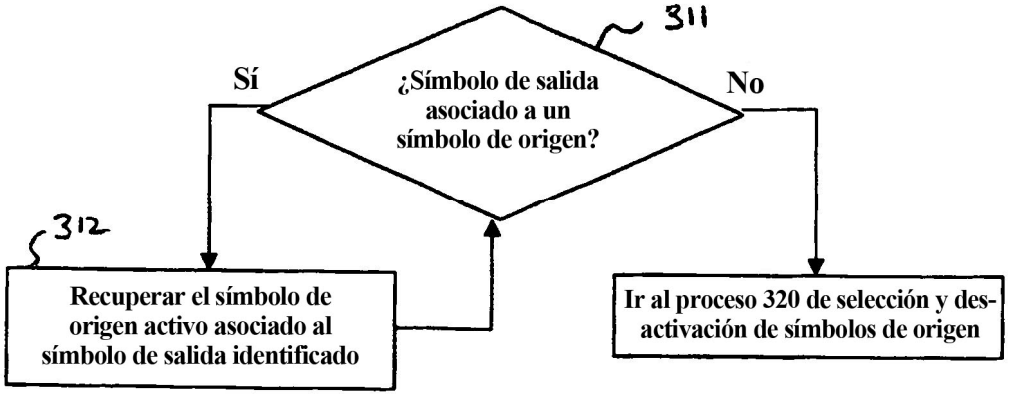
311
¿Símbolo de salida asociado a un símbolo de origen?
Sí
No
312
Recuperar el símbolo de origen activo asociado al símbolo de salida identificado
Ir al proceso 320 de selección y desactivación de símbolos de origen

Fig. 4A

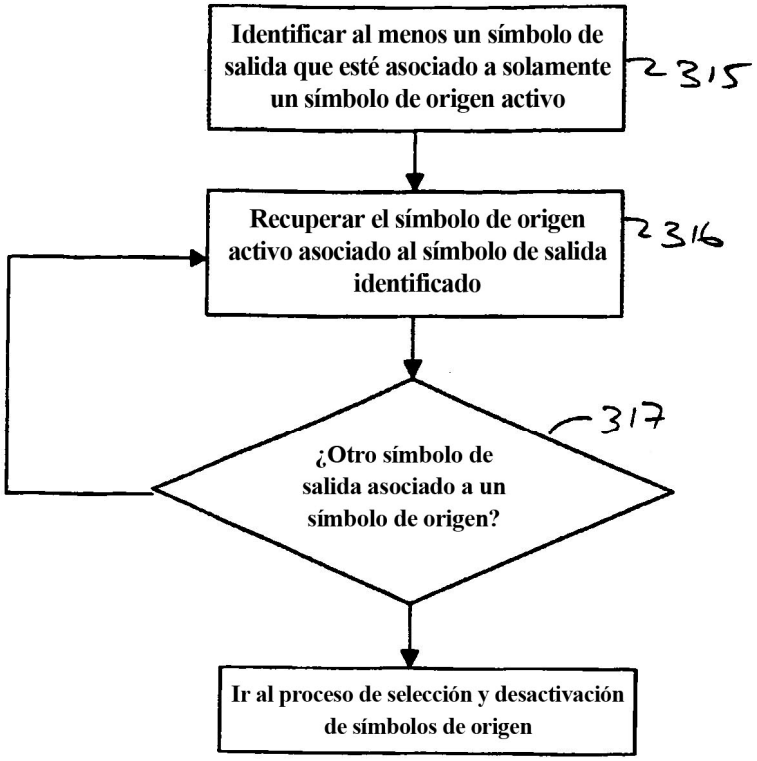
Identificar al menos un símbolo de salida que esté asociado a solamente un símbolo de origen activo
315
Recuperar el símbolo de origen activo asociado al símbolo de salida identificado
316
317
¿Otro símbolo de salida asociado a un símbolo de origen?
Ir al proceso de selección y desactivación de símbolos de origen

