

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 875 023**

51 Int. Cl.:

H03D 7/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.02.2019** **E 19158991 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.04.2021** **EP 3534536**

54 Título: **Dispositivo fotónico y procedimiento para conversión de frecuencia de doble banda**

30 Prioridad:

01.03.2018 FR 1800178

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

08.11.2021

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
TOUR CARPE DIEM, Place des Corolles,
Esplanade Nord
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**BENAZET, BENOÎT;
SOTOM, MICHEL y
AVELINE, MURIEL**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 875 023 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

Dispositivo fotónico y procedimiento para conversión de frecuencia de doble banda

La invención se refiere a un convertidor de frecuencia fotónica de doble banda, así como a un procedimiento y a una carga útil de conversión de frecuencia fotónica que utiliza dicho convertidor.

5 La invención pertenece al campo de la fotónica. Está destinada principalmente, pero no exclusivamente, a ser aplicada al campo de las telecomunicaciones espaciales. En particular, pretende reducir la complejidad, el peso, el volumen, el coste y/o el consumo de energía de las cargas útiles de telecomunicaciones a bordo de los satélites y, en particular, de los receptores utilizados al final de los enlaces ascendentes. Sin embargo, este concepto también es aplicable para la conversión a una frecuencia más alta para la transmisión de señales de radiofrecuencia (RF), especialmente en los
10 enlaces descendentes.

En el campo de las telecomunicaciones, a menudo es necesario realizar conversiones de frecuencia de señales de radiofrecuencia, y en particular de señales de microondas. En el ámbito de las telecomunicaciones espaciales, las conversiones de frecuencia son necesarias, por ejemplo, para retransmitir en un enlace descendente las señales recibidas a través de un enlace ascendente. También se puede utilizar para bajar la frecuencia de una señal recibida
15 para facilitar su procesamiento por los circuitos electrónicos, o a la inversa, para aumentar la frecuencia de una señal para su transmisión. Por último, puede utilizarse para combinar señales de radiofrecuencia procedentes de distintas fuentes cuyos espectros se solapan, en cuyo caso se requiere una conversión de frecuencia para evitar las interferencias. Convencionalmente, cada operación de conversión de frecuencia requiere el uso de un mezclador de radiofrecuencia separado, alimentado por un oscilador local. Cuando el número de señales a procesar es importante,
20 esto puede llevar a la realización de sistemas de conversión de frecuencia muy complejos y, por lo tanto, caros, pesados, voluminosos y que consumen mucha energía, siendo estos tres últimos parámetros especialmente penalizadores en las aplicaciones espaciales.

A modo de ejemplo, la figura 1 ilustra esquemáticamente la estructura y el funcionamiento de un dispositivo de conversión de frecuencia de microondas según el estado de la técnica. Este dispositivo recibe como entradas cuatro
25 señales de radiofrecuencia, por ejemplo dos (V_1 , V_2) en banda V (40 - 75 GHz) y otras dos (Ka_1 , Ka_2) en banda Ka (26,5 - 40 GHz). Tras ser amplificadas y filtradas por los respectivos circuitos de amplificación y filtrado, AF1, AF2, AF3, AF4, estas señales se suministran a las primeras entradas de cuatro mezcladores de microondas respectivos, MX1, MX2, MX3, MX4. Cada uno de estos mezcladores recibe también, en una segunda entrada, una señal de frecuencia única generada por un oscilador local respectivo LO_{1vk} , LO_{2vk} , LO_{3vk} , LO_{4vk} . A su salida, cada mezclador proporciona una
30 señal obtenida al mezclar -es decir, multiplicar entre sí- las señales presentes en estas entradas. En concreto, a la salida de cada mezclador se recupera una señal compuesta que contiene una primera componente correspondiente a la señal presente en la primera entrada pero cuyo espectro está desplazado "hacia arriba" por una frecuencia igual a la de la señal del oscilador local, y una segunda componente que también corresponde a la señal presente en la primera entrada pero cuyo espectro está desplazado "hacia abajo" por la frecuencia del oscilador local. Normalmente, se utiliza
35 un filtro (no mostrado) para seleccionar sólo una de estas componentes. En el ejemplo de la figura 1, las cuatro señales de salida seleccionadas (Ka_{1d} , Ka_{2d} , Ka_{3d} , Ka_{4d}) pertenecen a la banda Ka. Por lo tanto, el dispositivo realiza dos conversiones de la banda V a la banda Ka y dos conversiones dentro de la banda Ka.

Una desventaja del dispositivo mostrado en la Fig. 1 es que, para realizar cuatro conversiones, se deben utilizar necesariamente cuatro mezcladores de RF diferentes. En efecto, si se inyectaran en el mismo mezclador dos señales
40 pertenecientes a la misma banda (V_1 y V_2 , o Ka_1 y Ka_2), se recuperarían a la salida señales espurias correspondientes a productos de intermodulación. Además, el ancho de banda útil de un mezclador de microondas es bastante estrecho y no permite operar con señales pertenecientes a diferentes bandas de frecuencia. Las cargas útiles de los satélites de telecomunicaciones suelen estar diseñadas para realizar varias decenas de conversiones de frecuencia, por lo que requieren un número correspondiente de mezcladores. Esto tiene un impacto muy significativo en los parámetros
45 críticos de la carga útil: su masa, su espacio ocupado y su consumo de energía.

Se sabe que se pueden transponer varias señales de radiofrecuencia en respectivas portadoras ópticas y luego convertirlas en frecuencia utilizando moduladores electro-ópticos en lugar de los mezcladores de radiofrecuencia del sistema de la figura 1. Cuando se utiliza un modulador para cada señal a convertir, este enfoque -que puede describirse
50 como "fotónico"- sólo proporciona una reducción limitada de la masa, el espacio ocupado y/o el consumo de energía de la carga útil. Entre otras cosas, permite obtener, en ciertos casos, una mayor pureza espectral a la salida de la conversión y poder transportar la señal por fibra óptica, pero requiere tantos mezcladores como señales de RF a procesar.

En algunos casos, sin embargo, un enfoque fotónico permite reducir el número de moduladores, es decir, de mezcladores. Por ejemplo, se sabe que se pueden transferir señales de radiofrecuencia en portadoras ópticas de
55 diferentes longitudes de onda, multiplexarlas y aplicarlas a la entrada de un único modulador. Véase, por ejemplo, el documento FR 3 043 514. Este enfoque, sin embargo, sólo puede utilizarse cuando se desea aplicar el mismo desplazamiento de frecuencia a múltiples señales de RF. No sirve de nada cuando varias señales de radiofrecuencia tienen que someterse a diferentes desplazamientos de frecuencia.

Otro enfoque fotónico consiste en transferir una pluralidad de señales de frecuencia única de osciladores locales en portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda, multiplexarlas y aplicarlas a la entrada de un modulador electro-óptico para mezclarlas con una señal de radiofrecuencia. Véase, por ejemplo, el documento FR 2 864 385. Este enfoque sólo es adecuado cuando se van a aplicar múltiples desplazamientos de frecuencia simultáneamente a la misma señal de radiofrecuencia. Tampoco es útil cuando varias señales de radiofrecuencia tienen que someterse a diferentes desplazamientos de frecuencia.

La invención tiene por objeto superar, en todo o en parte, los inconvenientes y las limitaciones de la técnica anterior antes mencionados. Más concretamente, se trata de proporcionar un dispositivo que permita realizar, sobre una pluralidad de señales de RF distintas, desplazamientos de frecuencia que pueden ser diferentes, y que tenga una masa, un consumo de energía y/o un espacio ocupado reducido en comparación con la técnica anterior.

De acuerdo con la invención, esto se consigue utilizando una técnica fotónica, en la que varias señales de frecuencia única de osciladores locales se transfieren a portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda, se multiplexan en una única fibra óptica y, a continuación, se mezclan con dos señales de RF por medio de un único modulador electroóptico. Esto permite dividir el número de mezcladores al menos por un factor de dos, lo que hace que esta solución fotónica sea aún más ventajosa. Otra ventaja de la invención, o de al menos algunas de sus realizaciones, es su carácter genérico: en efecto, el mismo convertidor de frecuencia puede utilizarse en varias bandas espectrales de RF. Además, la utilización de una solución fotónica de acuerdo con la invención permite obtener, en condiciones particulares de polarización del modulador, una mejor pureza espectral en términos de líneas de frecuencia que en el caso de una solución puramente de "radiofrecuencia"; en particular, los productos de intermodulación espurios pueden ser rechazados más eficazmente.

Un objeto de la invención es, pues, un convertidor de frecuencia fotónico que comprende:

- un modulador electro-óptico de intensidad que tiene una entrada óptica y al menos una salida óptica;
- un conjunto de fuentes ópticas configuradas para generar señales ópticas en al menos dos longitudes de onda diferentes, moduladas por señales de oscilador local respectivas, de las cuales al menos dos tienen frecuencias diferentes;
- un multiplexor óptico dispuesto para multiplexar dichas señales ópticas e inyectarlas en la entrada óptica del modulador;
- un sistema de detección óptico/eléctrico configurado para convertir las señales ópticas del modulador electro-óptico de intensidad al dominio de la radiofrecuencia; y
- un banco de filtros eléctricos configurado para extraer componentes espectrales de las señales convertidas al dominio de la radiofrecuencia;

caracterizado porque el modulador electro-óptico de intensidad tiene también al menos una entrada para una tensión continua y al menos dos entradas de RF para recibir dos señales de modulación de radiofrecuencia a diferentes frecuencias.

