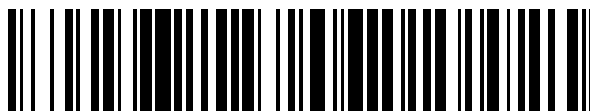


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 368 859**

51 Int. Cl.:

H04L 12/26

(2006.01)

H04L 12/24

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06765497 .0**

96 Fecha de presentación: **09.06.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **2036254**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **18.03.2009**

54 Título: **EVALUCACIÓN DEL CAMINO DE TRANSFERENCIA DE DATOS USANDO FILTRO Y DETECCIÓN DE CAMBIOS.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
23.11.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
23.11.2011

73 Titular/es:
**TELEFONAKTIEBOLAGET LM ERICSSON (PUBL)
TELEFONPLAN
164 83 STOCKHOLM, SE**

72 Inventor/es:
**EKELIN, Svante y
HARTIKAINEN, Erik**

74 Agente: **de Elzaburu Márquez, Alberto**

ES 2 368 859 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

Evaluación del camino de transferencia de datos usando filtro y detección de cambios.

Campo de la invención

La invención se refiere de manera general a las redes de datos y, más concretamente, a la evaluación de los caminos de transferencia de datos en las redes de datos.

Antecedentes de la invención

Los documentos enumerados más adelante se incorporan aquí dentro por referencia:

G. Bishop, y G. Welch, "Una introducción al Filtro de Kalman", SIGGRAPH 2001, Curso 8.

K. Jacobsson, H. Hjalmarsson, N. Möller y K H Johansson, "Estimación del RTT y el ancho de banda para aplicaciones de control de congestión en redes de comunicación", en las Actas de la Conferencia sobre Decisión y Control (CDC) del IEEE 2004, Isla Paraíso, Bahamas, 2004.

M. Jain y C. Dovrolis, "Carga del camino: Una herramienta de medición para el ancho de banda disponible extremo a extremo" En las Actas del taller de Medición Activa y Pasiva (PAM), 2002.

M. Jain y C. Dovrolis, "Ancho de Banda Disponible extremo a extremo: Metodología de Medición, Dinámica y Relación con el Flujo de Datos del TCP" En las Actas de ACM del Sigcomm, 2002.

S. Keshav, Un planteamiento de control teórico para el control de flujo. En las Actas de ACM del SIGCOMM'91, páginas 3-15, Zúrich, Suiza, septiembre de 1991.

M. Kim y B. Noble, "SANE: estimación de red ágil estable", Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias Informáticas de la Universidad de Michigan. CSE-TR-432-00. 2000.

M. Kim y B. Noble, "Estimación de red móvil", Computación e Interconexión de Redes Móvil (ACB MOBICOM), Roma, Italia, 2001.

B. Melander, M. Björkman, y P. Gunningberg, "Un nuevo método de sondeo y análisis extremo a extremo para la estimación de los cuellos de botella del ancho de banda", Actas del Globecom '00 del IEEE, San Francisco, EE.UU., noviembre de 2000.

A. Pásztor y D. Veitch, "La dependencia del tamaño del paquete de los métodos tipo pareja de paquetes", en las Actas, Décimo Taller Internacional sobre Calidad de Servicio (IWQoS 2002), Miami Beach, EE.UU., mayo 2002.

V. Ribeiro, R. Riedi, R. Baraniuk, J. Navratil, L. Cottrell, "Chirrido del camino: Estimación Eficiente del Ancho de Banda Disponible para Caminos de Red", en las Actas del taller de Medición Activa y Pasiva (PAM), 2003.

A. Shriram, M. Murray, Y. Hyun, N. Brownlee, A. Broido, M. Fomenkov y KC Claffy, "Comparación de Herramientas de Estimación del Ancho de Banda Extremo a Extremo Públicas sobre Enlaces de Alta Velocidad", en el taller de Medición Activa y Pasiva (PAM), 2005.

Nowak, R.D. y Coates, M.J., "Tomografía de red usando paquetes unidifusión muy juntos", Patente US 6.839.754 (2005).

M. J. Coates y R.D. Nowak, "Interferencia secuencial Monte Carlo de retardos internos en redes de datos no estacionarias", Transacciones en Procesamiento de Señal del IEEE, 50(2):366-376, febrero de 2002.

S. Ekelin y M. Nilsson, "Monitorización continua del ancho de banda disponible sobre un camino de red" 2º Taller Nacional Sueco de Interconexión de Redes de Ordenadores, Karlstad, Suecia, 23-24 de noviembre de 2004.

Prasad, R., Murray, M., Dovrolis, C., Claffy, K.C.: Estimación del Ancho de Banda: Métricas, Técnicas de Medición, y Herramientas. En: Revista de Red del IEEE (2003).

La capacidad de medir el ancho de banda disponible extremo a extremo sobre un camino en una red de datos es útil en varios contextos, que incluyen la verificación del SLA (Acuerdo de Nivel de Servicio), la monitorización de red y la selección del servidor. La monitorización pasiva del ancho de banda disponible de un camino de red extremo a extremo es posible en principio, dispuesto que se puede acceder a todos los nodos en el camino. No obstante, esto típicamente no es posible, y la estimación del ancho de banda extremo a extremo disponible se hace típicamente mediante el sondeo activo del camino de red. El ancho de banda disponible se puede estimar inyectando tráfico de sondeo en la red, y luego analizando los efectos observados del tráfico transversal en las sondas. Este tipo de medición activa requiere solamente el acceso a los ordenadores centrales del remitente y del receptor (nodos), y no requiere el acceso a ningún nodo intermedio en el camino entre el remitente y el receptor.

Los planteamientos convencionales para el sondeo activo requieren la inyección de tráfico de paquetes de sondeo en el camino de interés a una tasa que es suficiente transitoriamente para usar todo el ancho de banda disponible y causar congestión. Si se usan solamente un pequeño número de paquetes de sondeo, entonces la congestión transitoria inducida se puede absorber mediante colas de almacenamiento temporal en los nodos. Por consiguiente, no se causa ninguna pérdida de paquetes, sino más bien solamente un aumento pequeño del retardo del camino de unos pocos paquetes. La medida deseada del ancho de banda disponible se determina en base al aumento del retardo. Los paquetes de sondeo se pueden enviar en parejas o en trenes, a varias tasas de paquetes de sondeo. La tasa de paquetes de sondeo en la que el retardo del camino empieza a aumentar corresponde con el punto de congestión, y de esta manera es indicativa del ancho de banda disponible. Los paquetes de sondeo también se pueden enviar de manera que la separación temporal entre los paquetes de sondeo dentro de un tren dado varía, de manera que cada tren puede cubrir una gama de tasas de sondeo.

Las soluciones convencionales tales como aquéllas mencionadas anteriormente o bien no producen estimaciones en tiempo real del ancho de banda disponible, o bien no producen estimaciones suficientemente precisas del ancho de banda disponible, o ambas. Estas soluciones también tienden a requerir o bien recursos de procesamiento de datos significativos, o bien recursos de memoria significativos, o ambos.

En Ekelin, S. y otros, "Medición en Tiempo Real del Ancho de Banda Disponible Extremo a Extremo usando Filtrado de Kalman," Conferencia NOMS del IEEE, abril de 2006 y en Hartikainen y otros, "Sintonizando las Características Temporales de un Método de Filtro de Kalman para la Estimación del Ancho de Banda Extremo a Extremo," IEEE/IFIP E2EMON, abril de 2006, se revela un método de aplicación de un filtro de Kalman para la estimación del ancho de banda. En el método revelado, la covarianza Q del ruido del proceso debe ser fijada a un valor alto (es decir, se elige la agilidad) para detectar los cambios rápidos. No obstante, hacerlo así provoca al sistema que sufra inestabilidad o "fluctuación" (es decir, los valores reproducidos fluctúan una gran cantidad). A la inversa, para evitar esta fluctuación, Q debe ser fijada a un bajo valor (es decir, se elige la estabilidad). Haciendo esto, no obstante, la respuesta a los cambios rápidos será lenta.

Es por lo tanto deseable proporcionar una solución de sondeo activo que pueda estimar el ancho de banda disponible de un camino en una red de datos sin las dificultades anteriormente mencionadas de las soluciones convencionales.

Resumen de la invención

Las realizaciones ejemplares de la invención proporcionan el modelado de una condición en un camino de transferencia de datos adecuadamente para permitir el uso de un planteamiento basado en filtros para proporcionar una estimación de la condición. Esto permite estimaciones en tiempo real, precisas de la condición con requerimientos moderados para el procesamiento de datos y los recursos de memoria. Algunas realizaciones implementan detección de cambios para controlar un parámetro del filtro.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 ilustra las operaciones ejemplares que se pueden realizar de acuerdo con la invención.

La Figura 2 ilustra en forma de diagrama un aparato para la evaluación de un camino de transferencia de datos de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención.

La Figura 3 ilustra gráficamente una modelo lineal por tramos utilizado por las realizaciones ejemplares de la invención.

La Figura 4 ilustra en forma de diagrama un aparato de detección de cambios que utiliza los residuos del filtro de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención.

La Figura 5 ilustra en forma de diagrama la lógica de alarma de la Figura 4 en más detalle de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención que implementan una prueba de suma acumulativa.

La Figura 6 ilustra en forma de diagrama las técnicas de detección de cambios adicionales que se utilizan de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención.

