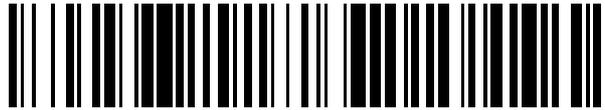


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 439 769**

51 Int. Cl.:

H04B 10/2531 (2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.08.2010 E 10008263 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.11.2013 EP 2299611**

54 Título: **Retardo de impulsos ópticos, controlado ópticamente y libre de distorsiones**

30 Prioridad:

18.09.2009 DE 102009041849

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

24.01.2014

73 Titular/es:

**DEUTSCHE TELEKOM AG (100.0%)
Friedrich-Ebert-Allee 140
53113 Bonn, DE**

72 Inventor/es:

**WIATREK, ANDRZEJ y
SCHNEIDER, THOMAS, PROF.**

74 Agente/Representante:

CARBONELL CALLICO, Josep

ES 2 439 769 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

Retardo de impulsos ópticos, controlado ópticamente y libre de distorsiones

5 La invención se refiere a un procedimiento para el retardo de señales ópticas, que se propagan como impulsos en una guía de ondas en una dirección de avance, de manera que en dirección opuesta se acopla una primera radiación de bombeo en la guía de ondas que provoca una dispersión estimulada de Brillouin (SBS) en el rango de longitudes de onda de los impulsos. La invención se refiere también a un sistema para la implementación del procedimiento.

10 La influencia seleccionada en la velocidad de propagación de impulsos ópticos abre un amplio campo para utilidades en el sector de las redes de comunicación óptica, proceso de datos, óptica no lineal, y sistemas ópticos de medición. En este sentido, la realización de almacenamiento intermedio óptico ajustable es un importante progreso para conseguir una red implementada por completo con componentes ópticos. No obstante, el almacenamiento tiene lugar hasta el momento, de manera predominante, mediante componentes eléctricos y siempre con conversión optoelectrónica-óptica. Esta complicación adicional no solamente limita las velocidades de datos máximas de este tipo de redes, sino que aumenta el consumo adicional de energía, por lo que aumenta, asimismo, la proporción de CO₂ de la tecnología de información y comunicación.

20 Un avance en el sentido de almacenamiento, es el retardo de impulsos ópticos para el que existen varios procedimientos. Por una parte, estos procedimientos se refieren al tiempo de duración de una señal en una guía de ondas o resonador y, por otra, a la generación de una intensa dispersión. El primer procedimiento posibilita solamente tiempos fijos de retardo, que corresponden a un múltiplo de la duración del impulso, mientras que el tiempo de retardo puede ser variado de manera continua en el segundo procedimiento estando, no obstante, relacionado siempre con una distorsión del impulso. Un procedimiento simple para la generación de una dispersión artificial intensa es la Dispersión de Brillouin ("SBS") estimulada que, al contrario que en otros sistemas, se basa en una dispersión Raman o transparencia electromagnética inducida, presentando una ventaja determinante: por una parte, se requieren solamente unos pocos mW en la potencia de bombeo para conseguir largos tiempos de retardo. Por otra, la SBS funciona en toda la gama de transparencia de todas las fibras ópticas y posibilita de este modo la utilización de equipos ópticos estándar de las redes actuales TK y redes de datos. Además, la amplitud de la banda de retardo del SBS, es ajustable de modo flexible en amplias zonas.

35 Tal como en todos los sistemas basados en la dispersión, el retardo se relaciona, no obstante, en todos los casos, con una distorsión de los impulsos, que se traduce ante todo en una ampliación de los impulsos. En este caso, las exigencias de calidad de las correspondientes utilidades limitan la ampliación temporal de impulsos y por esta razón, también el tiempo de retardo. La propia ampliación tiene dos causas: por una parte, el comportamiento de paso banda del sistema SBS conduce a una limitación espectral del impulso, y por otra, la fase del impulso es fuertemente distorsionada, ante todo en el borde espectral por falta de linealidad.

40 Los sistemas utilizados hasta el momento para evitar la ampliación del impulso para retardos de tiempo elevados, se refieren ante todo a una adecuación especial del espectro de retardo. En este caso, el retardo de tiempo es, en sí mismo, proporcional a la potencia de bombeo, e inversamente proporcional a la amplitud de banda del retardo. Las potencias de bombeo más elevadas pueden compensar solamente de forma limitada, el aumento de la amplitud de banda de retardo, puesto que los efectos de saturación en un sistema SBS limitan el tiempo de retardo máximo. Se puede conseguir ayuda por una disposición en cascada de varios sistemas. Así, por ejemplo, se ha conseguido con ayuda de un sistema de cuatro etapas, un retardo de 3,8 Bit. No obstante, se añade también una pequeña dispersión de impulso de etapa a etapa, lo que en dicho caso condujo a una ampliación de hasta 2,55 veces el impulso de entrada. Asimismo, una adecuación especial del espectro de retardo conduce finalmente, como máximo, a una optimización del sistema correspondiente, de manera que la ampliación del impulso no puede ser evitada tampoco en este caso de modo completo.