Según diferentes realizaciones de dicho convertidor:

- Dicho modulador electro-óptico de intensidad puede ser del tipo interferómetro de Mach-Zehnder, y más particularmente:
 - del tipo interferómetro de Mach-Zehnder con doble acceso de RF y tiene dos entradas de RF para dos señales de radiofrecuencia de modulación respectivas; o
 - del tipo interferómetro de Mach-Zehnder I/Q y tiene dos entradas de RF para dos señales de radiofrecuencia de modulación respectivas; o
 - del tipo interferómetro de Mach-Zehnder de acceso único de RF que tiene una sola entrada de RF, comprendiendo el convertidor también un combinador de señales de RF configurado para recibir como entrada dos señales de modulación de RF respectivas, combinarlas y aplicarlas a dicha entrada de RF del modulador electro-óptico de intensidad.
- El convertidor también puede incluir un circuito de polarización configurado para aplicar a al menos una entrada de control del modulador electro-óptico de intensidad una tensión de polarización adaptada para minimizar la intensidad de un componente espectral de las señales ópticas del modulador electro-óptico de intensidad a una frecuencia de suma o diferencia de las frecuencias de las señales de modulación de radiofrecuencia.
- El convertidor también puede incluir un demultiplexor óptico dispuesto para demultiplexar las señales ópticas del modulador electro-óptico de intensidad.
- Dicho modulador electro-óptico de intensidad puede ser del tipo de salida óptica dual complementaria y el sistema de conversión óptica/eléctrica puede comprender al menos un fotodetector equilibrado.

Otro objeto de la invención es una carga útil de telecomunicaciones para un satélite que comprende al menos un convertidor de frecuencia de este tipo.

Otro objeto de la invención es un procedimiento de conversión de frecuencia por medio de dicho convertidor, que comprende los siguientes pasos:

- 5 • aplicar a la(s) entrada(s) de RF del modulador electro-óptico de intensidad del convertidor dos señales de radiofrecuencia cuyas frecuencias deben ser convertidas;
- activar las fuentes ópticas del convertidor y para generar dichas señales ópticas en al menos dos longitudes de onda diferentes, moduladas por dichas señales del oscilador local respectivo;
- 10 • recuperar las señales ópticas de la salida óptica del modulador electro-óptico de intensidad, convirtiéndolas al dominio de la radiofrecuencia y filtrándolas para extraer los componentes espectrales correspondientes cada uno a una señal de radiofrecuencia de entrada mezclada con una de dichas señales del oscilador local.

El procedimiento puede incluir además el siguiente paso:

- 15 • aplicar a al menos una entrada de control del modulador electro-óptico de intensidad una tensión de polarización adaptada para minimizar la intensidad de un componente espectral de las señales de RF del sistema de detección óptico/eléctrico a una frecuencia de suma o diferencia de las frecuencias de las señales de modulación de radiofrecuencia.

Otras características, detalles y ventajas de la invención se pondrán de manifiesto a partir de la descripción hecha con referencia a los dibujos anexos dados como ejemplos y que representan, respectivamente:

- 20 • Las figuras 2A-2D, esquemas de varios moduladores electro-ópticos de intensidad que pueden ser adecuados para implementar la invención;
- La figura 2E, un gráfico que ilustra la función de transferencia de modulación de un modulador electro-óptico de intensidad adecuado para la implementación de la invención;
- Las figuras 3, 4, 5 y 6, esquemas de convertidores de frecuencia fotónicos según cuatro realizaciones de la invención;
- 25 • Las figuras 7A, 7B, 7C, 8 y 9, gráficos que ilustran el rendimiento de los convertidores de frecuencia fotónicos según diferentes realizaciones de la invención;
- Las figuras 10 y 11, la aplicación de una pluralidad de convertidores fotónicos de frecuencia a una carga útil de un satélite de comunicaciones; y
- 30 • La figura 12 es un diagrama esquemático de un convertidor según una realización particular de la invención, que realiza simultáneamente la conversión ascendente ("up-conversion") y la conversión descendente ("down-conversion").

Tal y como se utiliza en el presente documento, el término "radiofrecuencia" o "RF" se entenderá en un sentido amplio, cubriendo todas las frecuencias en el rango de 3 kHz - 300 GHz. Las radiofrecuencias incluyen las frecuencias de microondas, o microondas, que corresponden a frecuencias comprendidas entre 1 GHz y 300 GHz.

- 35 La invención se describirá con referencia a realizaciones que utilizan ciertos tipos de moduladores electro-ópticos de intensidad (en lo sucesivo, hablaremos simplemente de "moduladores electro-ópticos", omitiendo la precisión "de intensidad") con interferómetros de Mach-Zehnder, pero más generalmente, cualquier tipo de modulador electro-óptico que tenga un número de accesos mayor que uno puede ser adecuado para la implementación de la invención. Antes de describir los diferentes modos de realización de la invención, conviene recordar el principio de funcionamiento de los
- 40 diferentes tipos de moduladores interferométricos de Mach-Zehnder que pueden utilizarse para esta implementación.

La Figura 2A ilustra un modulador MEODA (Modulador Electro-Óptico de Doble Acceso de RF ("dual-drive" en inglés).

- 45 La luz, polarizada rectilíneamente, se inyecta en la entrada óptica del componente. Se propaga en una guía de ondas plana hecha de un material cristalino EO, como el niobato de litio (LiNbO_3), que tiene un índice de refracción que varía linealmente en función del campo eléctrico aplicado (efecto Pockels). Un acoplador en "Y" divide esta guía de ondas en dos brazos paralelos entre los que el flujo de luz se distribuye de forma equilibrada. Dos pares de electrodos están dispuestos a cada lado de cada brazo del interferómetro; un primer par de electrodos está conectado a una primera entrada, o puerto de RF EC1 y un segundo primer par de electrodos está conectado a una segunda entrada de RF EC2. Una tensión constante (DC, del inglés "direct current", es decir corriente continua) y/o variable aplicada a una entrada de control modifica el índice de refracción del material, y por lo tanto la fase de la luz que viaja a través del brazo
- 50 correspondiente, provocando una variación en la trayectoria óptica. A continuación, los dos brazos se recombinan

mediante un segundo acoplador "Y", que permite que la luz que los atraviesa interfiera (el modulador es, por tanto, esencialmente un interferómetro). Así, la intensidad óptica tomada a la salida SO del modulador depende del desfase entre los dos brazos del dispositivo y, por tanto, de las tensiones aplicadas a los electrodos correspondientes.

Típicamente, los moduladores de RF de doble acceso tienen diferentes electrodos de RF y DC. Las estructuras más comunes tienen un electrodo de DC en cada uno de los brazos del interferómetro, de modo que se pueden aplicar dos tensiones continuas separadas a cada uno de los brazos del interferómetro por separado, o un único electrodo de DC en dos brazos del interferómetro. En este caso, sólo se aplica una tensión continua al componente. Este es el caso más general.

En la primera realización con un modulador similar al de la figura 2A, una primera tensión continua de polarización V_{B1} generada por un circuito de polarización POLAR y una primera señal de radiofrecuencia V_{RF1} se aplican a la primera entrada de control de DC y a la primera entrada de RF, respectivamente; y una segunda tensión continua de polarización V_{B2} generada por el circuito de polarización POLAR y una segunda señal de RF V_{RF2} se aplican a la segunda entrada de control de DC y a la segunda entrada de RF, respectivamente.

Las tensiones de polarización suministradas por el circuito de polarización POLAR establecen el punto de funcionamiento del modulador. La figura 2D muestra los gráficos de la función de transferencia de modulación de intensidad FTMI y la función de transferencia d de modulación de campo eléctrico FTME en función de la tensión $V = |V_{B1} - V_{B2}|$. Nótese que estas funciones de transferencia de modulación son sinusoidales. La tensión V_{π} corresponde a un desplazamiento de fase de π radianes entre los dos brazos del interferómetro. La función de transferencia de campo es lineal alrededor de una tensión de polarización V_{π} (más típicamente kV_{π} , con k entero), mientras que la función de transferencia de intensidad es lineal alrededor de una tensión de polarización $V_{\pi/2} = 1/2 V_{\pi}$ (más típicamente, $(k+1/2)V_{\pi}$, con k entero). La elección del punto de funcionamiento, y por tanto de la tensión de polarización, es muy importante; como se ilustrará en las figuras 7A - C y 8. De hecho, esta elección afecta significativamente al rendimiento del convertidor de frecuencia según la invención. Por esta razón, el circuito de polarización POLAR paraqué permite generar las tensiones de DC, incluye preferentemente un sistema de control de bucle cerrado para controlar las derivas, en particular las derivas térmicas o las derivas relacionadas con el envejecimiento del componente.

En el caso de la figura 2A, se ha considerado que se aplican dos tensiones continuas de polarización a las respectivas entradas de control. Normalmente, para los componentes disponibles en el mercado, se aplica una única tensión de polarización (V_B en la figura 2C) al modulador a través de una única entrada de control de DC.

La figura 2B muestra el diagrama esquemático de un modulador MEOAU de acceso único de RF ("single-drive" en inglés). Este modulador difiere del anterior en que comprende una sola entrada de RF, lo que permite aplicar la misma señal de RF -con una polaridad invertida- y una tensión de polarización V_B a los dos pares de electrodos asociados a los dos brazos del interferómetro. Esta señal se obtiene combinando las dos señales de RF, V_{RF1} y V_{RF2} , cuyas frecuencias deben ser convertidas, por medio de un combinador de RF, que se ha denominado CRF. Con referencia a las figuras 8 y 9, el uso de un dispositivo de este tipo para la aplicación de la invención no permite alcanzar un rendimiento óptimo. Además, la necesidad de utilizar combinadores de RF limita el ancho de banda del dispositivo y elimina cualquier genericidad de frecuencia de este tipo de convertidor de frecuencia.

Alternativamente, se puede proporcionar un solo par de electrodos para aplicar la señal de RF y la tensión de polarización a una sola rama. Como se explica con referencia a la figura 2A, la tensión de polarización también puede aplicarse utilizando una entrada y un par de electrodos dedicados.

El modulador MEODS (Modulador Electro-Optico de Doble Salida) mostrado en la figura 2C es del tipo de doble acceso de RF y doble salida óptica ("dual drive-dual output"). Se diferencia del mostrado en la figura 2A en que el acoplador en "Y" de salida se sustituye por un acoplador direccional en "X". El modulador MEODS comprende así dos salidas ópticas SO1, SO2, complementarias entre sí; el desplazamiento de fase entre los dos brazos del modulador modifica la distribución de la intensidad luminosa entre estas dos salidas. La ventaja de tal configuración es que permite utilizar un fotodiodo equilibrado anotado PDE para convertir la señal óptica diferencial a la salida del modulador en una señal eléctrica y así beneficiarse de las ventajas de tal detección (aumento de la amplitud de la señal RF de salida, supresión del ruido de amplitud...).