La Figura 7 ilustra en forma de diagrama la lógica de alarma de la Figura 4 en más detalle de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención que implementan una prueba de la Relación de Probabilidad Generalizada.

Descripción detallada

Las realizaciones ejemplares de la invención proporcionan la estimación rápida y precisa de una condición dependiente del tiempo asociada con un camino de red de paquetes conmutados, por ejemplo, un camino entre dos ordenadores centrales o nodos de red en Internet u otra red IP. El sondeo activo se usa en combinación con el filtrado para estimar las variables del modelo de red relacionado con la condición de interés. La estimación de la condición de interés se obtiene entonces en base a las variables estimadas.

Las propiedades del camino de red se muestrean transmitiendo los paquetes de sondeo en un patrón específico a través del camino de red. Sus sellos de tiempo se graban en el envío y en la recepción, proporcionando una medición de una cantidad relaciona con las variables del modelo de red. Esto se repite una y otra vez, durante el tiempo que se desee para hacer el seguimiento de la condición de interés.

- 5 El uso del filtrado permite la estimación en tiempo real. Para cada nueva medición obtenida muestreando el sistema, una nueva estimación de la(s) variable(s) del modelo de red se calcula(n) a partir de la estimación previa y la nueva medición. Esto a su vez permite la producción de una estimación actualizada (es decir, la nueva estimación) de la condición de interés para cada nuevo muestreo del camino de red. El muestreo (es decir, las mediciones) se puede realizar arbitrariamente a menudo, provocando sensibilidad en tiempo real. De esta manera, un filtro puede tomar
- 10 una estimación previa $\hat{x}_{k-1}$ del estado del sistema y una nueva medición z_k como entradas, y entonces calcular una nueva estimación $\hat{x}_k$ del estado del sistema en base a esas entradas. Esto permite al filtro producir las estimaciones de las variables de estado en tiempo real, es decir hacer el seguimiento del estado del sistema.

- Un ejemplo de un filtro de estimación es el bien establecido filtro de Kalman, que es tanto rápido como ligero. Para ser capaz de aplicar un filtro de Kalman, tanto el modelo del sistema como el modelo de medición necesitan ser expresados en una forma lineal. Es decir, el nuevo estado del sistema depende linealmente del estado del sistema previo, más un término de ruido, y la cantidad medida depende linealmente de las variables del estado del sistema, más un término de ruido.
- 15

Antes de la discusión adicional del planteamiento basado en filtro con la estimación de las variables de estado del sistema, se tratarán ahora ejemplos de una condición a ser estimada y una técnica de medición adecuada.

- 20 En algunas realizaciones de la invención, por ejemplo, la condición a ser estimada es el ancho de banda disponible del camino de red. El concepto de ancho de banda disponible se puede entender como sigue. Cada enlace j en un camino de red tiene una cierta capacidad, C_j , determinada por los interfaces de red en los nodos en cada extremo del enlace. La capacidad C_j es simplemente la tasa de bit más alta posible sobre el enlace al nivel de paquetes. La capacidad típicamente no varía en escalas de tiempo cortas. No obstante, la carga, o el tráfico transversal, en un
- 25 enlace dado j , indicada por $S_j(t)$, no varía. El ancho de banda disponible $B_j(t)$ del enlace j es $B_j(t) = C_j - S_j(t)$. Uno de los enlaces j a lo largo del camino tiene el ancho de banda disponible más pequeño. Este "enlace de cuello de botella" determina el ancho de banda disponible del camino. El ancho de banda disponible $B(t)$ de un camino de red es el mínimo de los anchos de banda disponibles respectivamente asociados con sus enlaces constituyentes:

$$B(t) = \min (C_j - S_j(t))$$

- 30 El ancho de banda disponible de un camino de red en cualquier tiempo t se puede interpretar de esta manera como el aumento máximo en la velocidad de transmisión de datos, desde el extremo remitente al extremo de recepción, que puede ocurrir teóricamente en el tiempo t sin causar congestión.

- Se debería señalar que la carga de tráfico transversal y de esta manera el ancho de banda disponible se definen usando alguna escala de tiempo medio tau, es decir $S_j(t)$ se calcula promediando durante algún intervalo de tiempo de longitud tau alrededor del tiempo t . No hay elección natural, universal de tau, más bien ésta depende de los detalles específicos de la aplicación. Debido a la capacidad finita del enlace y el tamaño del paquete de tráfico transversal, tau no se puede elegir arbitrariamente pequeña. No obstante, para las redes de datos modernas, el ancho de banda disponible y la carga de tráfico transversal se podrían definir usando tau tan baja como en la subsegunda zona.
- 35

- 40 En algunas realizaciones de la invención, el sondeo activo usado para muestrear las mediciones se hace en la práctica bien conocida de transmisión de parejas de paquetes de sondeo sellados en el tiempo desde el remitente al receptor. Por ejemplo, se puede modelar un camino de red como una serie de saltos, donde cada salto contiene una cola FIFO de entrada y un enlace de transmisión. Cada enlace de transmisión j tiene una capacidad constante C_j , y el tráfico transversal que varía con el tiempo. Consideremos una secuencia de paquetes en la que el i -ésimo paquete en la secuencia llega en un salto en el tiempo u_i , y llega en el siguiente salto en el tiempo u_i^* . De interés son los tiempos entre llegadas de las parejas de paquetes. Si cada pareja de paquetes se define para contener el $(i-1)$ -ésimo paquete y el i -ésimo paquete de una secuencia de paquetes, entonces los tiempos entre llegadas de una pareja de paquetes dada en los saltos anteriormente mencionados son
- 45

$$t_i = u_i - u_{i-1} \text{ y } t_i^* = u_i^* - u_{i-1}^* .$$

- 50 Una cantidad adimensional, la deformación entre paquetes, se designa como ε , y se define por

$$\frac{t_i^*}{t_i} = 1 + \varepsilon .$$

Si u es la velocidad de transmisión de paquetes de sondeo seleccionada para realizar la medición, si r es la tasa del

tráfico de paquetes de sondeo que sale de un salto, y si b es el tamaño de los paquetes de sondeo, entonces

$$\frac{u}{r} = \frac{b/t_i}{b/t_i^*} = \frac{t_i^*}{t_i} = 1 + \varepsilon.$$

La deformación entre paquetes ε se puede ver de esta manera para proporcionar una indicación de la relación entre la tasa de tráfico de sondeo u y el ancho de banda disponible B . Si u es menor que B , entonces $\varepsilon = 0$, y no hay congestión. No obstante, si u alcanza B , entonces hay congestión, y la congestión (o más exactamente la deformación) crece en proporción con la sobrecarga, $u-B$. Esto se ha visto usando un modelo fluido en el documento anteriormente mencionado, "Un nuevo método de sondeo y análisis extremo a extremo para la estimación de cuellos de botella del ancho de banda", por B. Melander y otros. El comportamiento anteriormente descrito de la deformación entre paquetes se demuestra en la Ecuación 1 de más adelante.

$$\varepsilon = v + \begin{cases} 0 & (u < B) \\ \alpha(u - B) = \alpha u + \beta & (u \geq B) \end{cases} \quad (1)$$

En el modelo de la Ecuación 1, α es una variable de estado igual a $1/C$, β es una variable de estado igual a $(S/C)-1$, y v es ruido de la medición. El ancho de banda disponible se relaciona con las variables de estado según $B = \frac{\beta}{\alpha}$. De esta manera, se puede obtener fácilmente una estimación del ancho de banda disponible si se pueden estimar las variables de estado α y β .

Volviendo ahora a la idea de un planteamiento basado en filtro, el estado de un sistema se estima a partir de las mediciones repetidas de alguna cantidad dependiente del estado del sistema, dando modelos de cómo el estado del sistema evoluciona desde una ocasión de medición a la siguiente, y cómo la cantidad medida depende del estado del sistema. Ambas de estas dependencias incluyen un término de ruido aleatorio, el ruido del proceso y el ruido de medición, respectivamente. Las ecuaciones del sistema son entonces

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}) + w_{k-1} \\ z_k = h(x_k) + v_k \end{cases} \quad (2)$$

donde x es el estado del sistema, z es la medición, w es el ruido del proceso y v es el ruido de medición. Las funciones f y h representan el modelo de evolución del sistema y el modelo de medición, respectivamente. El subíndice se refiere al "tiempo discreto".

Si las funciones f y h son lineales, y si tanto el ruido del proceso como el ruido de medición son Gaussianos e incorrelados, hay un filtro óptimo, a saber el filtro de Kalman. La experiencia ha mostrado que los filtros de Kalman a menudo funcionan muy bien, incluso cuando estas condiciones no se cumplen estrictamente. Es decir, las distribuciones de ruido no necesitan ser exactamente Gaussianas. También puede haber una cierta desviación de la linealidad de las funciones f y h por los términos de ruido. Otra ventaja importante con los filtros de Kalman es que, a menos que la dimensionalidad del sistema sea muy grande, son ligeros a nivel de cálculo, con requerimientos mínimos sobre la CPU y la memoria. En este caso lineal, el sistema se puede expresar usando matrices como sigue:

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k = Hx_k + v_k \end{cases} \quad (3)$$

Las ecuaciones del filtro de Kalman que permiten el cálculo de la nueva estimación a partir de las estimaciones previas y la nueva medición son:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \\ P_k &= (I - K_k H)P_k^- \end{aligned} \quad (4)$$

donde

$$\begin{aligned}\hat{x}_k^- &= A\hat{x}_{k-1} \\ P_k^- &= AP_{k-1}A^T + Q\end{aligned}\quad (5)$$

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} . \quad (6)$$

El filtrado de Kalman se puede entender como un proceso en el que hay dos fases de cálculo en cada iteración. Primero, hay una fase de “predicción”, en la que la estimación previa evoluciona un paso de tiempo discreto (Ecuación 5) de acuerdo con el modelo del sistema. Luego, hay una fase de “corrección”, en la que se tiene en cuenta la nueva medición (Ecuación 4). La matriz de covarianza del error actualizada P_k de la estimación del estado también se calcula.