Fig. 4B

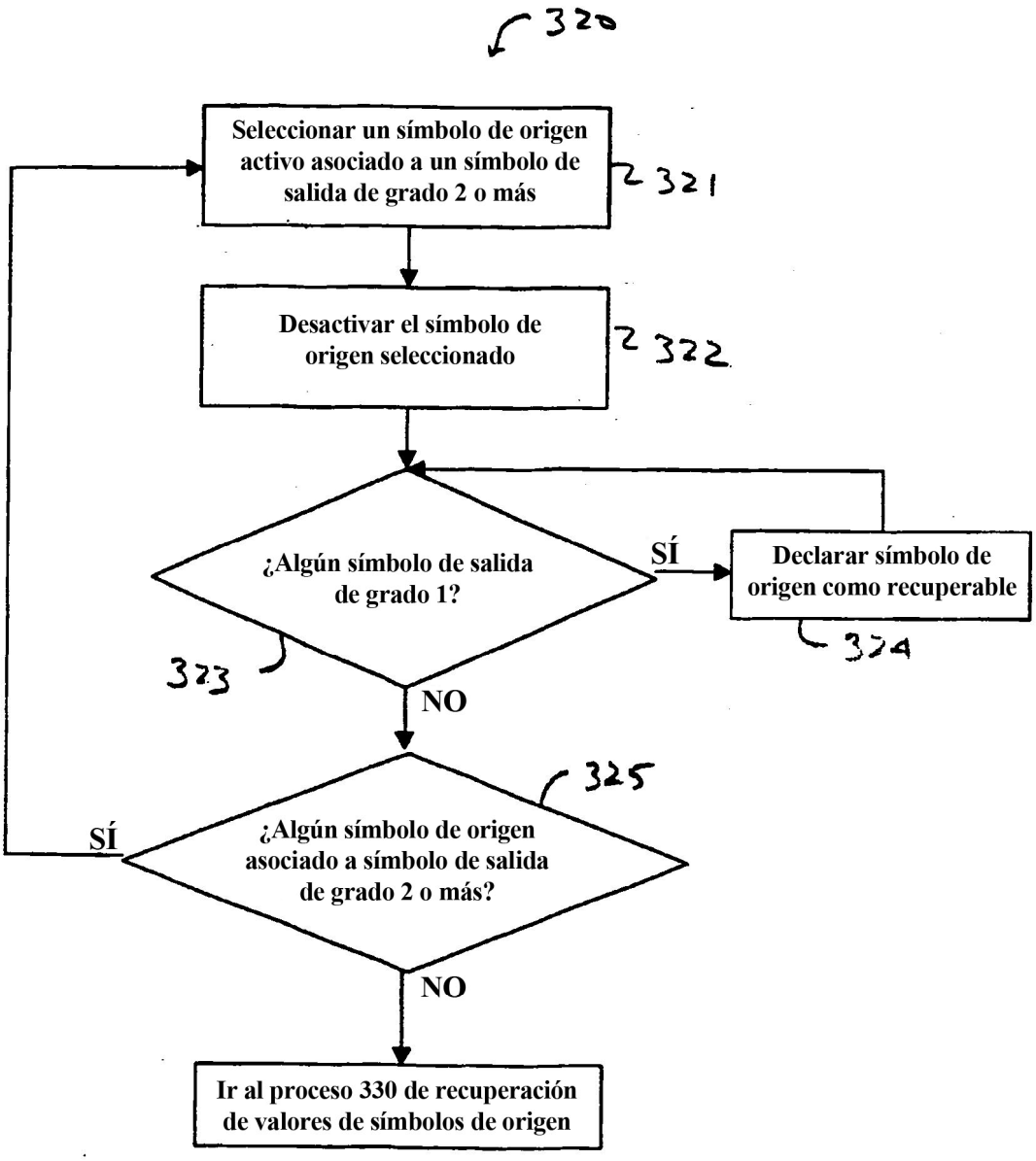
320
Seleccionar un símbolo de origen activo asociado a un símbolo de salida de grado 2 o más
321
Desactivar el símbolo de origen seleccionado
322
¿Algún símbolo de salida de grado 1?
SÍ
Declarar símbolo de origen como recuperable
324
323
NO
325
SÍ
¿Algún símbolo de origen asociado a símbolo de salida de grado 2 o más?
NO
Ir al proceso 330 de recuperación de valores de símbolos de origen