Como se muestra en la figura 2C, un fotodiodo equilibrado comprende dos entradas ópticas, que consisten en fibras semilla, que alimentan respectivamente dos fotodiodos conectados en serie con una salida de RF en el punto medio. Para un funcionamiento óptimo de este tipo de fotodiodo, es necesario un emparejamiento de longitudes de las fibras de entrada, lo que hace que su implementación sea más compleja que la de un fotodiodo estándar de entrada óptica PIN (positivo-intrínseco-negativo) o UTC (del inglés "Uni-Travelling Carrier"). Un receptor de par d de fotodiodos equilibrado suma a su salida la potencia de las señales diferenciales presentes en sus dos entradas ópticas y elimina las señales de modo común. En otras palabras, entrega una corriente correspondiente a la diferencia de las corrientes generadas respectivamente por los dos fotodiodos. En el caso ideal en el que los dos fotodiodos son perfectamente idénticos (misma sensibilidad e iguales longitudes de fibra), se produce una cancelación de la componente continua (y del ruido asociado). Cuando se utiliza un convertidor óptico-eléctrico estándar (con una sola entrada óptica), los ruidos dominantes son el ruido de intensidad relativa (RIN del inglés "Relative Intensity Noise") y el ruido de disparo ("shot noise" en inglés). El ruido de disparo es proporcional a la corriente media detectada, mientras que el ruido RIN es

proporcional al cuadrado de esta corriente. Dado que la relación señal/ruido de un enlace óptico aumenta con el cuadrado de la corriente detectada, el aumento de la potencia óptica está limitado por el RIN, que se convierte entonces en la fuente de ruido predominante. Un detector equilibrado permite suprimir el RIN y, por tanto, ayuda a mejorar la relación señal/ruido del enlace.

- 5 La figura 2D ilustra otro tipo de modulador electro-óptico MEOIQ adecuado para implementar la invención. Se trata de un modulador "I/Q" de doble control que suele utilizarse para enlaces digitales con formatos de modulación complejos, como la modulación de amplitud en cuadratura (en inglés, quadrature amplitude modulation: QAM), las modulaciones de fase QPSK (en inglés, Quaternary Phase-Shift Keying) o m-PSK (m-ary Phase-Shift Keying) o incluso modulación de amplitud y fase (en inglés, Amplitude and Phase-Shift Keying o Asymmetric Phase-Shift Keying: APSK). Consiste en dos
10 moduladores Mach-Zehnder independientes integrados en un interferómetro Mach-Zehnder "primario". En el ejemplo de la figura, la tensión de polarización del interferómetro Mach-Zehnder primario se aplica a una tercera entrada de control de DC, que controla la fase relativa entre los dos brazos del interferómetro y, por tanto, la señal de salida.

La figura 3 ilustra un convertidor de frecuencia según una primera realización de la invención.

- 15 La primera señal de RF V_{RF1} , que tiene una frecuencia central f_{RF1} , y la segunda señal de RF V_{RF2} , que tiene una frecuencia central f_{RF2} , son, amplificadas y filtradas por los respectivos bloques de amplificación y filtrado AF1, AF2 (opcionales), y luego aplicadas a las dos entradas de RF de un modulador electro-óptico de intensidad de doble acceso de RF (véase por ejemplo, las figuras 2A, 2C, 2D). En la figura 3 (y también en las figuras 4, 5 y 6) el modulador - posiblemente equipado con un combinador de RF (CRF) - se denomina generalmente con la referencia MEO. El circuito y la tensión de polarización no se muestran en aras de la simplicidad.

- 20 Dos fuentes ópticas SL1, SL2, que emiten a longitudes de onda respectivas λ_1 , λ_2 son moduladas por señales de frecuencia única OL, SOL1, SOL2, de frecuencia f_{OL1} , f_{OL2} respectivamente, generadas respectivamente por osciladores locales, OL1, OL2. Denotamos por SO1 y SO2 las señales ópticas de longitud de onda λ_1 y λ_2 respectivamente, cuya envolvente se modula a la frecuencia f_{OL1} , f_{OL2} respectivamente.

El número de señales ópticas OL, igual a dos, se da sólo como un ejemplo y no es limitante.

- 25 Las fuentes SL1 pueden ser, por ejemplo, láseres de semiconductores, modulados directamente por las señales OL1, OL2 si la frecuencia de estas últimas no es demasiado alta (< 15 GHz) o fuentes láser que emiten en régimen continuo, siendo su flujo óptico modulado por un modulador integrado o externo controlado por las señales SOL1, SOL2. La fuente óptica y el oscilador local también pueden integrarse en un oscilador optoelectrónico. La generación de las señales OL1 y OL2 en forma fotónica puede llevarse a cabo, por ejemplo, a partir de un láser pulsado (o de bloqueo de
30 modo denominado en inglés "mode-locked laser") o un láser de modo dual cuyo período de pulso o diferencia de frecuencia entre los dos modos corresponde respectivamente a la frecuencia OL de interés.

- Las señales ópticas OL moduladas de este modo se multiplexan mediante un multiplexor MUX (es decir, WDM del inglés "Wavelength Division Multiplexing", es decir multiplexación por división de longitud de onda) y se inyectan en la entrada óptica del modulador MEO a través de una fibra óptica o, en el caso de una solución integrada, de una guía de
35 ondas plana.

- En la salida del modulador electro-óptico se recuperan dos señales ópticas de longitudes de onda λ_1 y λ_2 cuya envolvente presenta una modulación compleja. En particular, la señal en la longitud de onda λ_1 tiene componentes espectrales en las frecuencias f_{RF1} , f_{RF2} , f_{LO1} . Del mismo modo, la señal en la longitud de onda λ_2 tiene, en particular, componentes espectrales en las frecuencias f_{RF1} , f_{RF2} , f_{LO2} . Estas dos señales ópticas se transmiten entonces por fibra
40 óptica (o guía de ondas planas) a un demultiplexor DEMUX, que permite filtrarlas en frecuencia y dirigir las a los fotodetectores (o convertidores óptico-eléctricos) COE1, COE2, normalmente fotodiodos de tipo PIN (positivo-intrínseco-negativo) o UTC (del inglés "Uni-Travelling Carrier").

- Las señales eléctricas generadas por la fotodetección de las longitudes de onda λ_1 , λ_2 contienen componentes espectrales en las frecuencias $f_{RF1}+f_{LO1}$, $f_{RF1}-f_{LO1}$, $f_{RF2}+f_{LO1}$, $f_{RF2}-f_{LO1}$, $2f_{LO1}$, $f_{RF1}\pm 2f_{LO1}$, y $f_{RF1}+f_{LO2}$, $f_{RF1}-f_{LO2}$, $f_{RF2}+f_{LO2}$, $f_{RF2}-f_{LO2}$, $2f_{LO2}$, $f_{RF1}\pm 2f_{LO2}$, respectivamente. Estas componentes espectrales de intermodulación aparecen en el momento de la detección, debido a que los fotodetectores son sensibles a la intensidad de la luz, es decir, al cuadrado del campo
45 eléctrico.

- A continuación, se filtran con tecnología de RF para extraer los componentes útiles y rechazar los demás. Por ejemplo, el convertidor de la figura 3 permite convertir la señal V_{RF1} a la frecuencia $f_{RF1}-f_{LO1}$ y la señal V_{RF2} a la frecuencia $f_{RF2}-f_{LO2}$. Así, un único modulador electro-óptico puede sustituir ventajosamente a dos mezcladores de RF.
50

El conjunto formado por el demultiplexor DEMUX y los convertidores óptico-eléctricos COE1, COE2 forman lo que se puede denominar un sistema de conversión óptico-eléctrico denominado SCOE.

- En la realización de la Figura 4, se inyectan más de dos señales ópticas en el modulador MOE. Más concretamente, en el convertidor de la figura 4, cuatro fuentes ópticas SL1, SL2, SL3, SL4 que emiten a las respectivas longitudes de onda
55 λ_1 , λ_2 , λ_3 , λ_4 son moduladas por señales de RF de frecuencia única SOL1, SOL2, SOL3, SOL4 de frecuencia f_{OL1} , f_{OL2} , f_{OL3} , f_{OL4} , generadas respectivamente por los osciladores locales, OL1, OL2, OL3, OL4. El número de cuatro se da sólo

como ejemplo y no es limitativo. Esto permite realizar múltiples conversiones de frecuencia de las dos señales de RF V_{RF1} y V_{RF2} . Por ejemplo, el convertidor de la figura 4 permite convertir la señal V_{RF1} a la frecuencia $f_{RF1}-f_{LO1}$ pero también a la frecuencia $f_{RF1}-f_{LO3}$, y la señal V_{RF2} a la frecuencia $f_{RF2}-f_{LO2}$ y a la frecuencia $f_{RF2}-f_{LO4}$.

Además, la realización de la figura 4 difiere de la de la figura 3 en que el convertidor de la figura 4 tiene un sistema de detección óptico-eléctrico SDOE diferente del de la figura 3. Este sistema comprende un único fotodetector DOE que genera una señal eléctrica compleja de la que se extraen los componentes espectrales útiles mediante un banco de filtros eléctricos BFE. En este caso, las longitudes de onda multiplexadas deben tener una separación de frecuencias lo suficientemente grande como para que el batido heterodino en la frecuencia de diferencia entre ellas no genere una línea espuria en la banda útil. Este enfoque facilita el uso de un fotodiodo equilibrado para la conversión óptica-eléctrica, siempre que el modulador electro-óptico tenga dos salidas ópticas (véase la Figura 2C).

Por supuesto, el sistema de conversión óptico-eléctrico de la figura 3 también puede utilizarse en un convertidor que implemente más de dos señales ópticas, y a la inversa, el de la figura 4 también puede utilizarse en un convertidor que implemente sólo dos señales ópticas.