Como se puede ver a partir de las Ecuaciones 6 y 5, la ganancia de Kalman K_k aumenta con Q y disminuye con R . Estas entradas Q y R del filtro de Kalman son las covarianzas del ruido del proceso w y del ruido de medición v , respectivamente. Estas cantidades se pueden entender intuitivamente como sigue. Las variaciones grandes del ruido en el modelo del sistema (Q alta) significan que la predicción de acuerdo con el modelo del sistema va a ser probablemente menos precisa, y la nueva medición debería ser mucho más pesada. Las grandes variaciones en el ruido de medición (R alta) significan que la nueva medición va a ser probablemente menos precisa, y la predicción debería ser mucho más pesada. Señalar que la cantidad medida z es un escalar, y R también es un escalar (o una matriz 1x1).

Las realizaciones ejemplares de la invención hacen uso de un filtro de Kalman para producir una estimación actualizada del ancho de banda disponible sobre un camino de red para cada nueva medición. Cada medición incluye el envío de una secuencia de parejas de paquetes sellados de tiempo, y calcular la deformación media entre paquetes. En algunas realizaciones, la secuencia de parejas de paquetes se puede incorporar en un tren. La varianza de la deformación entre paquetes se calcula también para producir la entrada R para las ecuaciones del filtro de Kalman. En algunas realizaciones, la tasa de sondeo u se elige aleatoriamente para cada medición, por ejemplo, de acuerdo con una distribución de probabilidad tal como una distribución uniforme. En algunas realizaciones, las mediciones se repiten después de un intervalo de tiempo elegido aleatoriamente para cada nueva medición a partir de una distribución de probabilidad, por ejemplo, una distribución de un punto, en la que el segundo intervalo se elige con probabilidad uno.

Se debería señalar que el método del filtro de Kalman es muy “indulgente”, y se producen a menudo buenos resultados incluso cuando las condiciones ideales se rompen ligeramente. Así, incluso si un sistema muestra características que se desvían algo de esta curva del sistema lineal por tramos, la estimación del ancho de banda disponible resultante no se invalida automáticamente. Por supuesto, todas las variables en este modelo son dinámicas, es decir pueden variar en el tiempo, de manera que dependen del subíndice (el cual algunas veces se suprime en esta exposición).

El modelo de la Ecuación 1 es no lineal, pero es lineal por tramos. Un ejemplo de esto se muestra gráficamente en la Figura 3. Aunque los filtros de Kalman no son aplicables normalmente en estos casos, este problema se elude de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención, y se puede obtener convergencia eficiente. Incluso si el modelo lineal por tramos usado es solamente una aproximación, el filtro de Kalman aún puede producir buenas estimaciones, ya que los términos de ruido pueden acoger algunos errores debidos al “mal modelado”. El modelo de la Ecuación 1 permite la aplicación de un filtro de Kalman, cuando el estado del sistema se representa por un vector que contiene los dos parámetros de la parte de la línea recta de la pendiente de la Ecuación 1.

$$x = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} . \quad (7)$$

Para cumplir el criterio de linealidad para la aplicabilidad del filtrado de Kalman, algunas realizaciones de la invención hacen el seguimiento de u con respecto a B , e intentan estar en la parte de la línea de la pendiente de la Ecuación 1 (ver también la Figura 3). Dado que el valor real de B , el ancho de banda disponible, no es conocido, las realizaciones ejemplares de la invención usan la estimación más reciente $\hat{B}$, o algún valor umbral adecuado en las proximidades de $\hat{B}$. Si u es más pequeño que este umbral, la medición se ignora y la estimación del vector de

estado no se actualiza. La medición ε_k de la deformación en el tiempo discreto k se puede escribir como

$$\varepsilon_k = Hx_k + v_k \quad (8)$$

donde $H = [u \ 1]$. También, la evolución del estado del sistema se puede escribir como

$$x_k = x_{k-1} + w_{k-1} \quad (9)$$

- 5 De esta manera, el formalismo del filtro de Kalman se puede aplicar al vector de estado de la Ecuación 7, con $A = I$ y $z = \varepsilon$, donde I es la matriz de Identidad.

El vector de estado x de la Ecuación 7 es bidimensional, así la covarianza Q del ruido del proceso w es una matriz 2×2 . Esta matriz Q se puede usar para la puesta a punto del rendimiento, dada una red de referencia con tráfico controlado y conocido y de esta manera el ancho de banda conocido. Cuando se aplican al vector de estado bidimensional de la Ecuación 7, las ecuaciones de Kalman llegan a ser computacionalmente muy simples, y solamente se necesitan unas pocas operaciones de punto flotante en cada iteración. Cuando el filtro estima las variables de estado del sistema α y β , la estimación $\hat{B}$ del ancho de banda disponible B se calcula fácilmente a

partir de las estimaciones $\hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$, como $\hat{B} = -\frac{\hat{\beta}}{\hat{\alpha}}$.

Las operaciones ejemplares de acuerdo con la invención se describen en los párrafos numerados más abajo. Estas operaciones ejemplares también se ilustran en 11-18 en la Figura 1.

1. El receptor hace una estimación inicial $\hat{x}_0$ del vector de estado, y una estimación inicial P_0 de la matriz de covarianza del error correspondiente a $\hat{x}_0$ como se muestra en 11. A partir de $\hat{x}_0$, se calcula una estimación $\hat{B}$ del ancho de banda disponible, como se muestra en 12.

2. El remitente envía una secuencia (o tren) de N parejas de paquetes de sondeo con intensidad de tráfico de sondeo u , de acuerdo con una distribución de probabilidad deseada, como se muestra en 13. (En algunas realizaciones, la distribución de probabilidad para u se elige en base a la experiencia o experimentación pasada). Las N parejas de paquetes de sondeo se usan para la medición de la deformación entre paquetes. Algunas mediciones envían una secuencia de $N+1$ paquetes de sondeo que se usan para formar N parejas de paquetes de sondeo. Es decir, el segundo paquete de sondeo de la primera pareja también se usa como el primer paquete de sondeo de la segunda pareja, y así sucesivamente. En algunas realizaciones, los paquetes de sondeo no se comparten entre las parejas de paquetes de sondeo, ya que se usa una secuencia de $2N$ paquetes de sondeo para formar N parejas distintas de paquetes de sondeo. El remitente pasa el valor actual de la tasa de tráfico de paquetes de sondeo u al receptor en los paquetes de sondeo.

3. Para la secuencia recibida de paquetes de sondeo, el receptor recupera la intensidad de tráfico u a partir de los paquetes de sondeo, como se muestra en 14. Si u excede un valor umbral (por ejemplo, $\hat{B}$ o un valor elegido adecuadamente en las proximidades de $\hat{B}$) en 15, entonces el receptor usa los sellos de tiempo de los paquetes de sondeo para calcular la ε media de los N valores de deformación entre paquetes que corresponden a las N parejas de paquetes, como se muestra en 16. El receptor también calcula la covarianza R . Si u es menor o igual que el valor umbral en 15, entonces los sellos de tiempo de los paquetes de sondeo se ignoran, no se realiza ninguna actualización, y las operaciones vuelven al número 2 anterior, como se muestra en 18.

4. El filtro de Kalman usa el valor medio de deformación entre paquetes y la matriz de covarianza (en su caso) desde la operación 3 anterior para actualizar las estimaciones del vector de estado $\hat{x}$ y la matriz de covarianza del error P , como se muestra en 17. A partir de la nueva estimación del vector de estado, se calcula una nueva estimación $\hat{B}$ del ancho de banda disponible, como se muestra en 12.

5. Las operaciones vuelven al número 2 anterior, y la siguiente secuencia de paquetes de sondeo se genera, como se muestra en 13.

La Figura 2 ilustra en forma de diagrama un aparato para la evaluación de un camino de transferencia de datos de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención. En algunas realizaciones, el aparato de la Figura 2 es capaz de realizar las operaciones descritas anteriormente e ilustradas en la Figura 1. En algunas realizaciones, los nodos 21 y 23, y el camino de transferencia de datos 22, puede constituir, o formar una parte de, una red de paquetes conmutados, tal como Internet, una intranet privada, etc. El nodo remitente 21 envía las secuencias de parejas de paquetes de sondeo a través del camino de transferencia de datos 22 al nodo de recepción 23. El sellado de tiempo anteriormente mencionado en los nodos remitente y de recepción no se muestra explícitamente. El nodo de recepción 23 incluye una unidad de extracción 24 que extrae la información del sello de tiempo y la tasa de

paquetes de sondeo u a partir de los paquetes de sondeo. Una unidad de cálculo de la deformación 25 calcula el valor de la deformación entre paquetes de cada pareja de paquetes de sondeo en la secuencia recibida, y también calcula la media y la varianza de los valores de deformación entre paquetes.