Fig. 5

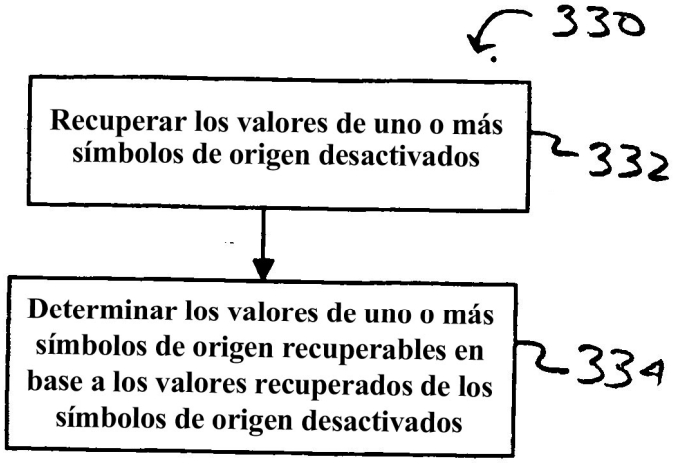
330
Recuperar los valores de uno o más símbolos de origen desactivados
332
Determinar los valores de uno o más símbolos de origen recuperables en base a los valores recuperados de los símbolos de origen desactivados
334

Fig 6

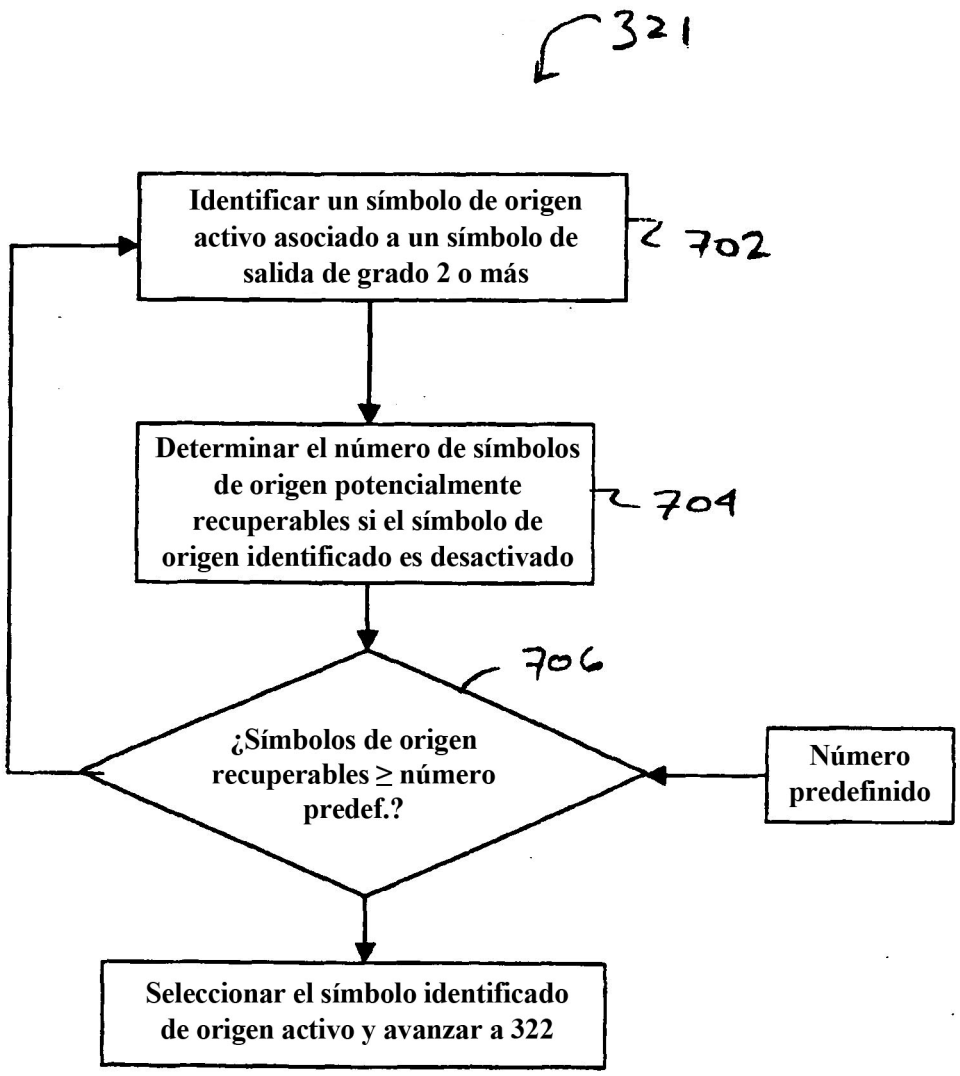
321
Identificar un símbolo de origen activo asociado a un símbolo de salida de grado 2 o más
702
Determinar el número de símbolos de origen potencialmente recuperables si el símbolo de origen identificado es desactivado
704
706
¿Símbolos de origen recuperables ≥ número predef.?
Número predefinido
Seleccionar el símbolo identificado de origen activo y avanzar a 322