La figura 5 ilustra un convertidor de frecuencia según una tercera realización de la invención, que implementa un modulador electro-óptico con un único acceso de RF y una única salida óptica, como el ilustrado en la figura 2B. Las dos señales de RF, V_{RF1} y V_{RF2} , son combinadas por el combinador de radiofrecuencia CRF antes de ser aplicadas a la entrada única de RF del modulador. La estructura del sistema de conversión óptico-eléctrica SCOE es idéntica a la mostrada en la Figura 3 anterior y consiste en un demultiplexor asociado a tantos fotodiodos como osciladores locales.

La figura 6 ilustra un convertidor de frecuencia según una cuarta realización de la invención, en la que se realiza una modulación de banda lateral única (SSB del inglés Single SideBand). Para ello, la señal V_{RF1} se divide en dos componentes de la misma amplitud por medio de un divisor de radiofrecuencia, indicado SEP. Uno de estos componentes se aplica a la primera entrada de RF del modulador MOE; el otro componente se desfasa, por ejemplo en 90° ($\pi/2$ radianes) para una polarización en cuadratura, y se combina con la segunda señal de radiofrecuencia V_{RF2} mediante un combinador/desfasador DEP antes de aplicarse a la segunda entrada de RF del modulador MOE (más generalmente, el valor del desfase a aplicar para obtener la modulación SSB depende de la tensión de polarización del modulador). La presencia de componentes de RF puros como el SEP, DEP limita el carácter de banda ancha del convertidor, como también es el caso de la realización mostrada en la Fig. 5. El uso de la modulación de banda espectral única reduce el número de productos de intermodulación presentes en la señal de fotodetección.

Las figuras 7A a 7C ilustran el rendimiento de un convertidor de frecuencia según una realización de la invención, basado en el uso de un modulador electro-óptico de RF de doble acceso (figura 2A), y en particular la importancia de la elección de la tensión de polarización, y por tanto del punto de funcionamiento del modulador. El caso considerado corresponde a dos señales de RF, V_{RF1} y V_{RF2} , con frecuencias $f_{RF1}=28,5$ GHz (banda Ka) y $f_{RF2}=49,7$ GHz (banda V), y con la misma amplitud igual a -10 dBm. Para simplificar, se utilizó una única señal óptica de potencia +14,5 dBm, modulada a una frecuencia f_{OL1} de 10,2 GHz. La señal de salida (envolvente de la señal óptica a la salida del modulador) se observa en un rango espectral comprendido entre 17 GHz y 22 GHz (banda útil Ka: 17,2 GHz - 20,2 GHz), incluyendo la frecuencia intermedia $f_{FI}=f_{RF1}-f_{OL1}$.

La figura 7A muestra el espectro de potencia de la señal de RF de salida, expresado en dBm, en el caso en que la tensión de polarización V_B toma su valor óptimo $V_{\pi/2}$. Este valor de tensión de polarización es óptimo, en particular para la primera realización (descrita en la figura 2A), ya que maximiza el rechazo de la línea espuria a la frecuencia $f_{RF2}-f_{RF1}$, que probablemente se encuentre en la banda útil. Sin embargo, esta tensión de polarización óptima puede tomar otros valores, dependiendo del tipo de modulador utilizado. Además de la componente útil a la frecuencia f_{FI} , existe una gran componente espuria a la frecuencia $2f_{OL1}$ y otras componentes espurias más débiles correspondientes a productos de intermodulación a las frecuencias $2f_{RF1}+f_{OL1}-f_{RF2}$ y $f_{RF2}-3f_{OL1}$. El componente en la frecuencia $2f_{OL1}$ no es problemático, ya que es de una sola frecuencia y, por tanto, puede eliminarse fácilmente. Los otros productos de intermodulación, por el contrario, pueden dar lugar a interferencias, por lo que es importante que su nivel sea lo suficientemente débil en comparación con respecto al de la componente útil.

Las figuras 7B y 7C corresponden a situaciones en las que la tensión de polarización se desvía en 10 mV y 50 mV, respectivamente, de su valor óptimo. Se observa que esta desviación provoca la aparición de un nuevo producto de intermodulación dominante a una frecuencia $f_{RF2}-f_{RF1}$.

En la Figura 8, los puntos cuadrados representan la potencia relativa del producto de intermodulación a la frecuencia $f_{RF2}-f_{RF1}$ con respecto a la de la señal útil a la frecuencia f_{FI} (en dBc) en función de la tensión de polarización V_B (siendo el valor óptimo $V_{\pi/2}$ igual a 2,5 V), para la primera realización. Se puede observar que esta potencia relativa aumenta rápidamente con la desviación $|V_B - V_{\pi/2}|$, de ahí la importancia de estabilizar V_B . Para $V_B = V_{\pi/2}$ la intensidad de la componente $f_{RF2}-f_{RF1}$ no cae a cero, ya que el trazado está limitado por el piso de ruido.

La figura 9 muestra el espectro de potencia de la señal de RF de salida para el caso $V_B=V_{\pi/2}$ en el caso de un modulador óptico de salida doble seguido de una detección por fotodiodo equilibrado (figura 2C). Se puede observar que el ruido se reduce muy considerablemente, hasta el punto de no ser visible en la figura, y que la componente espuria en la frecuencia $2f_{RF1}+f_{OL1}-f_{RF2}$ ha desaparecido. Sin embargo, estas mejores prestaciones se obtienen a costa de una

implementación más delicada, debido en particular al emparejamiento de longitudes de las fibras entre el modulador y el receptor óptico.

Por ejemplo, en los futuros sistemas de telecomunicaciones de muy alto rendimiento (VHTS, del inglés «Very High Throughput Systems»), el espectro de los enlaces ascendentes de las pasarelas («gateways» en inglés) podrán utilizar simultáneamente bandas de frecuencias Ka y V, mientras que los enlaces descendentes (haces de usuario) estarán en banda Ka. Cada enlace ascendente requerirá 1 (banda Ka) y 2 (banda V) conversiones de frecuencia diferentes. Por ejemplo, para un repetidor con 50 entradas desde una pasarela, la tecnología RF convencional requiere la implementación de 50 amplificadores de bajo ruido (LNA, del inglés «Low Noise Amplifier») en banda V, 50 demultiplexores, 100 convertidores de banda V a banda Ka y 50 convertidores Ka a Ka.

La figura 11 ilustra un satélite de telecomunicaciones SAT que comprende un conjunto de antenas receptoras REC para recibir señales de enlace ascendente LM desde una pasarela GW, un conjunto de antenas transmisoras TRAN para transmitir haces de usuario que forman un enlace descendente LD y una carga útil de telecomunicaciones CUT que realiza, entre otras cosas, las conversiones de frecuencia y las interconexiones necesarias.

La figura 10 es un diagrama de bloques de una carga útil de este tipo, que permite gestionar esta situación utilizando sólo 50 convertidores de frecuencia fotónicos (frente a 150 para la tecnología RF) según la invención. Esto tiene un impacto positivo y significativo en los presupuestos de masa, potencia y coste del satélite.

La carga útil de la Figura 10 es un canal de reenvío que recibe señales de 25 estaciones transmisoras y las retransmite a 150 haces de usuarios. El número de estaciones transmisoras y de haces se da sólo como ejemplo. Consta de un conjunto de 25 antenas A1 - A25 que operan, en recepción, en las bandas V (alrededor de 50 GHz) y Ka (alrededor de 30 GHz), en dos polarizaciones ortogonales. Así, cada antena tiene dos salidas, una para la polarización y la banda de frecuencia. Cada salida de antena se filtra en el ancho de banda adecuado, en banda V o Ka. A continuación, los anillos de redundancia AR1, AR2 basados en conmutadores de RF permiten implementar canales adicionales en redundancia fría.

El conjunto designado por la referencia ECF comprende 50 convertidores de frecuencia fotónicos según la invención. Cada modulador electro-óptico de este conjunto recibe en una primera entrada de RF una señal en banda Ka, en una segunda entrada de RF una señal en banda V y en su entrada óptica tres señales ópticas multiplexadas en tres longitudes de onda distintas, λ_1 , λ_2 , λ_3 moduladas a las respectivas frecuencias de RF por los agujeros de los osciladores locales LO1, LO2, LO3. A la salida de cada modulador, se utiliza un fotodetector para recuperar las señales de RF correspondientes a las diferentes mezclas de las frecuencias de RF recibidas generadas por los osciladores locales. Las tres señales útiles son:

- la señal recibida en la banda Ka, ahora trasladada a unos 20 GHz;
- las dos señales recibidas correspondientes a las subbandas de la banda V, también trasladadas a unos 20 GHz.

En la salida, los anillos de redundancia basados en conmutadores de RF AR3, AR4, AR5 se utilizan para seleccionar los canales activos, y los filtros de RF se utilizan para filtrar la subbanda útil deseada, antes de encaminar las señales a la sección AMP de 20 GHz.

Después de la amplificación de potencia, una etapa final de filtrado limpia el espectro antes de que las señales sean retransmitidas por las antenas de transmisión a los 150 haces de usuario.

La figura 12 muestra un convertidor fotónico que simultáneamente convierte hacia abajo una señal de RF, designada RF_1 , y convierte hacia arriba una señal de frecuencia intermedia F_i .

En el convertidor de la figura 12, un modulador electroóptico de RF de doble puerto MEO es alimentado simultáneamente en uno de sus canales de RF por la señal RF_1 y en el otro canal de RF por la señal F_i procedente de un procesador analógico o digital PAN.

Dos osciladores locales LO1, LO2, de diferentes frecuencias, se transfieren a portadoras ópticas de longitudes de onda λ_1 y λ_2 respectivamente, que se multiplexan en longitud de onda y se envían a la entrada óptica del modulador.

El primer oscilador local LO1, a la longitud de onda λ_1 , realiza la conversión descendente de la señal RF_1 a una señal a una frecuencia F_{i1} compatible con la entrada del procesador PAN. Tras el demultiplexado de la longitud de onda (DEMUX), a la salida del modulador, sólo se aísla la señal compuesta en la longitud de onda λ_1 que lleva la componente F_{i1} en uno de los canales de salida correspondientes del demultiplexor. A continuación, esta señal es detectada por un convertidor óptico-eléctrico, filtrada (por el canal de radiofrecuencia) y pasada al procesador para su procesamiento.