5 La unidad de cálculo de la deformación 25 proporciona la deformación media entre paquetes como la entrada z a un filtro de Kalman 26, y también proporciona la varianza de la deformación entre paquetes R como una entrada al filtro de Kalman 26. El filtro de Kalman 26 también recibe como entradas la matriz Q , y las estimaciones iniciales del vector de estado $\hat{x}_0$ y la matriz de covarianza del error P_0 . En algunas realizaciones, las estimaciones iniciales del vector de estado $\hat{x}_0$ y la matriz de covarianza del error P_0 se derivan de la experiencia o experimentación pasada. La precisión de estas estimaciones iniciales no es un factor significativo en el funcionamiento del filtro de Kalman.

10 El filtro de Kalman 26 recibe la matriz de identidad I como su entrada de matriz A , y también recibe la matriz H (por ejemplo, $H = [u \ 1]$) desde un generador de matriz 27 que produce la matriz H en respuesta a la tasa de paquetes de sondeo u ya extraídos de los paquetes de sondeo por la unidad de extracción 24. En respuesta a sus entradas, el filtro de Kalman 26 produce la estimación del vector de estado actualizado $\hat{x}_k$. Una unidad de cálculo del ancho de banda disponible 28 usa la estimación del vector de estado actualizado para actualizar la estimación del ancho de banda disponible $\hat{B}$. La estimación del ancho de banda disponible $\hat{B}$ se proporciona como un resultado de salida desde el nodo 23, y también se proporciona a una unidad de comparación 29 que compara la tasa de paquetes de sondeo u con un valor umbral que es igual a o convenientemente cerca de $\hat{B}$. Dependiendo del resultado de esta comparación, la unidad de comparación 29 proporciona a la unidad de cálculo de la deformación 25 una indicación 20 de si la unidad de cálculo de la deformación 25 debería hacer o no sus cálculos para la secuencia actual de parejas de paquetes de sondeo. En algunas realizaciones, la indicación 20 se proporciona al filtro de Kalman 26, para señalar si se debería aplicar o no el filtro al resultado de la unidad de cálculo de la deformación 25. Esto se muestra mediante la línea quebrada 201.

25 A partir de la descripción anteriormente mencionada de la Figura 2, la unidad de extracción 24 y la unidad de cálculo de la deformación 25 se pueden ver como componentes de una unidad de producción de datos que produce definitivamente los datos de estimación (ϵ y R en el ejemplo de la Figura 2) para usar en la estimación del ancho de banda disponible. También, el filtro de Kalman 26 y el estimador del ancho de banda disponible 28 se pueden ver como componentes de una unidad de estimación que aplica el filtrado de Kalman a los datos de estimación para producir la estimación del ancho de banda disponible.

30 Algunas realizaciones son sintonizables para optimizar el rendimiento de seguimiento en un ancho de banda disponible deseado-escala de tiempo promedio τ . Por ejemplo, si $\tau = 10$ segundos, entonces las mediciones del ancho de banda disponible se hacen sobre una escala de tiempo de 10 segundos. En algunas realizaciones, $\tau = 10$ segundos, y la matriz Q 2×2 tiene valores de $Q_{11} = 10^{-5}$, $Q_{12} = 0$, $Q_{21} = 0$, y $Q_{22} = 10^{-3}$. En las realizaciones con escalas de tiempo más cortas, el valor de Q_{22} se puede aumentar, mientras que se mantienen Q_{11} , Q_{12} y Q_{21} iguales.

35 Algunas realizaciones usan escalado en los cálculos numéricos, de manera que las cantidades implicadas son adimensionales. Como se mencionó anteriormente, ϵ es adimensional para empezar con, y de esta manera β , v y R son también adimensionales. Para hacer todas las otras cantidades adimensionales, la tasa de tráfico de sondeo u se escala por la capacidad máxima del primer salto desde el ordenador central/nodo remitente del sondeo. Esto significa que $u = 1$ es la tasa de sondeo máxima posible, y que α , x , w y Q son adimensionales.

40 En algunas realizaciones, los componentes en 25-29 de la Figura 2 se proporcionan externamente de y separada del nodo de recepción 23, pero se acoplan a la unidad de extracción 24 para recibir de allí la información del sello de tiempo y la tasa de paquetes de sondeo u . Este tipo de partición se ilustra por la línea quebrada 200 en la Figura 2. En este ejemplo de partición, todos los componentes 25-29 se proporcionan externamente de y separados del nodo de recepción 23, por ejemplo, en otro uno o más nodos de la red.

45 La presente invención puede producir una estimación actualizada del ancho de banda disponible para cada nuevo muestreo del sistema, es decir para cada nuevo tren de parejas de paquetes de sondeo. Los trenes se pueden enviar arbitrariamente a menudo (es decir, la escala de tiempo para la medición de muestreo se puede reducir arbitrariamente), así se puede hacer el seguimiento del ancho de banda disponible en tiempo real.

50 El procesamiento de datos y los requerimientos de memoria para realizar los cálculos de filtrado descritos anteriormente se pueden cumplir fácilmente de manera relativa. Por ejemplo, en algunas realizaciones el nodo de recepción 23 de la Figura 2 es una plataforma de microprocesador. La actualización de la estimación del ancho de banda disponible que usa las ecuaciones del filtro de Kalman reduce para realizar solamente unas pocas operaciones de punto flotante (más cerca de 10 que de 100 en algunas realizaciones).

55 En general, el uso del filtro 26 de la Figura 2 proporciona un número de posibilidades para la puesta a punto de los parámetros del filtro para lograr las propiedades específicas. Se pueden obtener varias características de las

estimaciones del filtro eligiendo varios parámetros del filtro. Típicamente, no hay un conjunto dado de parámetros del filtro que es preferible en todos los casos posibles. El comportamiento deseado del filtro puede variar, y por lo tanto, así hace el ajuste deseable de los parámetros del filtro. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el filtro se diseña únicamente para alta agilidad, la cual es deseable si es importante la rápida adaptación/seguimiento con respecto a los cambios del sistema. No obstante, esto también hace el filtro relativamente más sensible al ruido de medición. En algunas realizaciones, el filtro se diseña para la estabilidad, de manera que el filtro es relativamente insensible al ruido de medición. Pero esto hace el filtro relativamente más lento en la adaptación a cambios bruscos en el estado del sistema. En algunas realizaciones, no obstante, el filtro realiza suficientemente en una variedad de condiciones, exhibiendo, por ejemplo, tanto una sensibilidad relativamente baja al ruido de medición, como rendimiento relativamente ágil en la adaptación a las condiciones de cambio en el sistema.

Como se describió anteriormente, el ancho de banda disponible sobre un camino de red de paquetes conmutados típicamente varía con el tiempo. Si el filtro 26 de la Figura 2 se configura para producir las estimaciones de alta calidad del ancho de banda disponible en una red con características que varían lentamente, entonces puede ser relativamente lento en la adaptación a los cambios bruscos en el estado del sistema. Para que el filtro 26 sea adecuadamente sensible a rápidas variaciones en el entorno de la red de paquetes conmutados (lo cual podría ocurrir, por ejemplo, debido a cambios repentinos en la intensidad del tráfico transversal y/o alteraciones de la capacidad del enlace de cuello de botella), es deseable proporcionar el filtro con un conjunto alternativo de los parámetros del filtro que son adecuados para la rápida adaptación. Esto se logra en algunas realizaciones a través del uso de las técnicas de detección de cambios.

Los detectores de cambios pueden mejorar el rendimiento de las herramientas basadas en filtros que experimentan cambios bruscos en el estado del sistema. Un detector de cambios puede descubrir automáticamente cuando las predicciones del filtro afrontan una desviación sistemática de las mediciones de entrada. En base a esta información, el detector de cambios puede indicar cuando el filtro parece estar fuera de la pista. El detector de cambios puede dotar al filtro con una indicación de alarma adecuada en caso de rendimiento escaso debido, por ejemplo, a un cambio brusco en el estado del sistema. De esta manera, en caso de una alarma, los parámetros del filtro adecuado se pueden ajustar temporalmente a partir de un primer conjunto de parámetros que proporcionan estabilidad e insensibilidad al ruido a un segundo conjunto de parámetros que logran la rápida adaptación al nuevo estado del sistema. A partir de entonces, el uso del primer conjunto de parámetros del filtro se puede reanudar. De esta manera, hay, en general, una solución de compromiso entre la estabilidad y la agilidad de las estimaciones; en otras palabras, por ejemplo, un compromiso entre la atenuación del ruido y la capacidad de seguimiento.

En las realizaciones que usan detección de cambios, se pueden acoger cambios rápidos en el ancho de banda disponible mientras aún se mantiene la estabilidad. Si los cambios bruscos suceden en el sistema debido, por ejemplo, a variaciones repentinas en la intensidad de tráfico transversal y/o la capacidad del enlace del cuello de botella, el detector de cambios puede aconsejar automáticamente al filtro para aplicar temporalmente la sintonización de los parámetros del filtro de manera que se obtienen las propiedades de un filtro adaptativo rápidamente. En algunas realizaciones, cuando no hay alarma desde el detector de cambios, el filtro mantiene sus parámetros de filtro preconfigurados, los cuales producen estimaciones adecuadas para una red con características que cambian lentamente; es decir la estabilidad toma precedencia sobre la agilidad. En otras realizaciones, se implementa la situación inversa. Es decir, el filtro se preconfigura para la agilidad, y se conmuta selectivamente para lograr insensibilidad de ruido de manera temporal, es decir, la agilidad toma precedencia sobre la estabilidad.