55 En el artículo de A. Wiatrek y otros, "Zero-broadening measurement in Brillouin based slow-light delays", Optics Express, Vol. 17, No. 2, S. 797 – 802, Enero 2009, se da a conocer que es posible, en un sistema no lineal, retardar un impulso sin ampliarlo temporalmente. Este retardo conduce, no obstante, a una distorsión de la forma del impulso. Para impulsos individuales, por ejemplo, en utilización para técnicas de medición, es suficiente el simple mantenimiento de la duración del impulso. En redes de datos, la distorsión adicional del impulso conduce, no obstante, a fallos de Bits no deseables y, por lo tanto, a una reducción significativa del rendimiento del sistema.

60 El artículo de T Schneider y otros "Distorsion reduction in cascaded slow light delays" describe una disposición experimental en la que impulsos de luz de entrada son retardados en una disposición de retardo de dos etapas y se constituye la disposición de retardo mediante fibras. Las fibras reciben la acción de su propia radiación de bombeo de una misma fuente de bombeo. La radiación del bombeo puede ser facilitada también mediante diferentes fuentes de bombeo.

Es objetivo de la presente invención conseguir un procedimiento técnicamente simple para llevar a cabo y un sistema óptico apropiado para su implementación, con el cual es posible retardar con la menor distorsión posible un flujo de datos de manera que se conservan la forma del impulso y la amplitud del mismo.

5 Estos objetivos se consiguen mediante el procedimiento que tiene las características de la reivindicación 1 y el sistema óptico de la reivindicación 6. Se describen formas de realización específicas en las correspondientes reivindicaciones dependientes.

10 Los datos básicos de la invención consisten, dentro de un sistema de transmisión, en prever dos etapas o "fases" de manera que la primera etapa se traduce en un retardo convencional de los impulsos, basado en SBS, mientras que en la segunda etapa, se realiza un proceso de transmisión en sentido inverso dentro del sistema. A causa del comportamiento de transmisión inverso a saber en amplitud y fase con respecto a la primera etapa, se produce como suma un sistema global lineal. El concepto esencial básico de la invención consiste, por lo tanto, en la generación de un sistema de filtrado completamente lineal para el retardo sin distorsiones de impulsos ópticos
15 mediante un sistema de dos etapas, en el que ambas etapas con comportamiento de transmisión inverso se amplían en un sistema global lineal. Mediante un proceso de este tipo, de acuerdo con la invención, se realiza un retardo que, como mínimo, se encuentra casi libre de distorsiones, de manera que es posible la utilización de este sistema "Slow-Light" (luz lenta) en sistemas de redes de datos y de comunicaciones.

20 El concepto básico de la invención se basa en el reconocimiento de las partes de impulso atenuadas en el borde del espectro son amplificadas más fuertemente que las partes del centro del impulso. Este efecto actúa contra la limitación espectral mediante la primera etapa de retardo. Puesto que la influencia del espectro de impulso y la fase del impulso se encuentran directamente relacionadas por el sistema SBS, tal como se desprende de las relaciones de Kramers-Kronig tiene lugar en la segunda etapa una linealización adicional de la fase del impulso, que actúa
25 contra ambas causas de la ampliación. Además, el impulso es retardado también en esta segunda etapa. Mediante la disposición en cascada de estos sistemas, se pueden conseguir, en principio, los retardos deseados sin ampliación adicional ni distorsión de los impulsos.

30 Para la realización de la segunda etapa, es decir, el segundo paso, se prevén dos alternativas. La primera se basa en un sistema saturado, tal como se describe en el artículo antes mencionado de A. Wiatrek y otros. Según aquel, a causa de la saturación, las líneas espectrales más potentes se amplifican menos que las más débiles. Al contrario que en lo que se da a conocer en dicho artículo, se ajusta de manera seleccionada el grado de saturación adicionalmente sobre la potencia de la señal de entrada, en especial, mediante una atenuación variable entre ambos sistemas-fases. El segundo sistema utiliza un sistema lineal no saturado, en el que el comportamiento de
35 transmisión es desarrollado de manera seleccionada mediante la superposición de dos amplitudes de banda retardada desplazadas espectralmente.