El segundo oscilador local LO2, a la longitud de onda λ_2 permite la conversión ascendente de la señal de salida F_i del procesador PAN, a una frecuencia intermedia, a una radiofrecuencia RF_2 transmitida, tras el filtrado, a la sección de amplificación de salida de la carga útil (no mostrada). Después de la demultiplexación de la longitud de onda, a la salida

del modulador, sólo se aísla la señal compuesta en la longitud de onda λ_2 que lleva esta componente RF2 en uno de los canales de salida correspondientes del demultiplexor. Esta señal es detectada directamente por un convertidor óptico/eléctrico o puede ser transmitida por fibra óptica a los filtros de RF y a la sección de amplificación de salida de la carga útil. En este caso, la conversión óptica/eléctrica se realiza antes de los filtros de RF.

- 5 En el convertidor de la figura 12, el modulador electro-óptico MEO está polarizado de tal manera que las amplitudes de los componentes espurios en las frecuencias $RF_1 \pm Fi1$ son rechazadas significativamente en relación con la amplitud de la señal útil deseada.

REIVINDICACIONES

1. Convertidor fotónico de frecuencia para convertir una primera señal de entrada de radiofrecuencia (V_{RF1}) y una segunda señal de entrada de radiofrecuencia (V_{RF2}) que tienen, respectivamente, dos frecuencias diferentes en al menos dos señales de salida de radiofrecuencia que comprenden:
 - 5 - un modulador electro-óptico (MEO) de intensidad que tiene una entrada óptica (EO) y al menos una salida óptica (SO);
 - un conjunto de fuentes ópticas (SL1 - SL4) configuradas para generar señales ópticas (SO1 - SO4) en al menos dos longitudes de onda diferentes ($\lambda_1 - \lambda_4$), moduladas por respectivas señales de osciladores locales (SOL1 - SOL4), de las cuales al menos dos tienen frecuencias diferentes;
 - 10 - un multiplexor óptico (MUX) dispuesto para multiplexar dichas señales ópticas e inyectarlas en la entrada óptica del modulador;
 - un sistema de detección óptico/eléctrico (SCOE, COE1, COE2, PDE) configurado para convertir las señales ópticas del modulador electro-óptico de intensidad en el dominio de la radiofrecuencia; y
 - 15 - un banco de filtros eléctricos (BFE) configurado para extraer componentes espectrales de las señales convertidas al dominio de la radiofrecuencia, **caracterizado porque** el modulador electro-óptico de intensidad tiene también al menos una entrada para una tensión continua y al menos una entrada de RF (EC, EC1, EC2) para recibir dichas dos señales de entrada de radiofrecuencia (V_{RF1} , V_{RF2}) a diferentes frecuencias o una combinación de dichas dos señales de entrada de radiofrecuencia (V_{RF1} , V_{RF2});
 - 20 y **porque** los componentes espectrales extraídos por los filtros eléctricos (BFE) corresponden cada uno a una señal de radiofrecuencia de entrada (V_{RF1} , V_{RF2}) mezclada con una de dichas señales del oscilador local (SOL1 - SOL4).
2. Convertidor de frecuencia según la reivindicación 1, en el que dicho modulador electro-óptico de intensidad (MEO) es del tipo interferómetro Mach-Zehnder.
3. Convertidor de frecuencia según la reivindicación 2, en el que dicho modulador electro-óptico de intensidad es del tipo interferómetro Mach-Zehnder de doble acceso de RF (MEODA) y tiene dos entradas de RF (EC1, EC2) para dos señales de modulación de radiofrecuencia respectivas (V_{RF1} , V_{RF2}).
 - 25 4. Convertidor de frecuencia según la reivindicación 2, en el que dicho modulador electro-óptico de intensidad es del tipo interferómetro Mach-Zehnder I/Q (MEOIQ) y tiene dos entradas de RF (EC1, EC2) para dos señales de modulación de radiofrecuencia respectivas (V_{RF1} , V_{RF2}).
 5. Convertidor de frecuencia según la reivindicación 2, en el que dicho modulador electro-óptico de intensidad es del tipo interferómetro Mach-Zehnder de acceso único a RF (MEOAU) que tiene una sola entrada de RF (EC), comprendiendo el convertidor también un combinador de señales de RF (CRF) configurado para recibir como entrada dos señales de modulación de RF respectivas (V_{RF1} , V_{RF2}), combinarlas y aplicarlas a dicha entrada de RF del modulador electro-óptico de intensidad.
 - 30 6. Convertidor de frecuencia según una de las reivindicaciones 2 a 5 que comprende además un circuito de polarización configurado para aplicar a al menos una entrada de control del modulador electro-óptico de intensidad una tensión de polarización (V_{B1} , V_{B2} , V_B) adaptada para minimizar la intensidad de un componente espectral de las señales ópticas del modulador electro-óptico de intensidad a una frecuencia de suma o diferencia de las frecuencias de las señales de radiofrecuencia de modulación.
 - 35 7. Convertidor de frecuencia según una de las reivindicaciones anteriores que comprende también un demultiplexor óptico (DEMUX) dispuesto para demultiplexar las señales ópticas del modulador electro-óptico de intensidad.
 - 40 8. Convertidor de frecuencia según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho modulador electro-óptico de intensidad es del tipo de salida dual óptica complementaria (MEODS), comprendiendo el sistema de conversión óptica/eléctrica al menos un fotodetector equilibrado (PDE).
 9. Carga útil de telecomunicaciones (CUT) para un satélite (SAT) que comprende al menos un convertidor de frecuencia según una de las reivindicaciones anteriores.
 - 45 10. Procedimiento de conversión de frecuencia utilizando un convertidor según una de las reivindicaciones anteriores que comprende las siguientes etapas:
 - aplicar a la(s) entrada(s) de RF (EC, EC1, EC2) del modulador electro-óptico de intensidad (MEO) del convertidor dos señales de radiofrecuencia (V_{RF1} , V_{RF2}) cuyas frecuencias deben ser convertidas;

- activar las fuentes ópticas del convertidor (SL1 - SL4) y para generar dichas señales ópticas (SO1 - SO4) en al menos dos longitudes de onda diferentes (λ_1 - λ_4), moduladas por dichas señales del oscilador local respectivo (SOL1 - SOL4);

5 - recuperar las señales ópticas de la salida óptica del modulador electro-óptico de intensidad, convirtiéndolas al dominio de la radiofrecuencia y filtrándolas para extraer los componentes espectrales correspondientes cada uno a una señal de radiofrecuencia de entrada mezclada con una de dichas señales del oscilador local.

11. Procedimiento de la reivindicación 10 comprende además el siguiente paso:

10 - aplicar a al menos una entrada de control del modulador electro-óptico de intensidad una tensión de polarización (V_{B1} , V_{B2} , V_B) adaptada para minimizar la intensidad de un componente espectral de las señales de RF del sistema de detección óptico/eléctrico a una frecuencia de suma o diferencia de las señales de modulación de radiofrecuencia.