Algunas técnicas de detección de cambios comunes toman ventaja de los residuos del filtro. Un residuo del filtro se puede interpretar como una medida de la capacidad del filtro para predecir el estado del sistema antes de tiempo. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el residuo del filtro en el tiempo k se calcula como la diferencia entre la medición tomada en el tiempo k , y la predicción del filtro (estimación) de esa medición. Otras realizaciones usan el residuo del filtro para producir una medida de la distancia que se relaciona con el residuo del filtro, por ejemplo, produciendo la medida de la distancia como una versión adecuadamente normalizada del residuo del filtro.

La Figura 4 ilustra en forma de diagrama la lógica de detección de cambios que utiliza los residuos del filtro de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención. Un combinador 40 combina la medición para el tiempo k , a saber Z_k , y la predicción (estimación) del filtro del estado del sistema, a saber $\hat{x}_k^-$ (ver también las Ecuaciones 4 y 5), que producen por ello la información de la combinación en 45. En algunas realizaciones, la información de la combinación incluye una secuencia de residuos del filtro en 45. En otras realizaciones, la información de combinación en 45 incluye una secuencia de mediciones de distancia relacionadas con los residuos del filtro. La información de la combinación 45 se introduce a la lógica de alarma 42. La lógica de alarma 42 realiza el análisis estadístico con respecto a la información de combinación 45. En base a este análisis, la lógica de alarma 42 decide si activar o no una señal de alarma 46.

La señal de alarma 46 controla un selector 43 que introduce los parámetros del filtro, notablemente la matriz de covarianza del ruido del proceso Q al filtro de Kalman 26 (ver también la Figura 2). Cuando la señal de alarma 46 se activa, el selector 43 pasa la matriz Q_2 al filtro 26. De otro modo, el selector pasa la matriz Q_1 al filtro 26. La matriz Q_1 se diseña para realizar un filtro que se caracteriza de manera general por la estabilidad y la insensibilidad del ruido, y la matriz Q_2 se diseña para realizar un filtro que se caracteriza de manera general por la rápida

adaptabilidad a un nuevo estado del sistema. En algunas realizaciones, los elementos diagonales (en la fila 1, columna 1 y la fila 2, columna 2) de Q1 son 10^{-5} , y los otros elementos de Q1 son 0. En varias realizaciones, los elementos diagonales (en la fila 1, columna 1 y la fila 2, columna 2) de Q2 toman los valores de 10^{-2} o 10^{-1} , y los otros elementos de Q2 son 0. En algunas realizaciones, las mediciones z_k se hacen una vez por segundo, es decir, el intervalo de tiempo discreto indexado por k es un segundo. En varias de las realizaciones anteriormente mencionadas en las que el intervalo de medición es un segundo, la señal de alarma 46, una vez activada por la lógica de alarma 42, permanece activa durante un periodo de tiempo que oscila de uno a cinco de los intervalos de medición, y luego se inactiva por la lógica de alarma 42.

Algunas realizaciones explotan el hecho de que una secuencia 45 de residuos del filtro (o las medidas de distancia correspondientes) se puede esperar generalmente que se parezca al ruido blanco en ausencia de un cambio brusco en el estado del sistema. Si sucede un cambio brusco, una o más características estáticas (por ejemplo, la media y/o la varianza) asociadas con la secuencia de residuos (o las medidas de distancia correspondientes) cambiarán en modo brusco de la misma manera, y este cambio en la(s) característica(s) estáticas se puede detectar por la lógica de alarma 42. Esto se conoce comúnmente como una prueba de blancura, porque la lógica de alarma 42 detecta las desviaciones de la característica de ruido blanco que se espera de la secuencia 45 exhiba.

Como se mencionó anteriormente, algunas realizaciones usan una medida de distancia que se calcula como una representación adecuadamente normalizada del residuo del filtro correspondiente en el tiempo k , por ejemplo:

$$s_k = \frac{z_k - H_k \hat{x}_k^-}{\sqrt{H_k P_k^- H_k^T + R_k}} \quad (10)$$

El numerador de la medida de distancia ejemplar S_k representa el residuo del filtro en el tiempo k . El denominador normaliza el residuo del filtro a la varianza unidad. La expresión bajo el signo radical en el denominador es la misma que la expresión en el paréntesis en la Ecuación 6 anterior (la ecuación que define la ganancia de Kalman K_k). En algunas realizaciones, la medida de distancia S_k se usa para construir la siguiente estadística de prueba para el tiempo k :

$$g_k^{pos} = \max(g_{k-1}^{pos} + s_k - v, 0) \quad (11)$$

$$\text{alarma si } g_k^{pos} > h$$

Esta estadística de prueba, comúnmente conocida como una estadística de prueba de suma acumulativa (CUSUM), es un ejemplo de una estadística que se puede usar para implementar una prueba de blancura. La estadística de prueba CUSUM detecta una tendencia sistemática ascendente del residuo del filtro $z - Hx$. La estadística de prueba se inicia en $g_0 = 0$. En la Ecuación 11, v se usa para designar un parámetro de diseño conocido como el parámetro de deriva. Si la medida de la distancia S_k es menor que la deriva v , entonces la medida de distancia no contribuirá a la estadística de prueba. El valor elegido de v es un indicador para el que se puede considerar como la desviación normal/aleatoria entre la medición y la predicción. Después de cada iteración, es decir, después de cada paso de tiempo discreto, se aplica una regla de parada. La regla de parada, mostrada anteriormente inmediatamente por debajo de la Ecuación 11, compara la estadística de prueba con un umbral h . Si la estadística de prueba excede el umbral h , entonces se emite una alarma.

Debido a que la medición de distancia S_k puede ser o bien positiva o bien negativa, algunas realizaciones usan una prueba CUSUM de dos caras. La prueba de dos caras usa la estadística de prueba negativa definida más adelante por la Ecuación 12, junto con la regla de parada asociada mostrada inmediatamente por debajo de la Ecuación 12, en combinación con la estadística de prueba positiva y la regla de parada asociada con la Ecuación 11, de manera que se puede hacer el seguimiento tanto de las tendencias sistemáticas ascendentes como descendentes del residuo del filtro:

$$g_k^{neg} = \min(g_{k-1}^{neg} + s_k + v, 0) \quad (12)$$

$$\text{alarma si } g_k^{neg} < -h$$

Los parámetros de diseño h y v descritos anteriormente afectan al rendimiento de la prueba CUSLTM en términos de tasa de alarmas falsas (FAR) y tiempo medio para la detección (MTD). Varias realizaciones usan varios valores de parámetros de diseño, dependiendo de qué requerimientos tienen que ser cumplidos. Por ejemplo, en varias

realizaciones, el parámetro de deriva v toma los valores en una gama desde aproximadamente 10^{-4} a aproximadamente 10 (dependiendo del valor umbral elegido h y otros aspectos tales como la FAR y el MTD deseados). En varias realizaciones, el parámetro umbral h toma valores en una gama desde aproximadamente 10^{-3} a aproximadamente 40 (dependiendo del valor de deriva elegido v y otros aspectos tales como la FAR y el MTD deseados). Algunas realizaciones usan los siguientes valores de parámetros de diseño: deriva $v = 0,5$; y umbral $h = 10$. La regla de parada señala una alarma si la estadística de prueba g_k excede el umbral especificado h (o $-h$). En varias realizaciones, la estadística de prueba positiva y la estadística de prueba negativa usan distintos valores para sus respectivos parámetros de deriva y/o para sus respectivos parámetros umbrales.

La Figura 5 ilustra en forma de diagrama en más detalle la lógica de alarma 42 de la Figura 4 de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención que implementan la prueba de suma acumulativa descrita anteriormente. En 45, se recibe una secuencia de las medidas de distancia anteriormente mencionadas S_k desde el combinador 40 (ver también la Figura 4), y se pasa a la lógica positiva 53 y la lógica negativa 54. La lógica positiva 53 calcula la estadística de prueba positiva de la Ecuación 10, e implementa la prueba umbral positiva correspondiente. La lógica negativa 54 calcula la estadística de prueba negativa de la Ecuación 11 e implementa la prueba umbral negativa correspondiente. Si o bien la lógica positiva 53 o bien la lógica negativa 54 desencadena una alarma, en 55 o 56, respectivamente, entonces la señal de alarma 46 (ver también la Figura 4) se activa por la lógica OR 57. La lógica positiva 53 y la lógica negativa 54 funcionan concurrentemente para detectar cualquier nueva tendencia (por ejemplo, cualquier desviación consistente del valor de expectativa 0).

Varios detectores de cambios se implementan en varias realizaciones de la invención. Los ejemplos de tales realizaciones se ilustran en forma de diagrama en la Figura 6. Las líneas quebradas en la Figura 6 ilustran que las realizaciones usan varios tipos de detectores de cambios en conjunto con el filtro 26 (ver también la Figura 2). La Figura 6 ilustra varias realizaciones que implementan varias técnicas de detección de cambios, tales como relaciones y marginalización de probabilidades 61, ventanas deslizantes 62, bancos de filtros 63, modelos múltiples 64, y pruebas de consistencia algebraicas 65.