40 De modo general, el sistema utiliza el efecto óptico no lineal de la dispersión Brillouin estimulada (SBS), en el que tiene lugar una acción recíproca de la luz de un láser de bombeo con el medio de propagación de la guía de luz, en especial, la fibra de vidrio utilizada en este caso. En el SBS, la modificación local de la intensidad del campo de bombeo conduce a la variación de la densidad de material que influye en el índice de refracción local. La onda de modulación de densidad que se produce, genera una retícula de índices de refracción y se desplaza con la velocidad del sonido por el medio en la dirección de la onda de bombeo. En base a la velocidad relativa de ambas ondas y del efecto Doppler, se llega a un desplazamiento hacia atrás de la frecuencia de las partes dispersas de la onda de
45 bombeo ("frecuencia de desplazamiento Brillouin"). La magnitud de la frecuencia de desplazamiento Brillouin depende del material del medio de propagación y asciende en las fibras de vidrio estándar aproximadamente 11 GHz para una longitud de la onda de bombeo de 1550 nm. Si en este caso se acopla la onda en dirección contraria, la onda de señal en separación de frecuencia de la frecuencia de desplazamiento Brillouin se extraerá energía de la onda de bombeo por el proceso y se llega a un crecimiento exponencial de la potencia de la onda de señal, y de este modo a un proceso de amplificación que queda limitado por la propia potencia de bombeo ("Saturación").
50

Además de la amplificación tiene lugar, con dependencia de la SBS, no obstante, también una modificación de la fase de la onda de señal. La relación entre amplificación y variación de fase se describe mediante la relación de Kramers-Kronig y conduce, en el caso de SBS, a un retardo de la señal ("luz lenta" - "slow-light"). La anchura de
55 banda del espectro de amplificación y de retardo, se produce por el despliegue del espectro de bombeo con el espectro natural Brillouin dependiente del material. Con la previsión de una onda de bombeo de banda estrecha, el espectro que se produce en fibra de vidrio utilizada tiene una magnitud de unos 30 MHz. La ampliación tendrá lugar de manera simple mediante modulación directa del láser de bombeo con una señal de ruido con la que se conseguirá la ampliación del espectro del láser de bombeo.
60

Un impulso, cuyo espectro se encuentra dentro de la anchura de banda SBS, es retardado de manera correspondiente, de manera que el retardo del impulso en la zona lineal de trabajo es directamente proporcional a la potencia de bombeo, e indirectamente proporcional a la anchura de banda de retardo. La distorsión o ampliación del impulso tiene dos causas: una de ellas es la pequeña amplificación con respecto a la atenuación de los flancos del
65 espectro del impulso. La transformación de Fourier muestra que una reducción de la amplitud espectral conduce a

un aumento de la amplitud temporal. La segunda causa reside en el desarrollo de fase no lineal en la zona del borde del espectro de retardo. La ampliación de este espectro minimiza por una parte las distorsiones pero conduce, no obstante, en base a la mencionada proporcionalidad, a una reducción del tiempo de retardo. Este puede ser compensado mediante un aumento de la potencia de bombeo, hasta que para potencias de bombeo elevadas, el proceso llega a la saturación ("agotamiento de la bomba").

Según la invención, la ampliación del impulso viene impedida por un sistema de dos etapas. La primera etapa consiste en el sistema anterior que se ha descrito basado en SBS, tal como se ha explicado, amplía el impulso. La característica de la segunda etapa será ajustada exactamente inversa a la primera, llegando a una inversión de la ampliación con respecto a una compresión de impulso y adicionalmente a un retardo de tiempo. Una característica de este tipo se puede alcanzar mediante una saturación realizada con el centro del espectro del impulso, mucho menos amplificado que el borde. Una segunda posibilidad consiste en la superposición de dos contra-espectros SBS desplazados espectralmente para conseguir el mencionado comportamiento de ampliación. La adición de las características de ambas etapas conduce, en conjunto, a un sistema general lineal que retarda los impulsos manteniendo la forma y la anchura temporal.

La ventaja esencial del procedimiento objeto de la invención consiste en conseguir un sistema que funciona sin distorsiones para el retardo de impulsos ópticos, que es controlado ópticamente de manera completa. Es ventajoso que el sistema pueda ser realizado con componentes ópticos estándar de la redes de telecomunicación. Estos componentes pueden ser fabricados de manera económica en grandes cantidades. El efecto no lineal del SBS tiene lugar en todas las fibras de vidrio y en la totalidad de su rango de transparencia. Por ello, el sistema puede ser adecuado de manera sencilla a las características correspondientes de la red. Además, para la realización de la primera etapa, se puede utilizar las fibras existentes de un sistema de comunicaciones como medio Brillouin.

A continuación, se explicará en más detalle la invención en base a las figuras 1 a 4, en las que se muestra:

La figura 1: la constitución de un sistema según la invención

La figura 2: formas de impulsos de lugares escogidos del sistema,

La figura 3; espectros de filtrado de puntos de medición escogidos del sistema, y

La figura 4: una realización alternativa de la segunda etapa mediante dos espectros de ganancia SBS superpuestos.

De acuerdo con la figura 1, la fuente de señales 1 guía la señal de datos de un sistema en forma de impulsos retardados, de manera que la fuente de señales es, en especial, el interfaz con respecto a una red de comunicaciones, de manera que la fibra óptica adyacente 2 puede ser ya un componente del sistema de transferencia por transmisión, es decir, sistema de transmisión de datos. El sistema presenta un láser de bombeo 3 coherente, de banda ancha, que será amplificado mediante un amplificador 4 y que es acoplado con intermedio del circulador 5 en sentido contrario a la dirección de propagación de los impulsos (flecha A) en la fibra de vidrio 2. Se ha mostrado un impulso de este tipo como señal de entrada en la figura 2a. Se transmitirá a través del circulador 5 a un elemento atenuador ajustable.