Fig. 7A

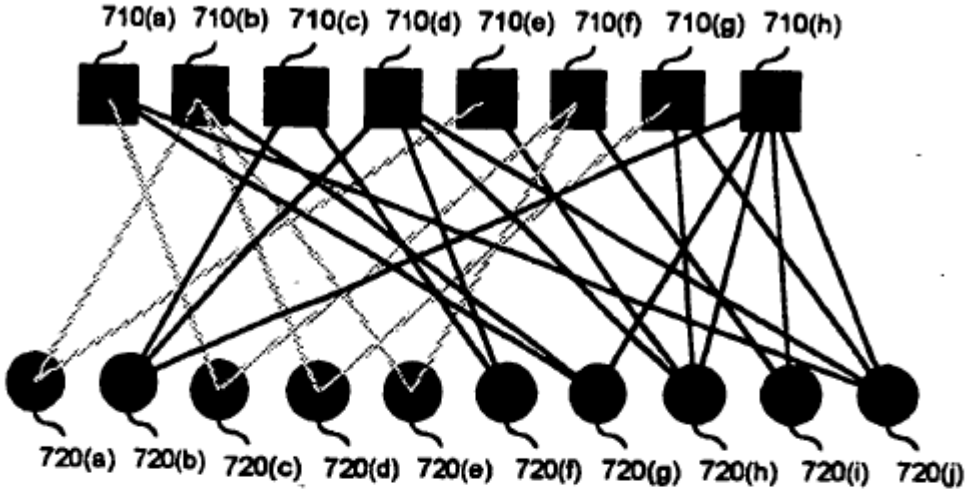
710(a) 710(b) 710(c) 710(d) 710(e) 710(f) 710(g) 710(h)
720(a) 720(b) 720(c) 720(d) 720(e) 720(f) 720(g) 720(h) 720(i) 720(j)