Un número de los detectores de cambios mostrados en la Figura 6 también se puede incluir en la familia de técnicas de detección de cambios estadísticos que usan la prueba de hipótesis. Una de estas técnicas es la prueba de Relación de Probabilidad Generalizada (GLR). La prueba de GLR es bien conocida en la técnica de detección de cambios, como se describe, por ejemplo, en los siguientes documentos, los cuales se incorporan aquí dentro por referencia: A. S. Willsky y H.L. Jones, "Un planteamiento de relación de probabilidad generalizada a la detección y estimación de saltos en sistemas lineales", Transacciones en Control Automático del IEEE, páginas 108-112 (1976); y E. Y. Chow, "Estudios Analíticos de la Relación de Probabilidad Generalizada para Detección de Fallos", Informe del MIT ESL-R-645 (1976). La prueba de GLR emplea filtros paralelos y entrega una estimación del tiempo y la magnitud del cambio. La prueba de GLR hace uso de una medida de la relación de probabilidad como la estadística de prueba, la cual se usa para decidir si ha sucedido o no un cambio. La relación de probabilidad se ha visto, para ciertas aplicaciones, que es la estadística de prueba óptima cuando se prueba una hipótesis H_0 de que no ha ocurrido ningún cambio frente a una hipótesis $H_1(\theta, v)$ de que un cambio de la magnitud conocida v ocurrió en un instante de cambio. En este caso, H_0 y H_1 son simples hipótesis y la prueba de la Relación de Probabilidad (LR) se usa para decidir entre ellas.

La prueba de GLR es una extensión de la prueba de LR para incluir las hipótesis compuestas (donde la simple hipótesis H_0 se prueba frente a varias hipótesis alternativas, es decir H_1 es una hipótesis compuesta, una para cada instante de cambio θ). La prueba de GLR básicamente compara las probabilidades más altas que son obtenibles bajo las respectivas hipótesis. Esto se puede ver como la estimación de un parámetro que usa un estimador de máxima probabilidad bajo la comparación en forma de parejas de distintas H_1 y la hipótesis H_0 , y que usa el parámetro estimado para construir y aplicar una prueba de probabilidad regular. Las hipótesis son:

H_0 : ningún cambio
 $H_1(\theta, v)$: un cambio de la magnitud de v en el instante θ

donde v y θ son desconocidos (que son inferidos por el método).

Por claridad y conveniencia de la exposición, la siguiente descripción de la prueba de GLR usa el convenio de notación de situar los argumentos asociados con las diversas señales en los paréntesis, más bien que continuar con la notación de subíndices usada en las Ecuaciones 1-10 anteriores. La prueba de GLR hace uso de una maximización tanto sobre v como θ , y las estimaciones obtenidas se usan en una prueba de LR regular, donde la relación de probabilidad del logaritmo se compara con un umbral de decisión elegido. De esta manera, la prueba de GLR decide que ha sucedido un cambio si cualquiera de una pluralidad de valores calculados de una estadística de prueba excede un valor umbral. El valor umbral en la prueba de GLR determina cuánto más probable debe ser la hipótesis alternativa H_1 antes de que sea elegida sobre la hipótesis nula H_0 .

La estadística de prueba de GLR se puede definir como:

$$l = 2 \log \frac{p(\gamma(1), \dots, \gamma(k) | H_1)}{p(\gamma(1), \dots, \gamma(k) | H_0)} \quad (13)$$

donde $\gamma(1), \dots, \gamma(k)$ son los residuos del filtro en los instantes discretos $1 \dots k$, respectivamente. Estos residuos del filtro son los mismos que se definen por el numerador en la Ecuación 10 anterior. La estadística de prueba l es una función del último instante bajo consideración, k (el cual es conocido), así como de la magnitud del cambio v y el instante del cambio θ (ambos de los cuales son desconocidos). En la Ecuación 13, las probabilidades para la secuencia observada de los residuos del filtro $(\gamma(1), \dots, \gamma(k))$ en los instantes $1 \dots k$, bajo la hipótesis H_0 y H_1 , respectivamente, se presentan como densidades de probabilidad condicional.

En algunas realizaciones, la estadística de prueba l se calcula como:

$$l(k, \theta) = d^T(k, \theta) \cdot C^{-1}(k, \theta) \cdot d(k, \theta)$$

donde

$$d(k, \theta) = \sum_{j=\theta}^k G^T(j, \theta) \cdot V^{-1}(j) \cdot \gamma(j).$$

Con respecto a la matriz V^{-1} en $d(k, \theta)$, señalar que la matriz correspondiente V se define por la expresión en el paréntesis en la Ecuación 6 anterior (la ecuación para la ganancia de Kalman), y está disponible a partir del filtro 26. Con respecto a la matriz G^T en $d(k, \theta)$, la matriz correspondiente G representa el efecto en el residuo del filtro en el instante j dado un cambio repentino v en el estado del sistema en el instante θ , y se puede definir como sigue:

$$G(j, \theta) = 0 \quad \text{para } j < \theta$$

$$G(j, \theta) = H(j) \cdot [A(j, \theta) - A(j, j-1) \cdot F(j-1, \theta)] \quad \text{para } j \geq \theta$$

A partir de la discusión del diseño del filtro anteriormente mencionado, recordar que $A = I$ en todos los instantes discretos j . También con respecto a $G(j, \theta)$, F se puede definir como sigue:

$$F(n, \theta) = 0 \quad \text{para } n < \theta$$

$$F(n, \theta) = \sum_{i=\theta}^n \rho(n, i) \cdot K(i) \cdot H(i) \cdot A(i, \theta) \quad \text{para } n \geq \theta.$$

En $F(n, \theta)$, K corresponde a la ganancia de Kalman definida anteriormente en la Ecuación 6. También en $F(n, \theta)$, H se puede definir como $H(n) = [u(n) \ 1]$, donde $u(n)$ es la tasa de tráfico de sondeo en el tiempo n , como se describe anteriormente, así $H(n)$ está disponible a partir del filtro 26. Además en $F(n, \theta)$, $\rho(n, i)$ se puede definir como

$$\rho(n, i) = \rho(n-1) \cdot \rho(n-2) \cdot K \cdot \rho(i),$$

donde, por ejemplo,

$$\rho(n-1) = [I - K(n) \cdot H(n)] \cdot A(n-1),$$

o más explícitamente, $\rho(m) = [I - K(m+1) \cdot H(m+1)] \cdot A(m)$.

De esta manera, los componentes de ρ así contenidos en $F(n, \theta)$ son conocidos o están disponibles a partir del filtro 26. Por lo tanto, toda la información necesaria para calcular $F(n, \theta)$, y de esta manera $G(j, \theta)$, está disponible a partir del filtro 26. Recordando que V está disponible a partir del filtro 26, toda la información necesaria para calcular $d(k, \theta)$ está disponible a partir del filtro 26.

La componente restante de $l(k, \theta)$, la matriz $C^{-1}(k, \theta)$, es la matriz de covarianza del error de la estimación de máxima probabilidad v , que describe el cambio en el tiempo $\hat{\theta}$. Es la inversa de la matriz de información de cambios:

$$C(k, \theta) = \sum_{j=\theta}^k G^T(j, \theta) \cdot V^{-1}(j) \cdot G(j, \theta)$$

Por consiguiente, toda la información necesaria para calcular $C(k, \theta)$ está disponible a partir del filtro 26. De esta manera, en la medida que $d(k, \theta)$ y $C(k, \theta)$, se pueden calcular a partir de la información que se conoce y/o está disponible a partir del filtro 26, se puede calcular $l(k, \theta)$, a partir de la información conocida y/o disponible.

En algunas realizaciones, en cada instante discreto k , se calcula una estadística de prueba $l(k, \theta)$ para cada valor de θ dentro de una gama de interés. En algunas realizaciones, la gama de interés para θ es $1 \leq \theta \leq k$. De manera más general, en varias realizaciones, la gama de interés para θ es $k-M \leq \theta \leq k-N$, donde M y N definen una ventana de tiempo deseada para el análisis de la detección del cambio. Se puede ver que la gama anteriormente mencionada $1 \leq \theta \leq k$ corresponde a $M = k - 1$ y $N = 0$. La estadística de prueba que tiene el máximo valor en el conjunto calculado se elige, y se compara con un valor umbral. Si el valor máximo excede el valor umbral, entonces se emite una alarma. Como se describió anteriormente con respecto al umbral CUSUM, el umbral de la GLR se puede ver como una solución de compromiso entre la FAR y el MTD. En algunas realizaciones, por lo tanto, el umbral se selecciona en base a aspectos tales como la FAR y el MTD deseados. Como ejemplos, los valores umbrales tales como 5, 10, 15, etc., se usan en varias realizaciones.

El instante de cambio más probable se da por

$$\hat{\theta}(k) = \arg \max_{1 \leq \theta \leq k} l(k, \theta),$$

y el cambio más probable en el tiempo $\hat{\theta}(k)$ se da por

$$\hat{v} = C^{-1}(k, \hat{\theta}(k)) \cdot d(k, \hat{\theta}(k)).$$

Se puede mostrar que la estadística de prueba $l(k, \theta, v)$ bajo la hipótesis nula exhibe una distribución χ^2 . Por lo tanto, dado un nivel de confianza deseado, se puede estimar en principio un umbral adecuado usando tablas estadísticas.