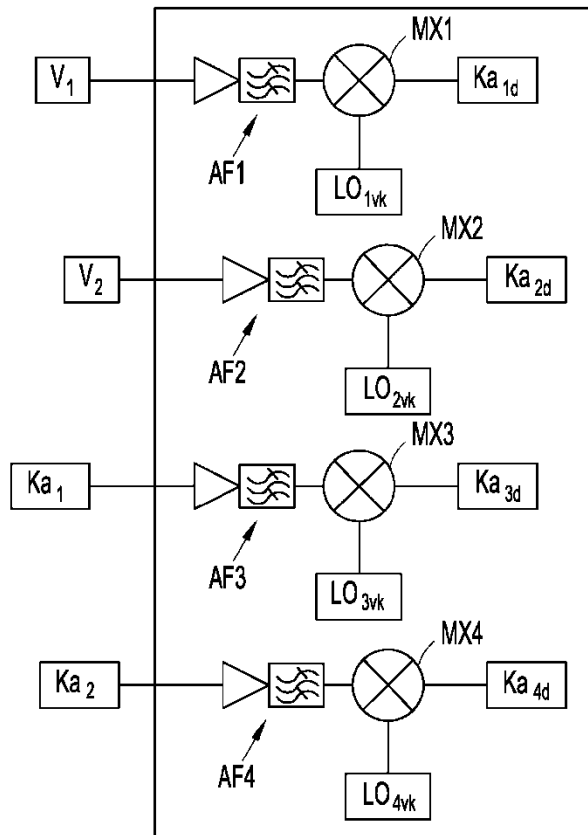


Fig. 1

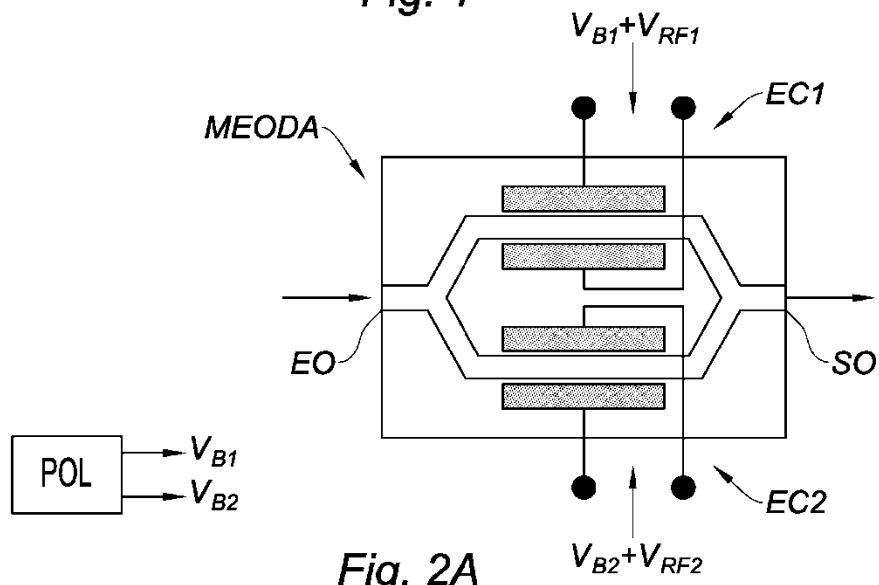
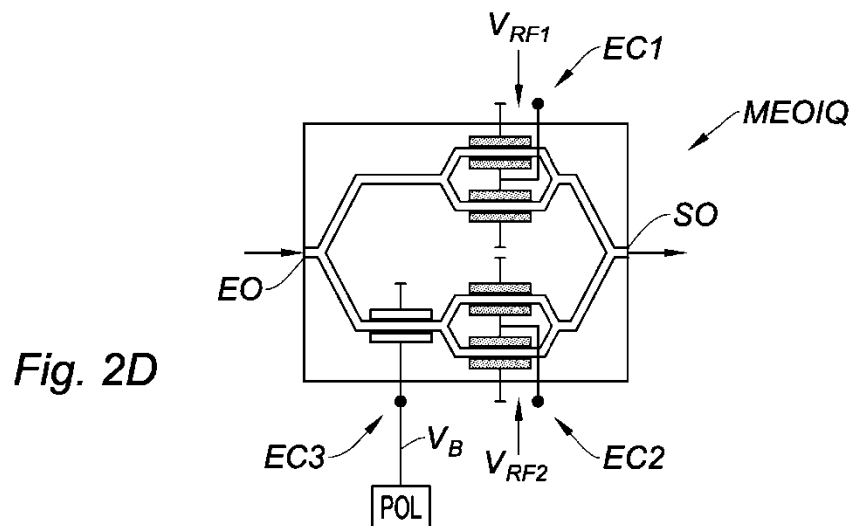
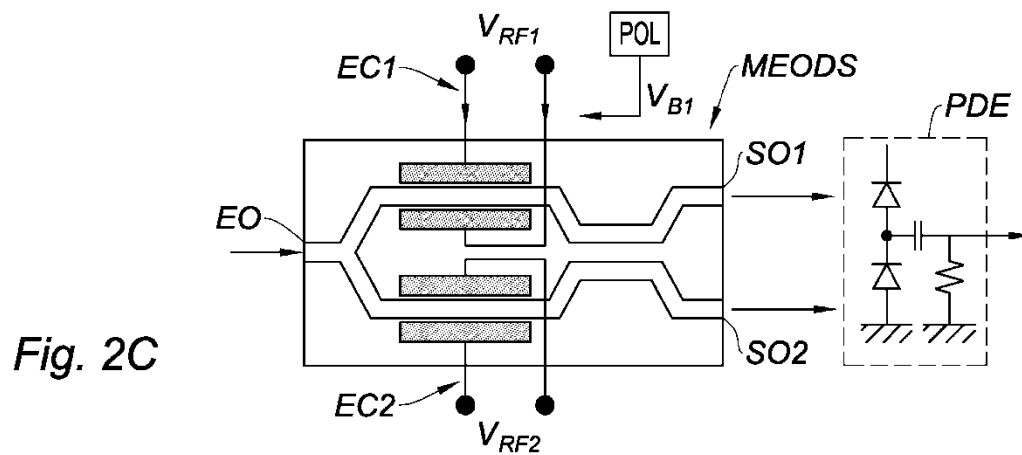
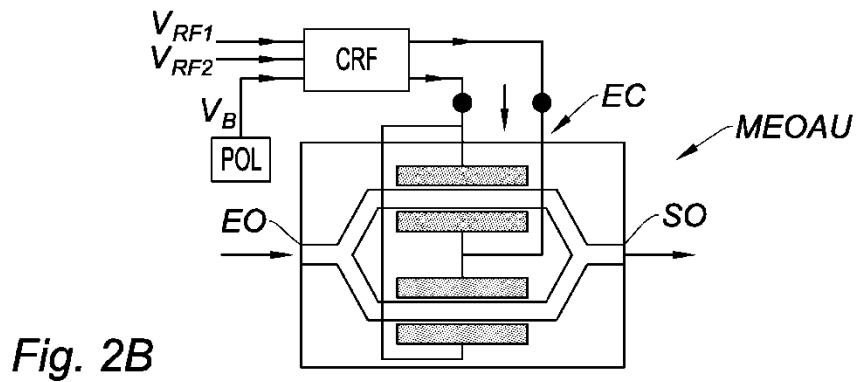