Fig. 7B

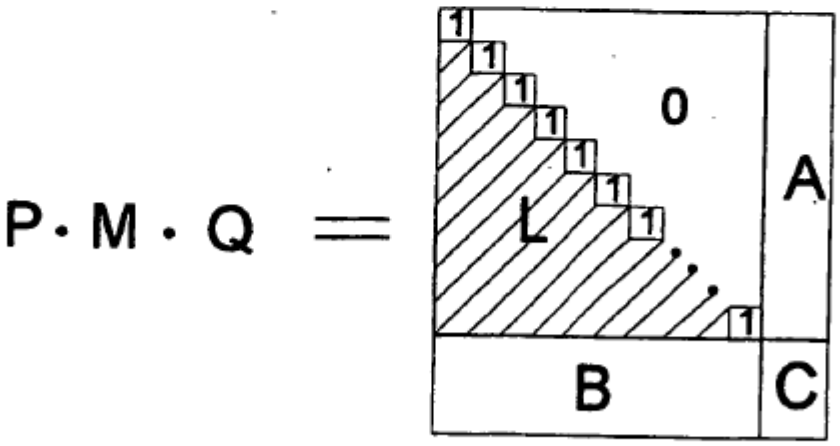
P · M · Q =
1
0
L
A
B
C

Fig. 8A

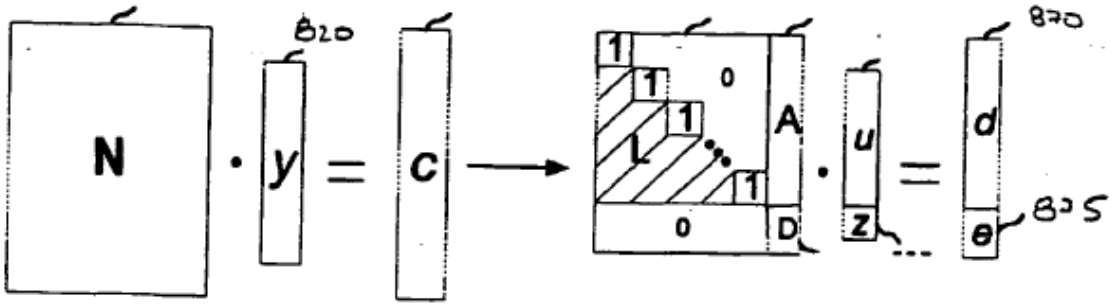

Fig. 8B

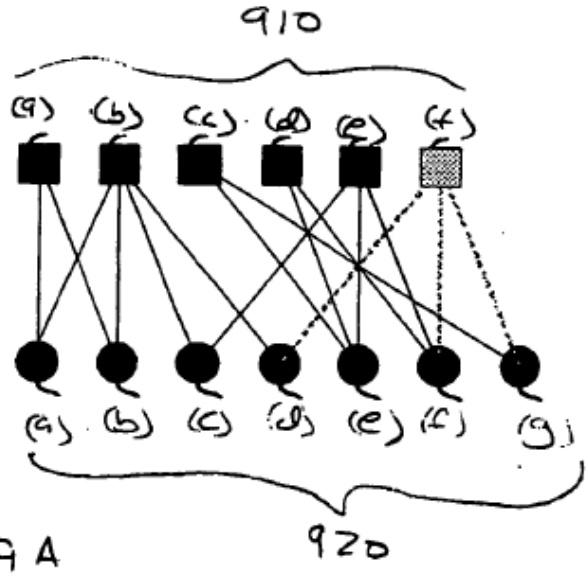

Fig. 9A