La Figura 7 ilustra en forma de diagrama en más detalle la lógica de alarma 42 de la Figura 4 de acuerdo con las realizaciones ejemplares de la invención que implementan la prueba de GLR descrita anteriormente. En la Figura 7, la lógica de alarma 42 incluye la lógica del filtro 71, por ejemplo, una pluralidad de filtros paralelos como se indica. Para un instante discreto dado k , cada uno de los filtros paralelos produce la estadística de prueba $l(k, \theta)$ para un valor correspondiente respectivamente de θ dentro del intervalo de interés para θ . De esta manera, se usan un total de $M - N + 1$ filtros paralelos para implementar una gama de $k - M \leq \theta \leq k - N$. Cada uno de los filtros recibe los residuos 45 desde el combinador 40 (ver también la Figura 4), y recibe además desde el filtro 26 la información restante (descrita en detalle anteriormente y designada de manera general en 70 en la Figura 7) necesaria para calcular la estadística de prueba asociada $l(k, \theta)$. Los $M - N + 1$ filtros en 71 ponen a la salida $M - N + 1$ estadísticas de prueba $l(k, \theta)$, designadas de manera general en 72. En 73, la lógica de máxima selección selecciona el valor máximo de entre las $M - N + 1$ estadísticas de prueba $l(k, \theta)$, y pone a la salida esta estadística de prueba de valor máximo en 74. La lógica de comparación del umbral 75 compara la estadística de prueba de valor máximo 74 con un valor umbral. Si la estadística de prueba de valor máximo 74 excede el valor umbral, entonces la lógica de comparación del umbral 75 activa la señal de alarma 46 (ver también la Figura 4).

La prueba de la Relación de Probabilidad Marginalizada (MLR) es una técnica de detección de cambios que se relaciona con la técnica de GLR y es aplicable de manera general en las mismas situaciones en las que la GLR es aplicable. En la prueba de la MLR, la magnitud de cambio se considera como un parámetro de molestia estocástica que se elimina mediante la marginalización, en lugar de la estimación como en la prueba de la GLR.

En algunas realizaciones, el aparato de detección de cambios (por ejemplo, cualquiera de aquéllos mostrados en las Figuras 4-7) se implementa en el mismo nodo de red donde está el filtro 26 de la Figura 2. En otras realizaciones, el aparato de detección de cambios se implementa en un nodo (o nodos) de red distintos del nodo (o nodos) de red en el(los) cual(es) se implementa el filtro 26, y todos los nodos implicados se acoplan adecuadamente para soportar las comunicaciones mostradas en y descritas con respecto a las Figuras 4-7.

Los trabajadores en la técnica notarán que las realizaciones de la invención anteriormente descritas son aplicables en muchas áreas, dos ejemplos de las cuales son la monitorización de red y las aplicaciones adaptativas. Por ejemplo, los operadores de red pueden usar la invención para monitorizar de manera fiable el estado de sus redes. Como un ejemplo práctico, si el enlace de transmisión se cae o la carga de tráfico cambia repentinamente, es deseable para los operadores recibir una indicación rápida y evidente del evento, de manera que se pueda tomar la acción adecuada. Como ejemplo en el área de las aplicaciones adaptativas, las aplicaciones de audio/vídeo en los ordenadores centrales extremos pueden usar estimación del ancho de banda basada en filtros para adaptar dinámicamente el códec a la disponibilidad de ancho de banda extremo a extremo actual. El rendimiento se puede mejorar por la capacidad descrita anteriormente de adaptar rápidamente a cambios repentinos en la red.

Será evidente para los trabajadores en la técnica que, en varias realizaciones, la invención se puede implementar en componentes físicos, componentes lógicos, o una combinación de componentes físicos y componentes lógicos.

Aunque las realizaciones ejemplares de la invención se han descrito anteriormente en detalle, éstas no limitan el alcance de la invención, el cual se puede practicar en una variedad de realizaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato para evaluar el ancho de banda disponible en un camino de transferencia de datos que transfiere datos entre los nodos de comunicación de datos de una red de datos en la que los paquetes de sondeo se transmiten a través del camino de red en un patrón específico, que comprende:
 - 5 un filtro (26) para acoplar al camino de transferencia de datos, dicho filtro configurado para realizar una operación de filtro durante el funcionamiento en tiempo real del camino de transferencia de datos para producir información en tiempo real para usar en la estimación del ancho de banda disponible;
 - la lógica (28) acoplada a dicho filtro para analizar dicha información en tiempo real, el aparato **caracterizado porque** comprende:
 - 10 un ajustador (40, 42, 43) que comprende un selector (43) acoplado a dicha lógica y dicho filtro para ajustar selectivamente dicha operación de filtro en respuesta a dicha lógica, seleccionando los parámetros del filtro a partir de un primer conjunto de parámetros del filtro que proporcionan estabilidad e insensibilidad al ruido, o a partir de un segundo conjunto alternativo de parámetros de filtro que proporciona una rápida adaptación a un nuevo estado del sistema, y
 - 15 un detector de cambios para proporcionar una indicación de alarma al selector (43) en un cambio brusco en el estado del sistema, en el que los parámetros del filtro se ajustan temporalmente a partir del primer conjunto de parámetros a dicho segundo conjunto de parámetros.
2. El aparato de la Reivindicación 1, en el que dicha información en tiempo real incluye las estimaciones de parámetros en tiempo real para usar en la estimación del ancho de banda disponible, y en el que dicha operación de filtro usa mediciones en tiempo real las cuales se relacionan con el ancho de banda disponible y las cuales corresponden respectivamente a dichas estimaciones de parámetros en tiempo real, dicha lógica que incluye un combinador (40) para la combinación de las mediciones en tiempo real con las estimaciones de parámetros en tiempo real correspondientes respectivamente para producir información de combinación, y dicha lógica configurada para analizar estadísticamente dicha información de combinación.
3. El aparato de la Reivindicación 2, en el que dicha información de combinación es indicativa de las comparaciones respectivas de dichas mediciones en tiempo real con las estimaciones de parámetros en tiempo real correspondientes respectivamente.
4. El aparato de la Reivindicación 3, en el que dicha lógica se configura para calcular una estadística de prueba en base a dicha información de combinación, y para comparar dicha estadística de prueba con un umbral.
5. El aparato de la Reivindicación 4, en el que dicha lógica se configura para analizar una relación entre la primera y segunda probabilidades, en la que dicha primera probabilidad es una probabilidad de que dicha información de combinación es indicativa de una primera característica en tiempo real del ancho de banda disponible, y en la que dicha segunda probabilidad es una probabilidad de que dicha información de combinación es indicativa de una segunda característica en tiempo real del ancho de banda disponible.
6. El aparato de la Reivindicación 4, en el que dicha lógica se configura para detectar si ha ocurrido un cambio en una característica estadística asociada con dicha información de combinación.
7. El aparato de la Reivindicación 3, en el que dicha lógica se configura para calcular una pluralidad de estadísticas de prueba en base a dicha información de combinación, seleccionar una de dichas estadísticas de prueba que tiene un valor máximo entre dichas estadísticas de prueba, y comparar dicha una estadística de prueba con dicho umbral.
8. El aparato de la Reivindicación 2, en el que dicha lógica se configura para aplicar una prueba de blancura con respecto a dicha información de combinación.
9. El aparato de la Reivindicación 2, en el que dicha lógica se configura para aplicar una prueba de suma acumulativa con respecto a dicha información de combinación.
10. El aparato de la Reivindicación 2, en el que dicha lógica se configura para aplicar una prueba de la Relación de Probabilidad Generalizada con respecto a dicha información de combinación.
11. El aparato de la Reivindicación 2, en el que dicha lógica incluye una pluralidad de filtros paralelos (71).
12. El aparato de la Reivindicación 2, en el que dicho ajustador se configura para ajustar dicho funcionamiento del filtro para aumentar temporalmente la sensibilidad del mismo a los cambios en el ancho de banda disponible.
13. El aparato de la Reivindicación 1, en el que dicho filtro incluye un filtro de Kalman (26), y dicho ajustador se configura para ajustar un parámetro de covarianza de ruido del proceso proporcionado a dicho filtro de Kalman.

14. El aparato de la Reivindicación 1, en el que dicha lógica se proporciona físicamente de manera separada de dicho filtro en una ubicación físicamente remota de dicho filtro.

15. Un método de evaluación del ancho de banda disponible en un camino de transferencia de datos entre los nodos de comunicación de datos de una red de datos, que comprende:

5 transmitir los paquetes de sondeo en un patrón específico a través del camino de la red, durante la operación en tiempo real del camino de transferencia de datos, usando una operación del filtro (17) para producir una información en tiempo real para usar en la estimación del ancho de banda disponible;

analizar dicha información en tiempo real;

10 ajustar selectivamente (16) dicha operación del filtro en respuesta a dicho análisis, seleccionando los parámetros del filtro a partir de un primer conjunto de parámetros que proporcionan estabilidad e insensibilidad al ruido, o a partir de un segundo conjunto de parámetros, alternativo, que proporcionan una rápida adaptación a un nuevo estado del sistema, y

detectar los cambios en el estado del sistema, y ajustar los parámetros del filtro temporalmente a partir del primer conjunto de parámetros a dicho segundo conjunto de parámetros, en caso de un cambio brusco.