La anchura de banda deseada del láser de bombeo 3 puede ser ajustada mediante una modulación directa con una señal de fondo. La amplificación óptica se puede conseguir mediante un amplificador de fibras dotado con erbio ("EDFA"). La frecuencia portadora del láser de bombeo se ajusta de manera tal que aumenta con respecto a la frecuencia portadora de la señal de fondo en la frecuencia de desplazamiento Brillouin. La fibra de vidrio 2 sirve como medio Brillouin, de manera que, dependiendo de la potencia de bombeo ajustada con intermedio del amplificador óptico 4, alcanza una amplificación y desplazamiento de fase de la señal de datos.

En los diagramas d y e de la figura 3, se ha mostrado la función de transmisión calculada digitalmente en este caso para impulsos de 1,4 ns, una anchura de banda Brillouin de 475 MHz y una potencia de bomba de 10 mW. Los puntos de medición se han caracterizado de manera correspondiente a la figura 1. Es visible que en la zona del borde del espectro de impulsos se pasa a una fuerte reducción de la amplificación (3d) y falta de linealidad en el desplazamiento de fases (3e) El impulso de salida de la primera fase es, tal como se puede apreciar del diagrama 2b, desplazado y ampliado con respecto al impulso de entrada 2a.

En el sistema en el ámbito de la segunda etapa, se ha previsto un láser de bombeo 8 de banda ancha, coherente, que es amplificado mediante el amplificador óptico 9 y acoplado con intermedio del circulador 10 nuevamente en sentido contrario a la dirección de propagación (flecha B) de los impulsos en la fibra de vidrio 7. La amplitud de banda del láser de bombeo 8 es mayor que la amplitud de la señal. Esta segunda etapa será llevada adelante por el amplificador 9 a la zona de saturación del sistema. Dado que el sistema SBS puede ser considerado como amplificador, es posible mediante una elevada potencia de la señal de entrada o mediante elevadas potencias de bombeo, conseguir la saturación. La potencia de la señal será regulada con intermedio del elemento de atenuación 6, y la potencia de la bomba con intermedio del amplificador óptico 9.

En los diagramas f y g de la figura 3, se ha representado nuevamente una función de transmisión calculada digitalmente para el impulso de salida de la primera etapa para una anchura de banda Brillouin de 960 MHz, una

atenuación de la entrada de señal de 10 dB y una señal de la bomba de 20 mW. Tal como se puede apreciar, el comportamiento de la transmisión con respecto a la amplitud y a la fase es inversa con respecto a la primera etapa. La zona de borde espectral es elevada y ampliada con respecto al centro. Con intermedio de circulador 10 la señal será conducida al elemento de atenuación 11. La suma de las funciones de transmisión de ambas etapas, conduce a una función conjunta que, como mínimo, es casi lineal, es decir, a una amplificación regular y a una marcha de las fases que desciende linealmente (diagrama (h) e (i) de la figura 3). De este modo, el impulso de salida del sistema en conjunto corresponde al impulso de entrada retardado.

5

A causa de la saturación de la segunda etapa, el retraso de tiempo se ajustará no con la potencia de la bomba, sino por la anchura de banda de retardo, de manera que una ampliación del ancho de banda conduce a una disminución del retardo de tiempo. El elemento de atenuación 11 sirve para la adecuación de la potencia del impulso de salida en el interfaz 12. Esta puede ser nuevamente la entrada de un sistema óptico sucesivo.

10

La saturación de la segunda etapa comporta dos inconvenientes. Por una parte, se requieren potencias de bomba relativamente elevadas y, por otra, el retardo de tiempo ya no es lineal, dependiendo de la potencia de la bomba, e incluso aumenta con el incremento de la potencia de la bomba. Por esta causa, esta etapa será realizada en una forma de realización ventajosa por transferencia de dos espectros de ganancia SBS desplazados espectralmente, que constituyen la característica de saturación. Puesto que la amplitud y de las fases están relacionadas con la función de superposición mediante las relaciones de Kramers-kronig entre sí, la función de amplificación que se genera de este modo presenta, en el caso de saturación, una idéntica función de fase. El conjunto constructivo mostrado en la figura 4 utiliza, en este caso, el módulo 8 de la figura 1.