Fig. 2A



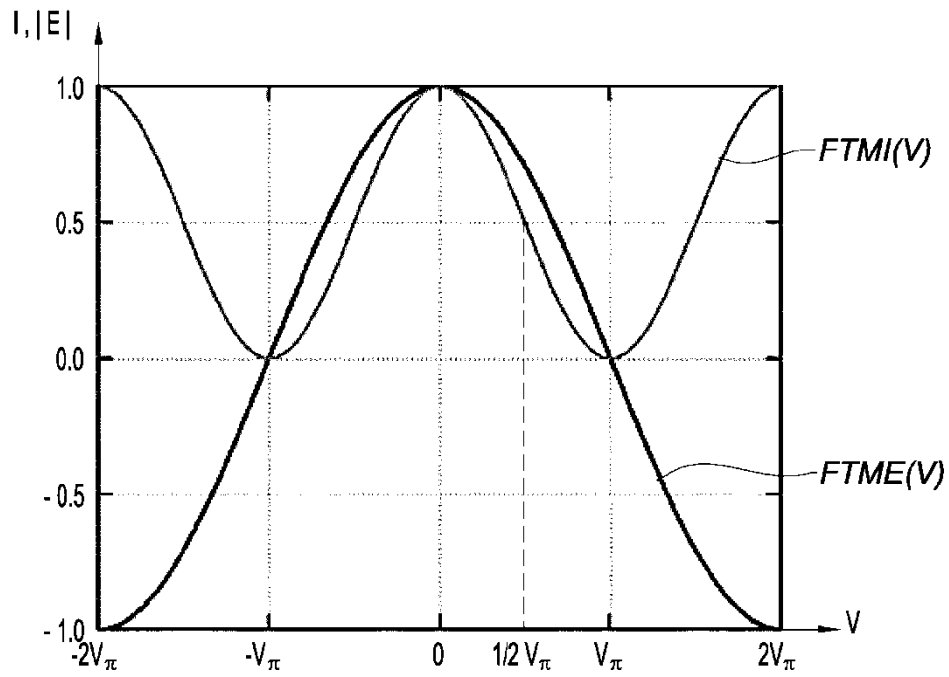


Fig. 2E

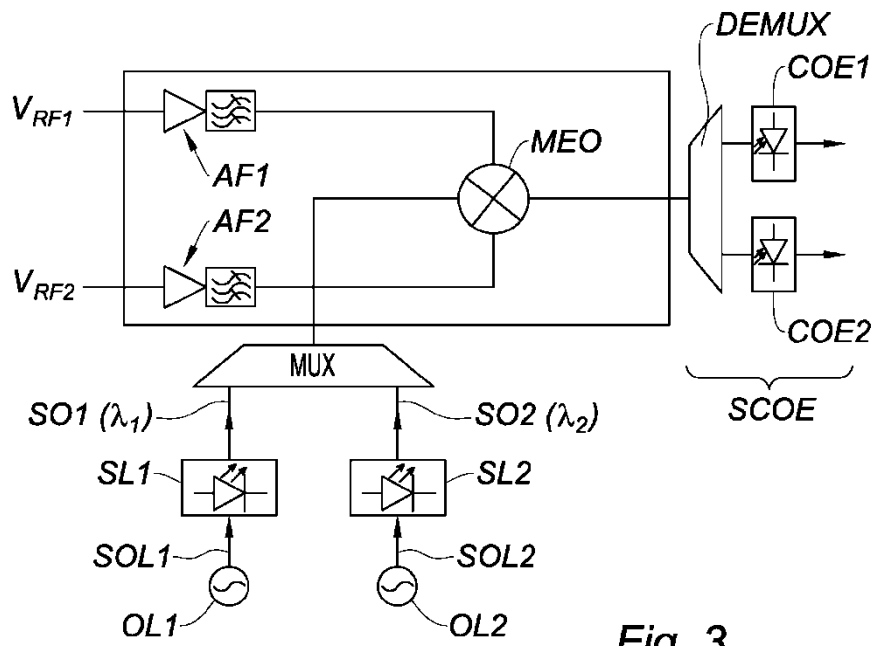
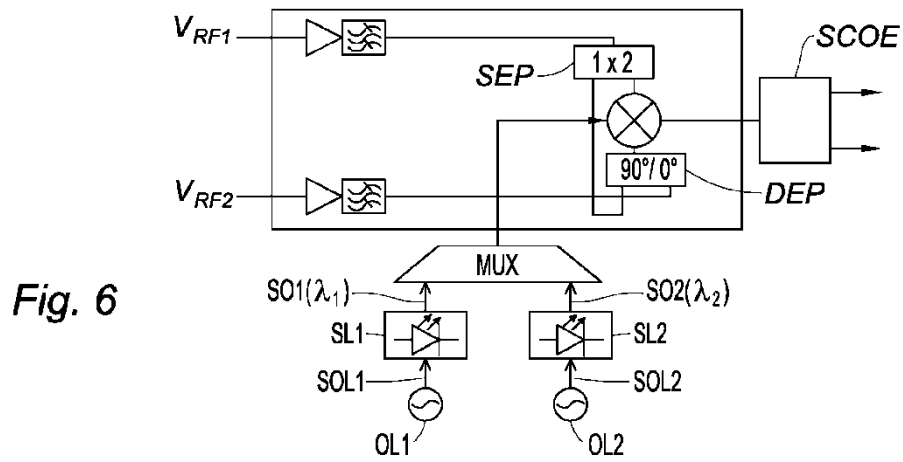
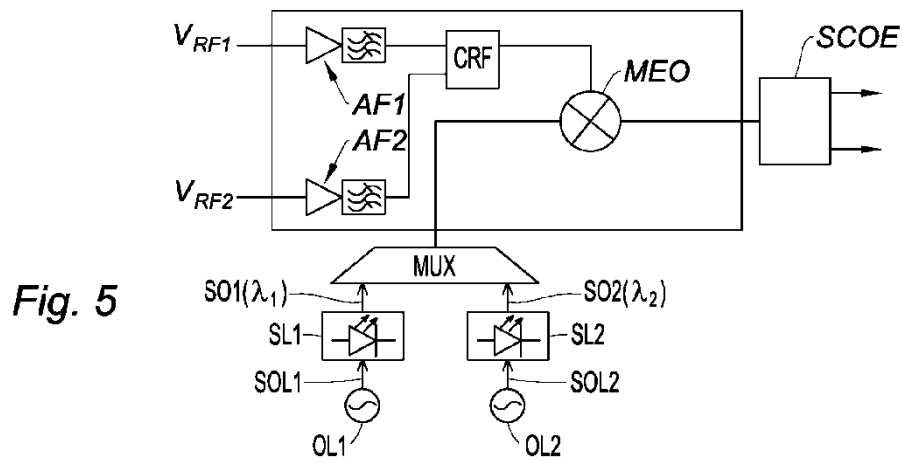
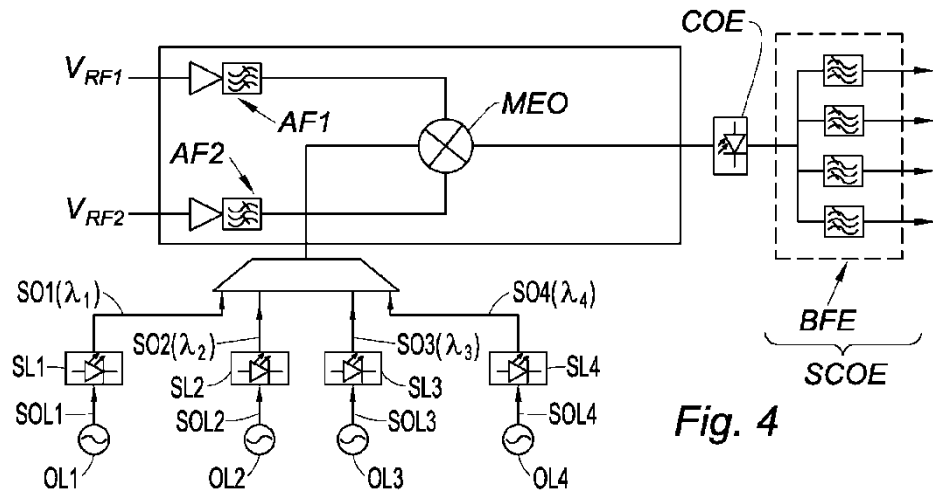
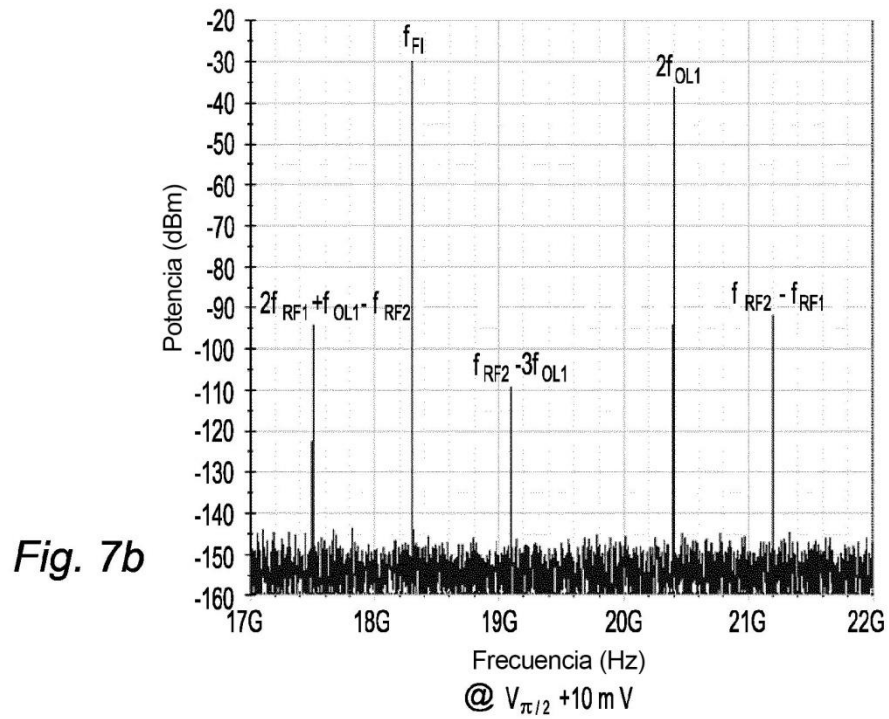
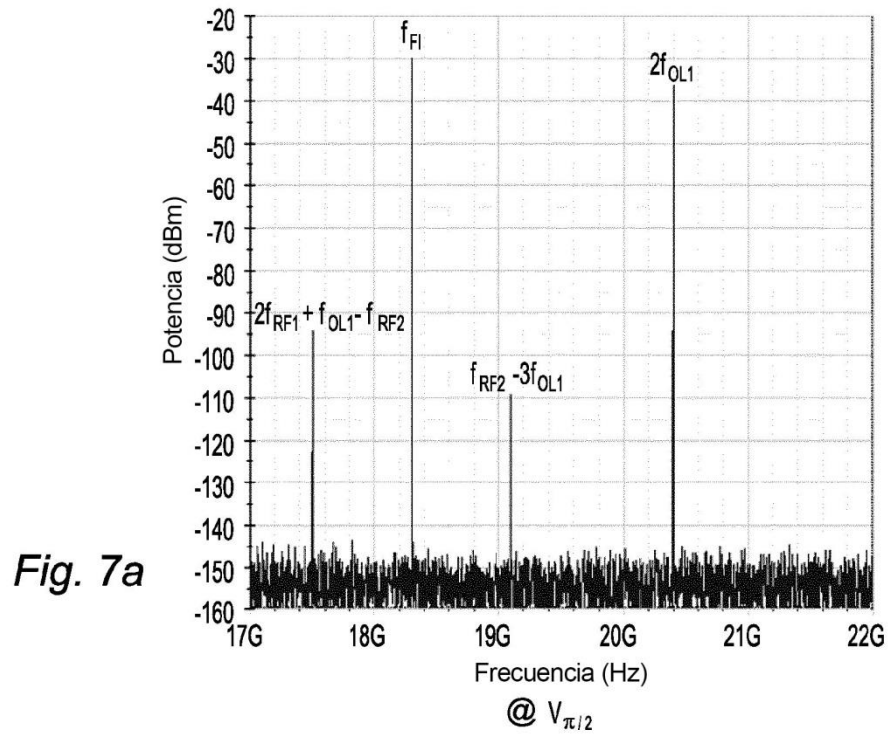
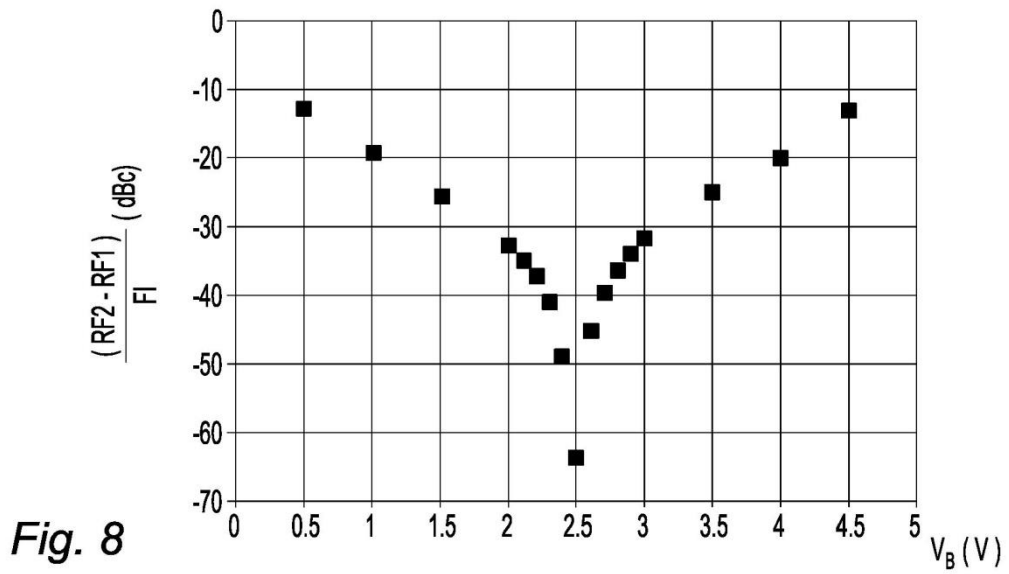
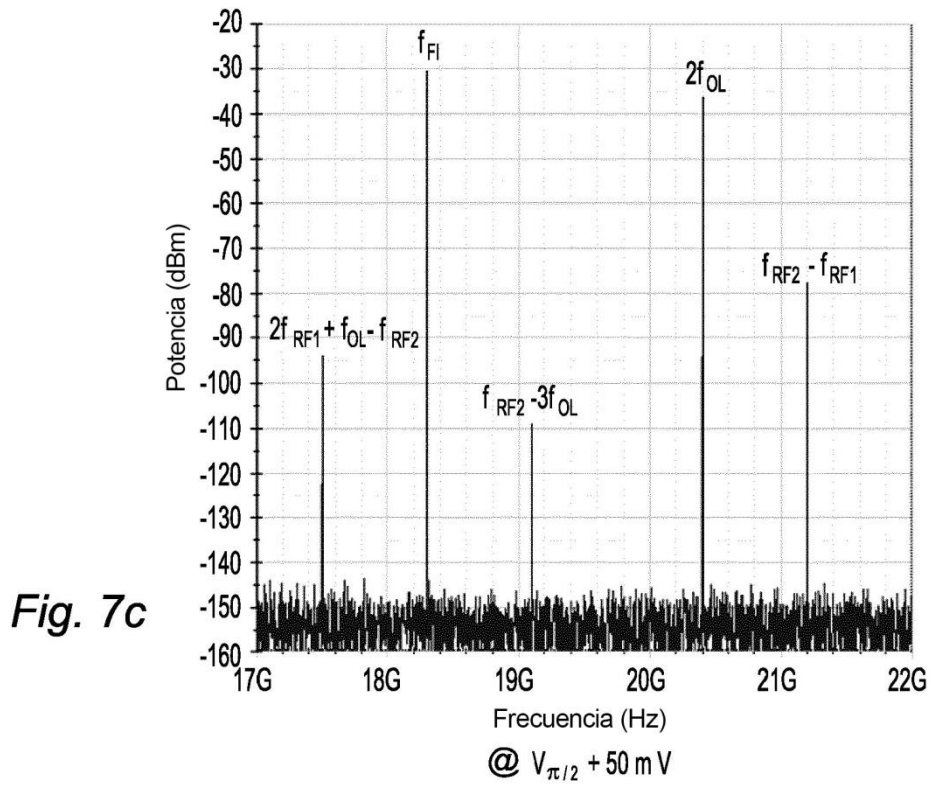