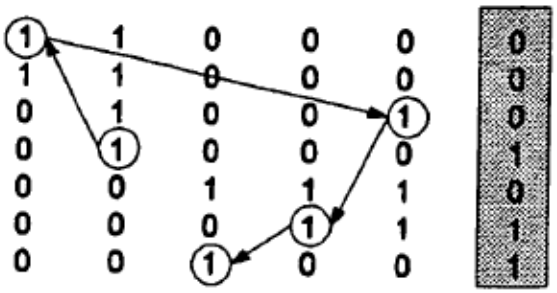

Fig. 9B

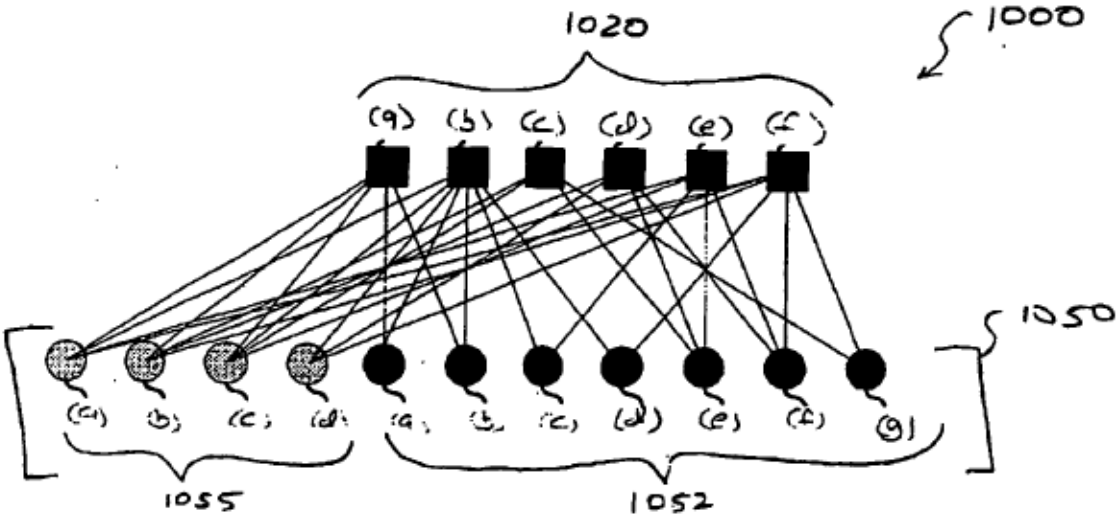

Fig 10A

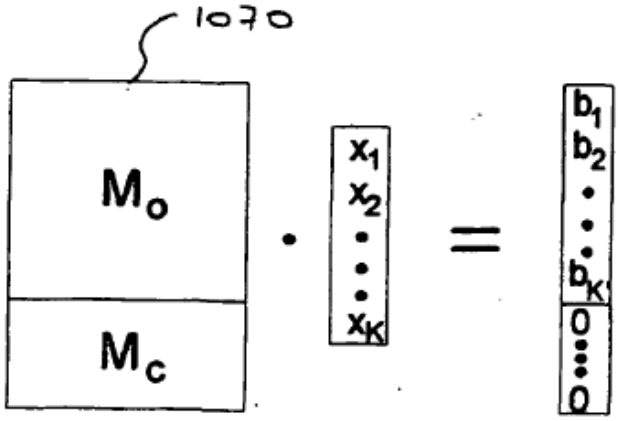

Fig. 10 B

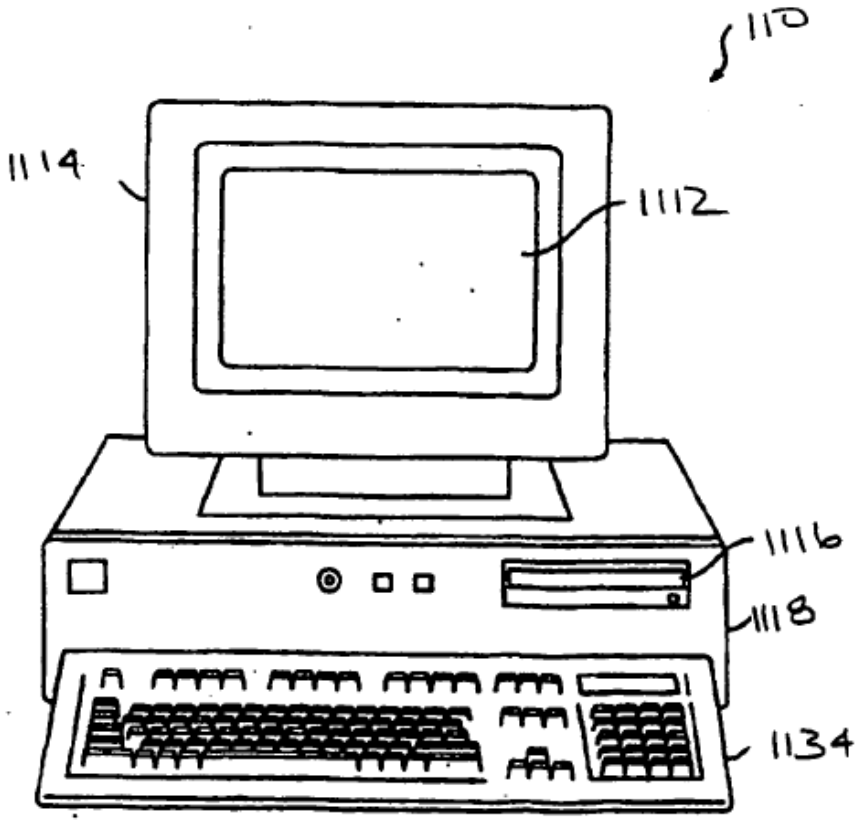