15

20

En este caso, el láser de bombeo coherente 21 es modulado externamente mediante el modulador 22. El generador de señal 23 genera la función senoidal necesaria, cuya frecuencia determina la separación del correspondiente espectro de ganancia con respecto al punto cero. El punto de trabajo del modulador 22 se ajusta de manera tal que llega a la anulación de la inercia y se generan solamente las primeras bandas laterales. Para el módulo 22, se puede utilizar un modulador Mach-Zehnder. Es una ventaja de este sistema que el retardo de tiempo en la segunda etapa sea puede ajustar adicionalmente a través de la potencia de bombeo y, en general, se requiere también una potencia de bombeo más reducida para compensar la ampliación de impulso de la primera etapa. La superposición de ambos espectros de ganancia SBS desplazados espectralmente se ha mostrado en el diagrama de la figura 4.

25

30

REIVINDICACIONES

1. procedimiento para el retardo de señales ópticas que se propagan como impulsos en una guía de ondas (2) en dirección de avance, de manera que en una primera etapa, se acopla una primera radiación de bombeo (3) contra la
 5 dirección de propagación en la guía de ondas (2), que provoca la dispersión Brillouin estimulada (“SBS”), en el rango de longitud de onda de los impulsos y, de esta manera, provoca un comportamiento de transmisión en la guía de ondas que resulta en un retardo del impulso,
 caracterizado porque, en una etapa siguiente, mediante acoplamiento en una segunda radiación de bombeo (8), que
 es ajustada en su característica y acoplada en sentido contrario a la dirección de propagación del impulso
 10 modificado por la primera radiación de bombeo (3) en la guía de ondas (7), produce un comportamiento de transmisión en la guía de ondas (7) en sentido contrario, es decir, inverso en amplitud y fase con respecto a la primera etapa, de manera que, como sucesión de ambas etapas, se produce un comportamiento globalmente lineal del sistema conjunto que conduce a un retardo de un impulso óptico.
- 15 2. Procedimiento, según la reivindicación 1, caracterizado porque la característica de la segunda etapa es ajustada de manera tal que zonas de impulsos atenuados en el borde del espectro son amplificadas más intensamente que las partes centrales del impulso.
3. Procedimiento, según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado porque para alcanzar mayores tiempos de retardo, se
 20 conectan, en cascada, sistemas con una sucesión de dichas primera y segundas etapas.
4. Procedimiento, según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la potencia de los impulsos de entrada que alcanzan la segunda etapa es ajustada, en especial mediante una atenuación variable entre ambas etapas.
 25
5. Procedimiento, según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la segunda etapa está constituida como sistema lineal no saturado, en el que el comportamiento de transmisión es reproducido selectivamente mediante superposición de dos amplitudes de banda de retardo desplazadas espectralmente.
- 30 6. Sistema configurado para la implementación del procedimiento, de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que presenta una guía de ondas (2, 7), en la que se propagan impulsos de señal en dirección de avance, de manera que en una primera etapa del sistema, se prevé una primera fuente (3) para la generación de una primera radiación de bombeo, de manera que se prevén medios (5) para el acoplamiento de la radiación de bombeo en la guía de ondas (3) en sentido contrario a la dirección de avance, en la que se propagan los impulsos de señal,
 35 de manera que se prevé un medio para el desacoplamiento (5) de los impulsos de señal retrasados mediante SBS, que se propagan en el sentido de avance, caracterizado por
 una segunda etapa que presenta una segunda fuente (8) para la generación de una segunda radiación de bombeo, que es acoplable con intermedio de un segundo medio (10) para el acoplamiento en la guía de ondas (2, 7) en
 40 sentido contrario a los impulsos de señales retardados en el sentido de avance, de manera que la amplitud de banda de la segunda radiación de bombeo es mayor que la amplitud de banda de los impulsos de señal.
7. Sistema, según la reivindicación 6, caracterizado porque la segunda etapa es accionada mediante un amplificador en la zona de saturación del sistema.
 45
8. Sistema, según la reivindicación 7, caracterizado porque un amplificador (9) para el ajuste de la potencia de la bomba de la segunda fuente (8).
9. Sistema, según la reivindicación 6, caracterizado porque la segunda etapa comprende un láser de bombeo
 50 coherente (21), que es modulado mediante el modulador (22), de manera que un generador de señal (23) genera una función senoidal, y el punto de trabajo del modulador (22) es ajustable de forma tal que llega a la anulación de una portadora y subsisten solamente las primeras bandas correspondientes.
10. Sistema, según una de las reivindicaciones 6 a 9, caracterizado por un elemento atenuador (6) para la
 55 modificación de la potencia de la señal.
11. Sistema, según una de las reivindicaciones 6 a 10, caracterizado por un elemento amortiguador (11) para la adecuación de la potencia del impulso de salida al interfaz (12) de finalización del sistema.