Fig. 3







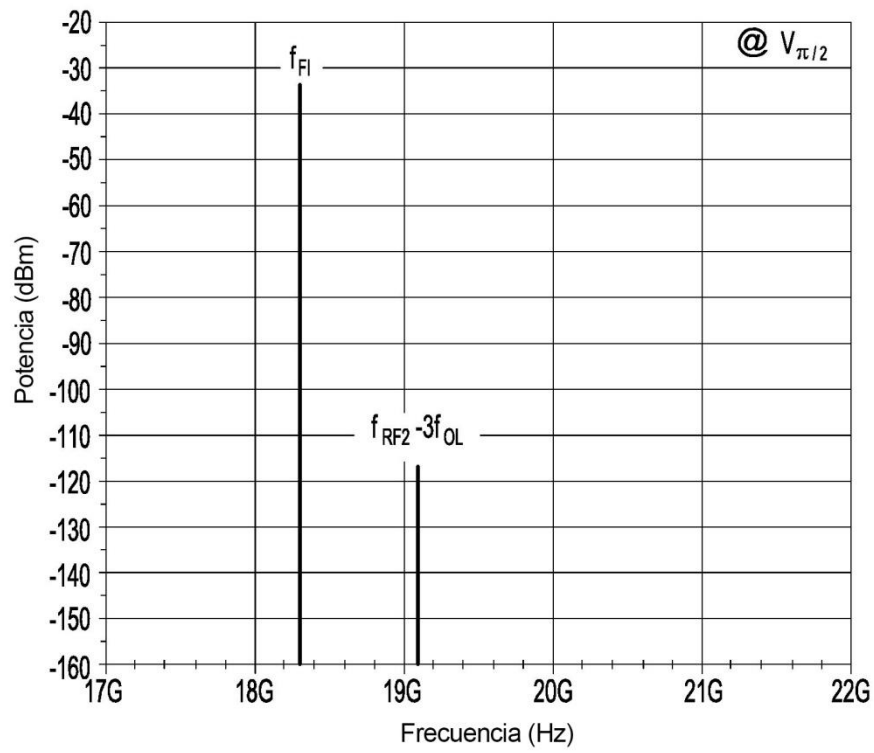


Fig. 9

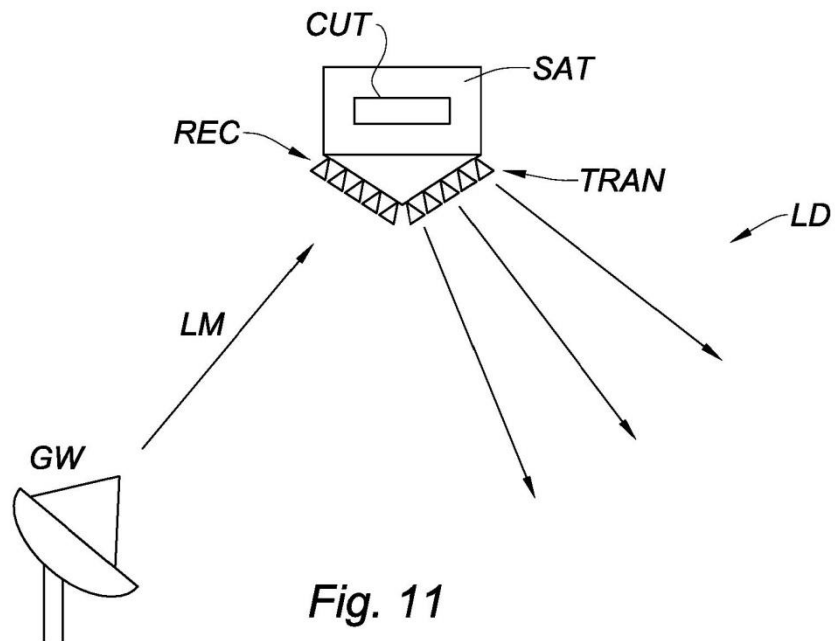


Fig. 11

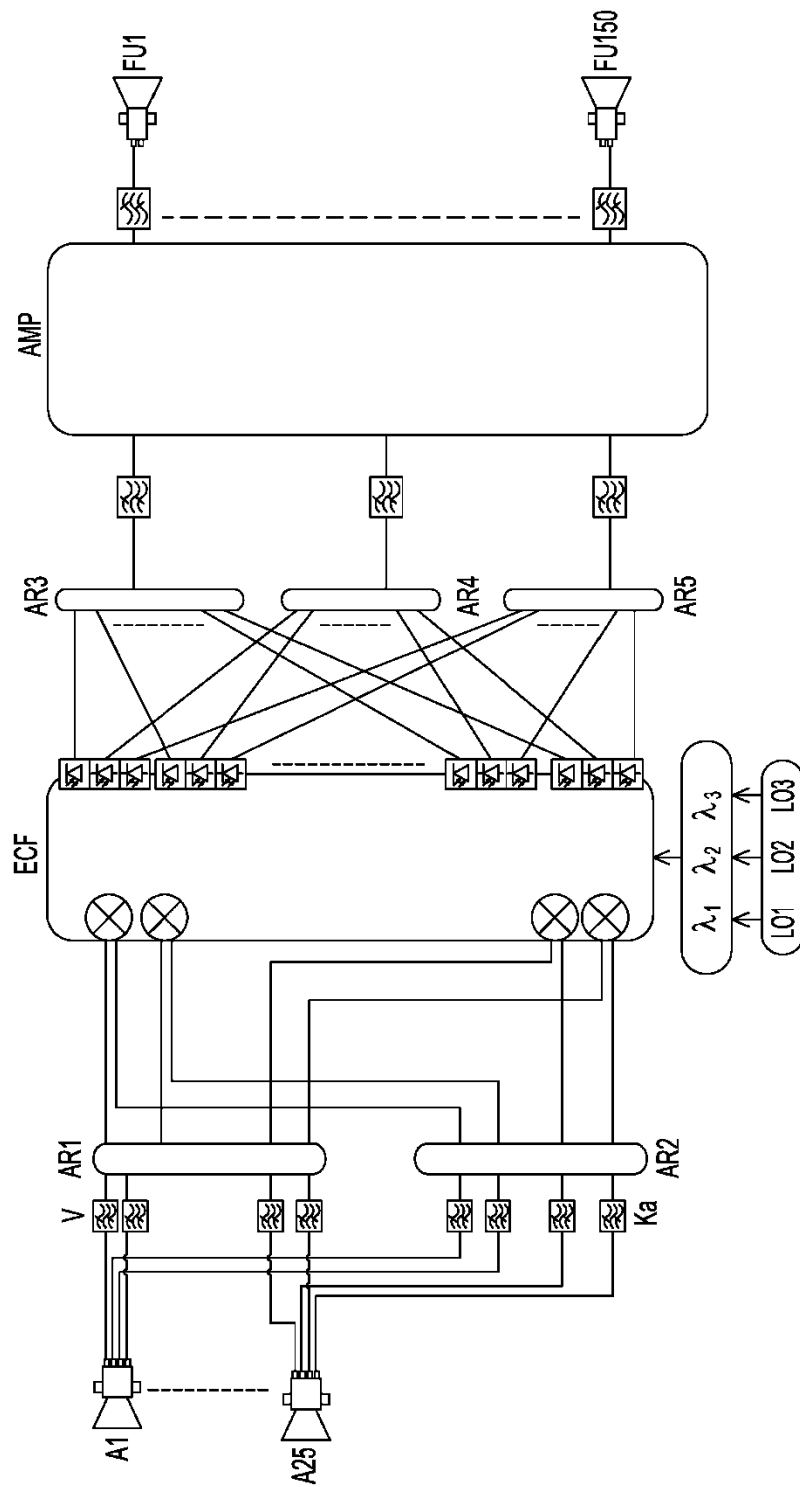


Fig. 10

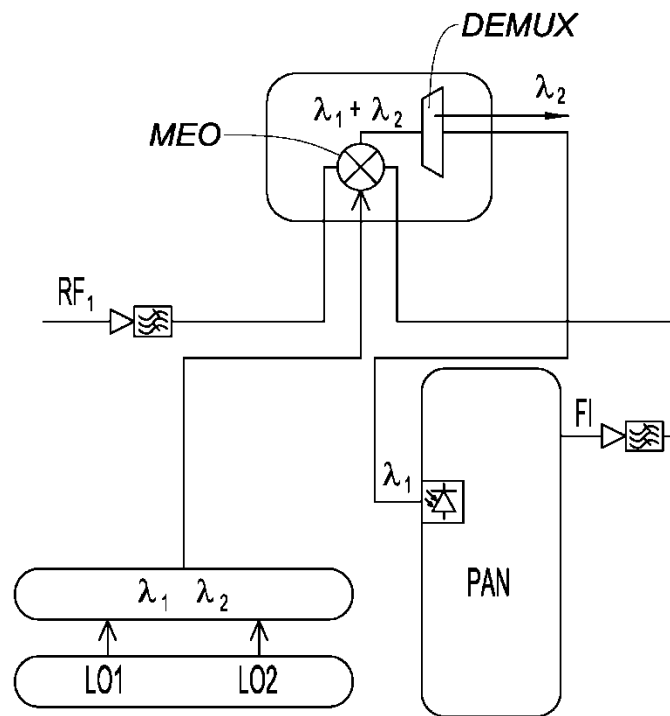


Fig. 12