Fig. 11A

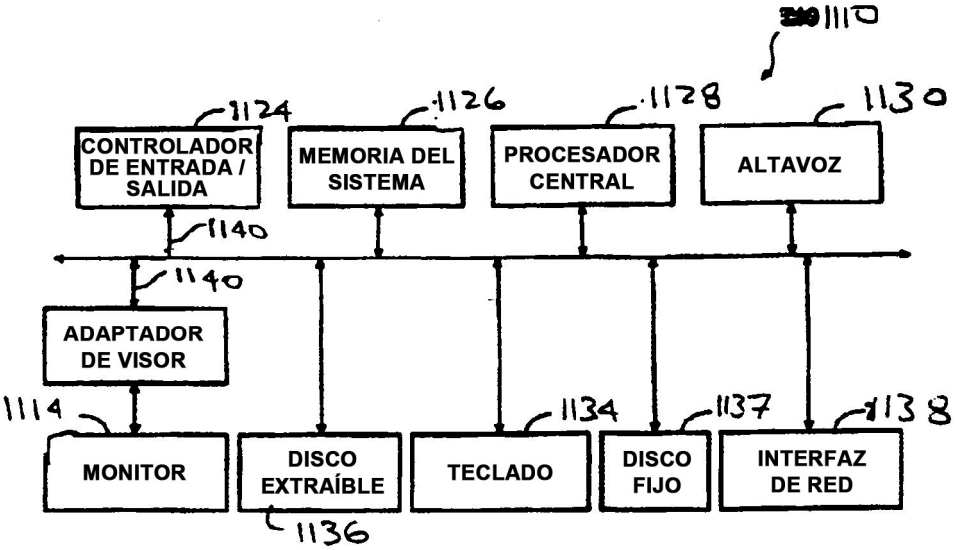

Fig 11B

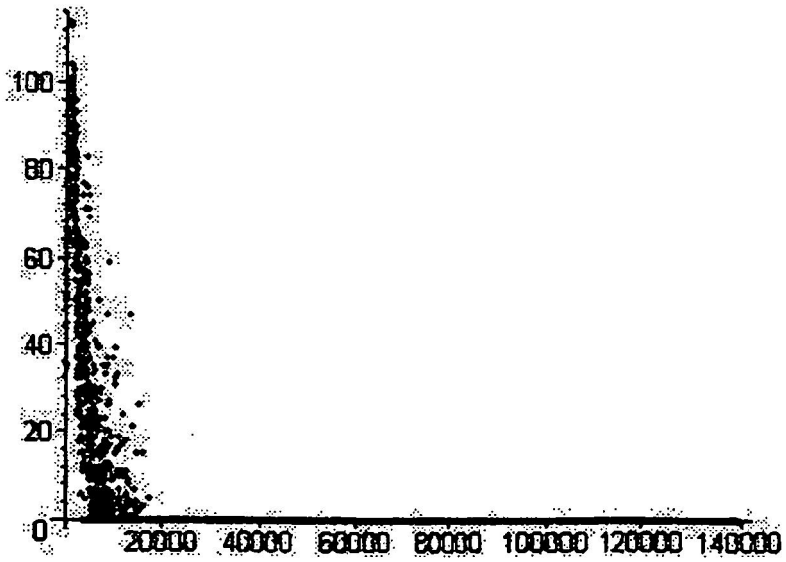

Fig 12A

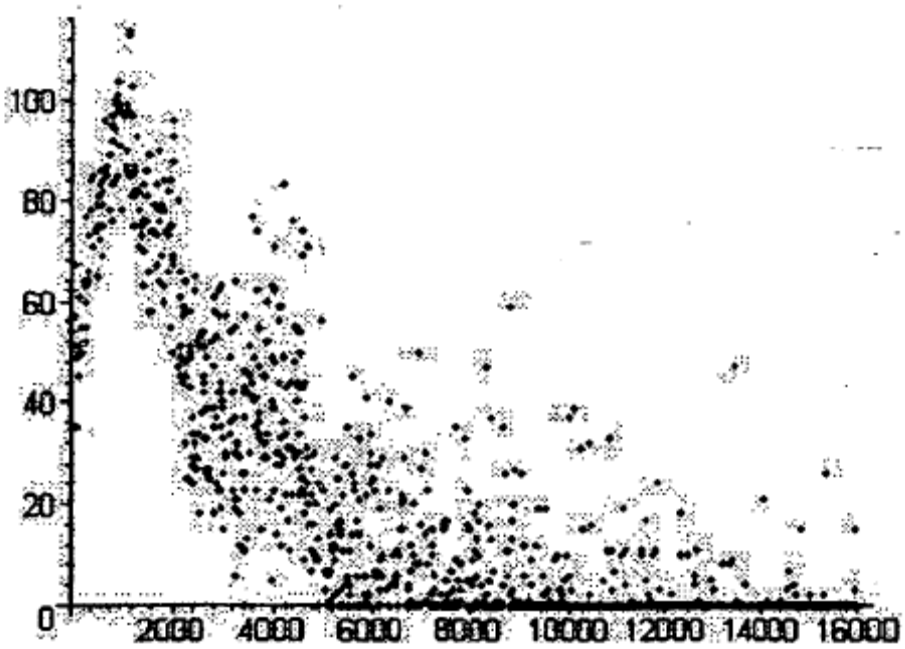

Fig. 12B