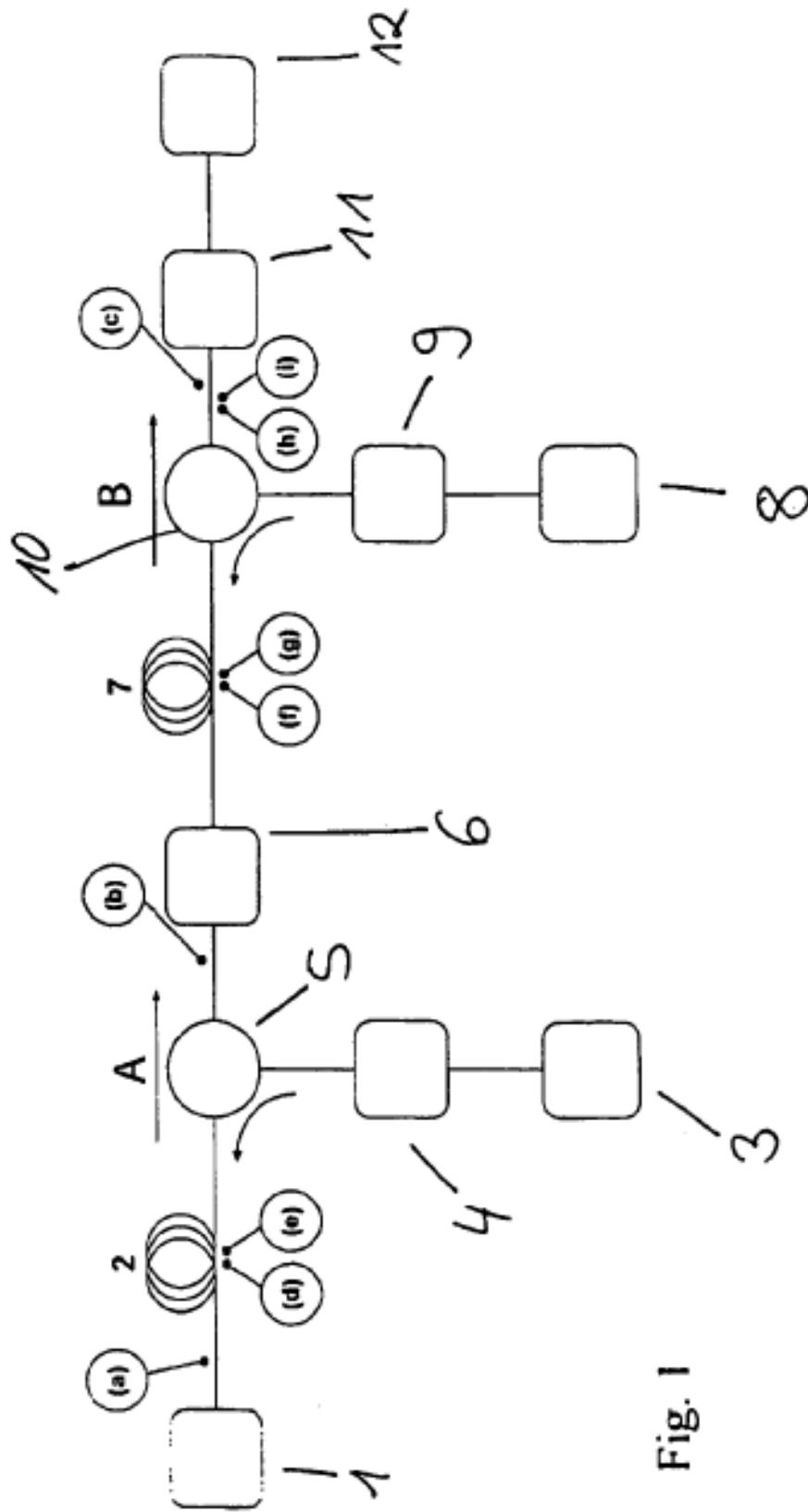


Fig. 1

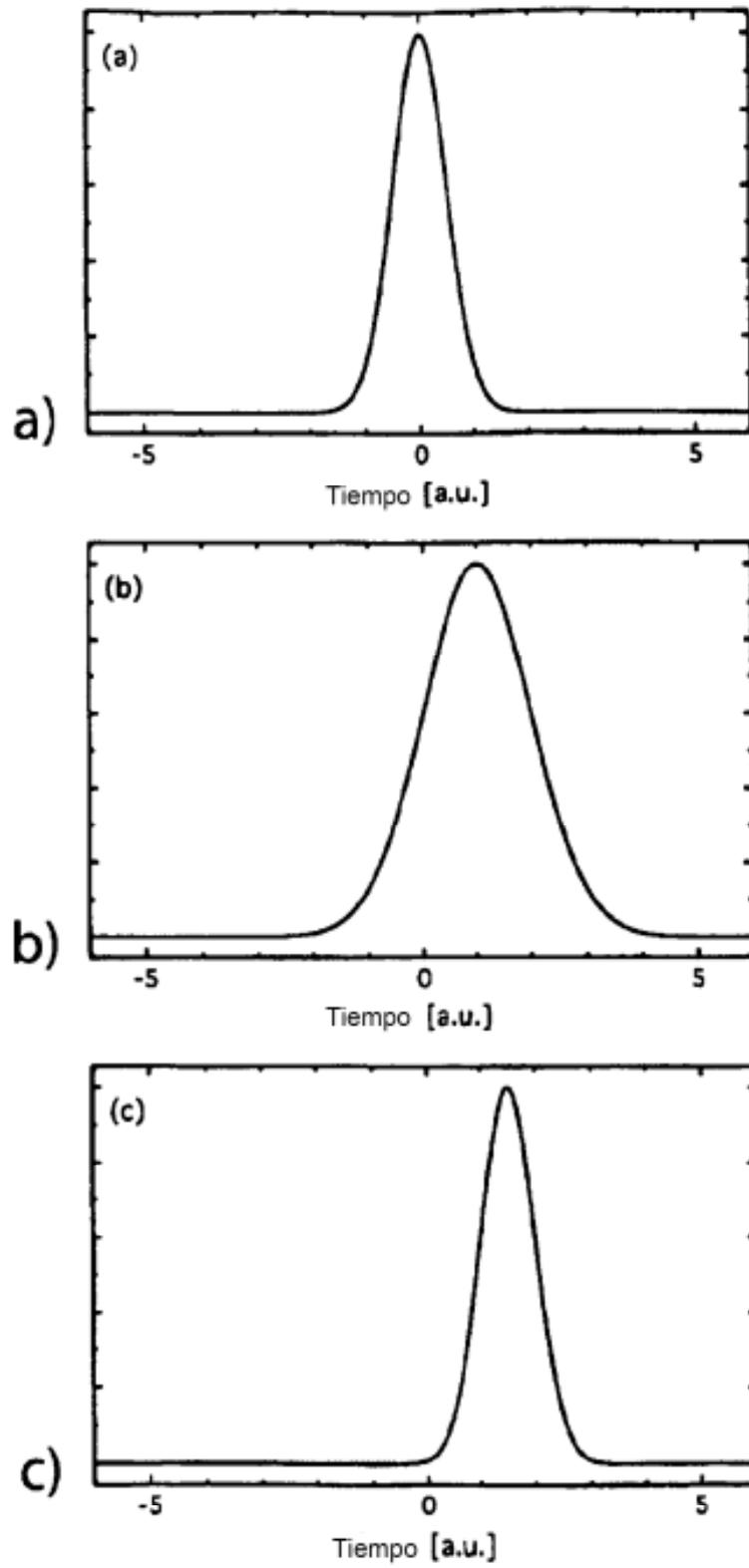