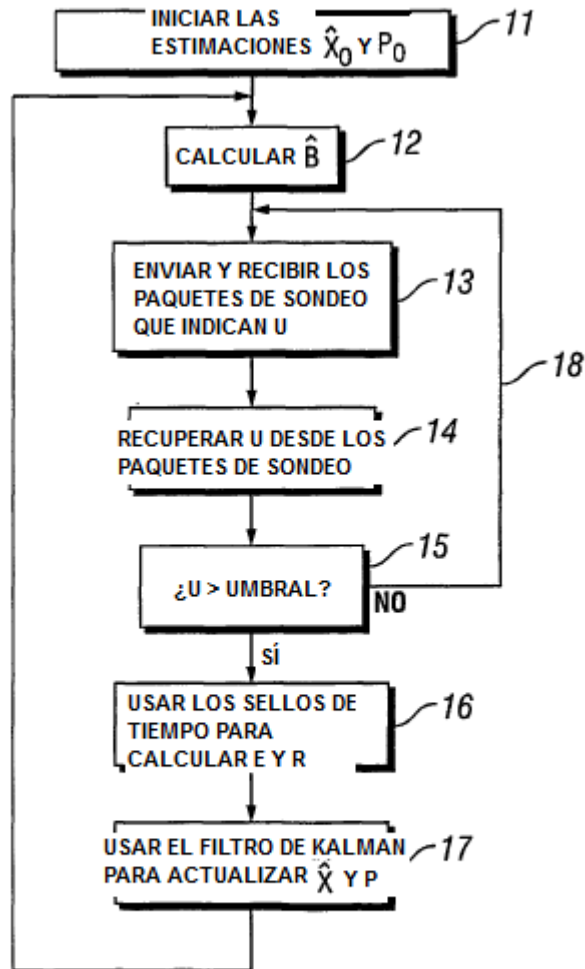


FIG. 1

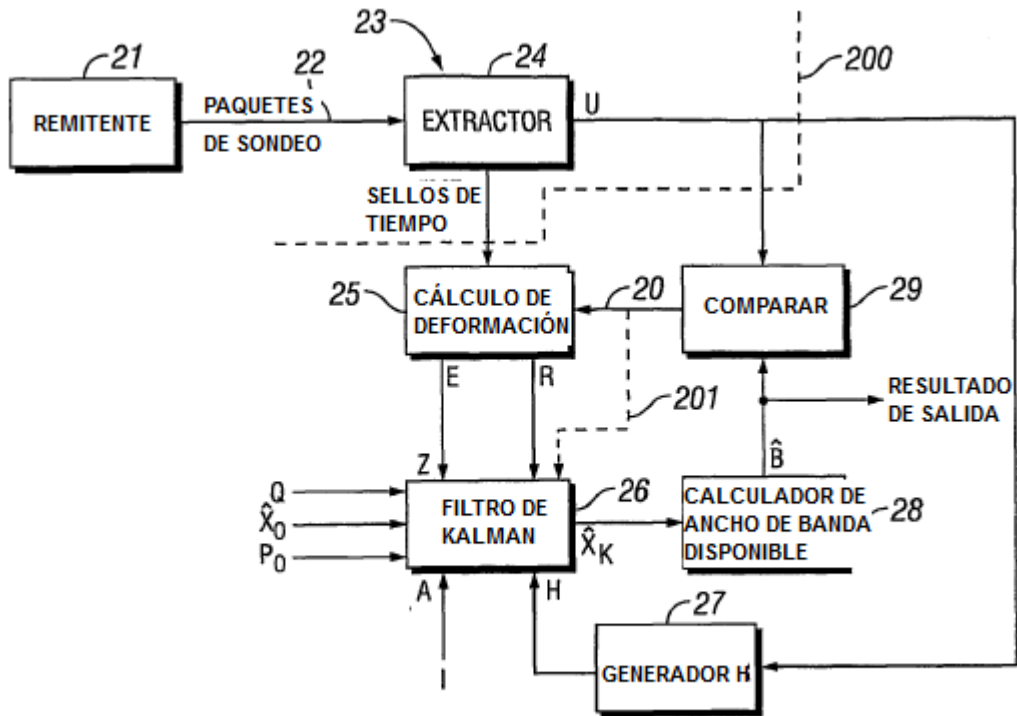


FIG. 2

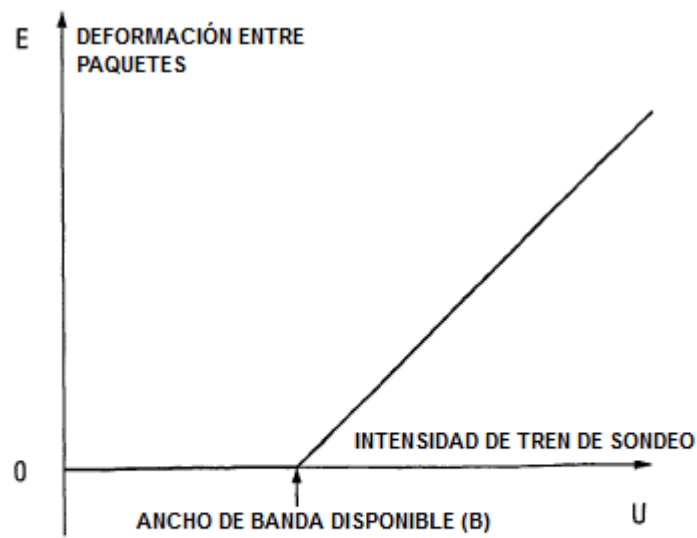


FIG. 3

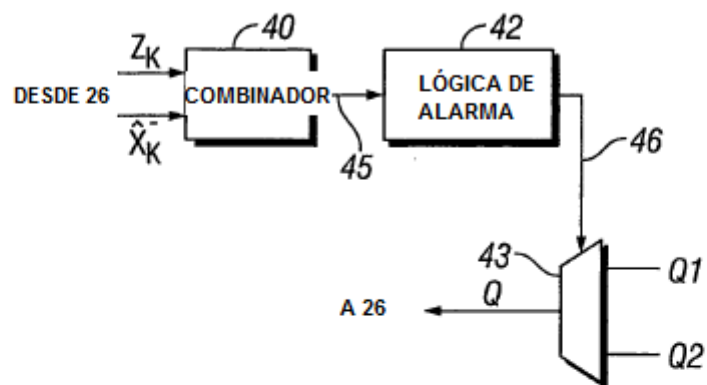


FIG. 4

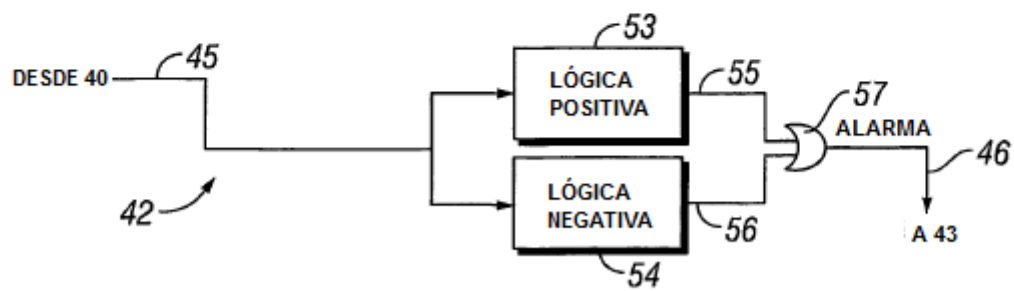


FIG. 5

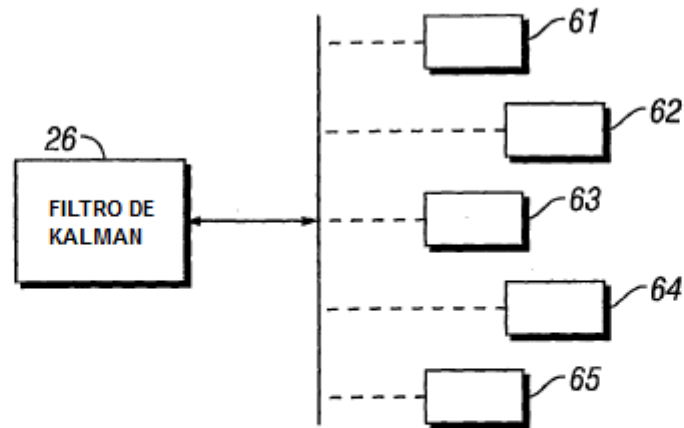


FIG. 6

DETECTORES
DE CAMBIOS

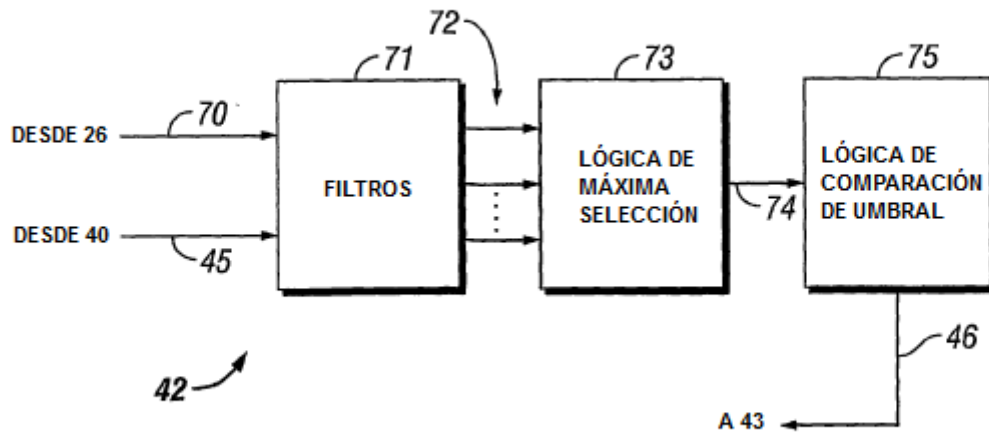


FIG. 7