Fig. 2

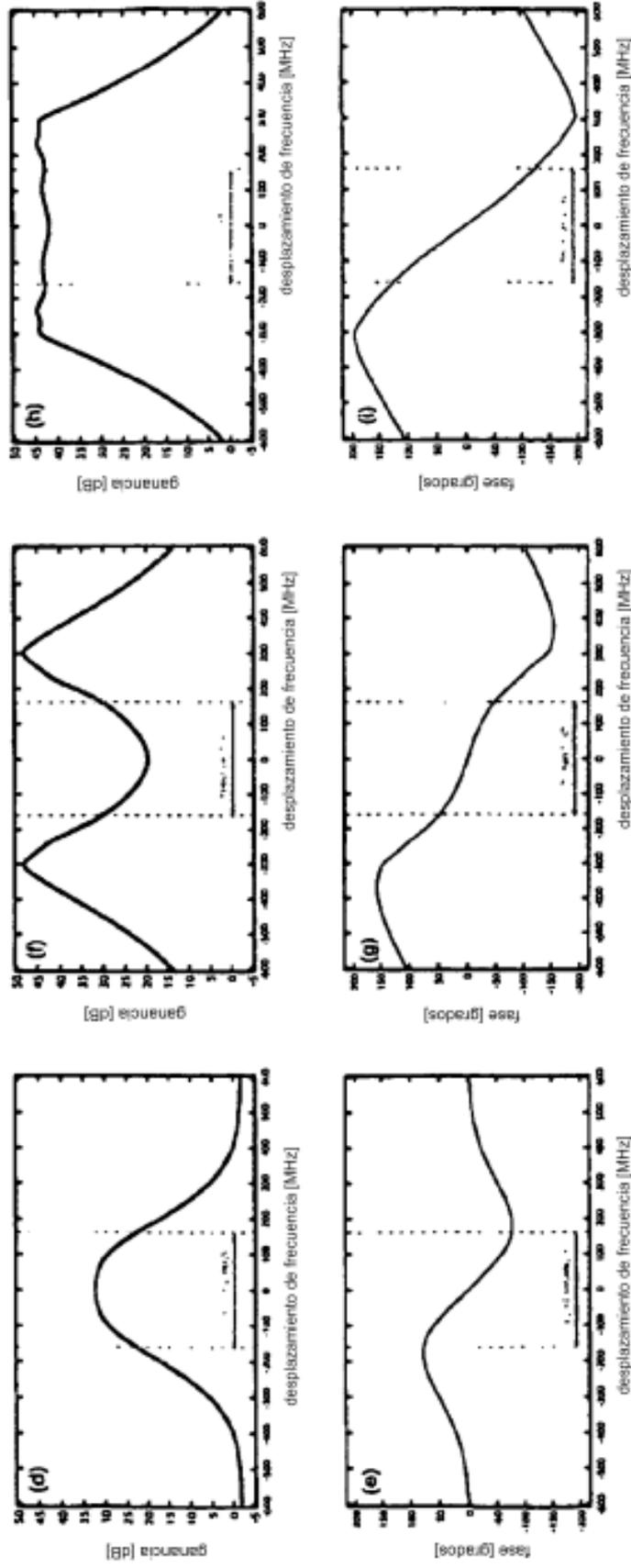


Fig. 3

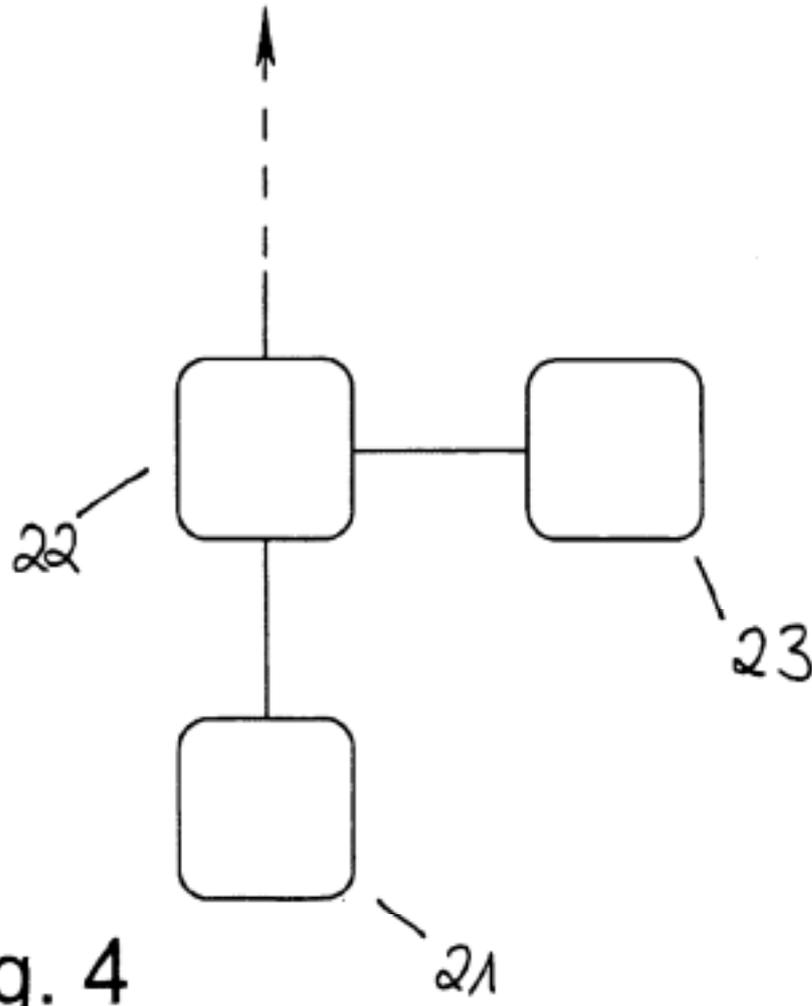
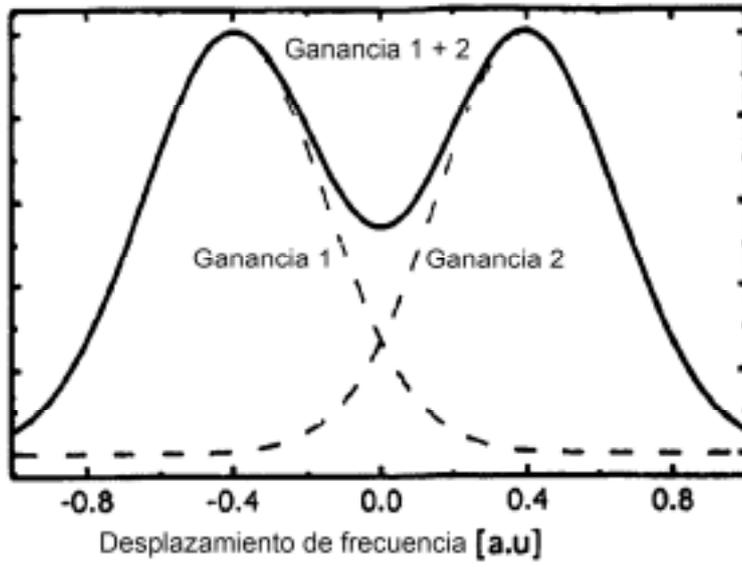


Fig. 4