

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 765 798**

51 Int. Cl.:

H04B 1/18 (2006.01)

H04B 1/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.09.2016 PCT/US2016/050625**

87 Fecha y número de publicación internacional: **16.03.2017 WO17044528**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.09.2016 E 16770398 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.10.2019 EP 3347994**

54 Título: **Calibración de agrupación activa**

30 Prioridad:

10.09.2015 US 201562216592 P

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

11.06.2020

73 Titular/es:

**BLUE DANUBE SYSTEMS, INC. (100.0%)
200 Warren Corporate Center Drive, 2nd Floor
Warren, NJ 07059, US**

72 Inventor/es:

**BANU, MIHAI y
FENG, YIPING**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 765 798 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

Calibración de agrupación activa

5 **Campo técnico**

Las realizaciones de la presente invención se refieren, en general, a la calibración de agrupaciones activas, tales como las agrupaciones de antena en fase del tipo que se usan en los sistemas de comunicaciones.

10 **Antecedentes**

Las agrupaciones activas son dispositivos electrónicos complejos que se usan ampliamente en radares militares y comunicaciones. Además, también se encuentran en algunos sistemas no militares, tales como equipos para pronóstico del tiempo, comunicaciones espaciales y control de tráfico aéreo. En general, las agrupaciones activas son muy beneficiosas en sistemas donde reemplazan la operación mecánica crítica con una operación puramente eléctrica. Por ejemplo, la antena parabólica de un radar convencional tiene un diseño geométrico 3D preciso para generar un solo haz estrecho, mientras que una agrupación activa puede generar múltiples haces estrechos con una construcción plana. Más importante aún, puede cambiarse la dirección del haz de una antena parabólica girando solo la antena en el espacio adecuadamente, pero se cambian las direcciones del haz de una agrupación activa a través de solo medios eléctricos sin ningún movimiento mecánico. Por lo tanto, la agrupación activa reemplaza la formación y dirección del haz mecánico con la formación y dirección del haz eléctrico. Un beneficio adicional importante es un gran aumento en la agilidad de la dirección del haz, ya que la dirección electrónica es sustancialmente más rápida que la dirección mecánica. Mientras que las leyes físicas del movimiento mecánico limitan la dirección mecánica, la dirección eléctrica opera a la velocidad del procesamiento electrónico. Las agrupaciones activas forman y dirigen haces mediante señales coherentes de desplazamiento de fase y escala de magnitud aplicadas a múltiples elementos radiantes.

A pesar de las ventajas mencionadas anteriormente, el uso de agrupaciones activas se ha limitado a sistemas de gama alta debido un coste de fabricación muy alto. Recientemente, en la patente de Estados Unidos 8.611.959, toda la cual se incorpora en el presente documento como referencia, se ha descrito un nuevo método para diseñar agrupaciones activas de bajo coste con posibles aplicaciones comerciales de amplio alcance en sistemas móviles, redes WiFi y otras redes inalámbricas. Añadir tales agrupaciones activas de bajo coste a la infraestructura inalámbrica permitirá la capacidad de generar canales de comunicación de alta calidad a través de haces electrónicamente dirigibles. Estos haces pueden dirigirse de acuerdo con la densidad de tráfico móvil (por ejemplo, véase el documento U.S.S.N. 14/799,935, presentado el 15/7/15 y titulado "Method of Adaptive Beam Placement in Wireless Systems", incorporado en el presente documento como referencia) o pueden escanear el área de servicio rápidamente (por ejemplo, véase la publicación de patente de Estados Unidos 2012/0258754, titulada "Technique for Achieving High Average Spectrum Efficiency in a Wireless System", también incorporada en el presente documento como referencia) para aumentar significativamente la capacidad de la red en ambos casos. Este efecto de aumento de la capacidad se mejora si los haces son estrechos, como los generados por las agrupaciones activas con una gran cantidad de elementos. Cuanto más estrechos sean los haces, mayor será la calidad de las señales intercambiadas entre las estaciones base y los móviles. Mayor calidad de la señal se traduce en una mayor capacidad de red. Además, Los haces estrechos permiten la reutilización de frecuencia mediante la multiplexación por división espacial, lo que también aumenta la capacidad del sistema.

Un requisito clave en el diseño de agrupaciones activas es la uniformidad eléctrica de todos los elementos activos en la agrupación para mantener señales coherentes y estables en fase. Sin una correspondencia muy precisa de la forma en que los elementos responden a los estímulos eléctricos comunes, no es posible generar o dirigir haces bien definidos. Hoy en día, en implementaciones típicas durante la operación se logra una alta uniformidad en toda la agrupación usando arquitecturas costosas, componentes costosos, métodos de ensamblaje costosos y métodos de calibración costosos.

Con el fin de ilustrar los retos del diseño de agrupaciones activas, considérese una radio destinada a una operación independiente, tal como la radio del interior de un teléfono móvil o de una estación base. Por lo general, se requiere que esta radio tenga un excelente rendimiento en términos de linealidad general y ruido. Sin embargo, los cambios de fase de señal debidos a los retrasos en el tiempo a través de los diversos componentes de la radio, tales como mezcladores, amplificadores, filtros, etc., son de poca relevancia y pueden variar amplia y aleatoriamente de una unidad a otra debido a que no afectan al rendimiento del sistema. En otras palabras, si se probara una gran cantidad de radios de teléfonos móviles para detectar el cambio de fase de señal de extremo a extremo (retrasos de las señales), muy pocos, si los hubiera, tendrían las mismas características. Sin embargo, cada radio de teléfono móvil funciona correctamente como una sola radio. Incluso la característica de ganancia general de la radio puede variar moderadamente sin una pérdida importante en el rendimiento del sistema.

El caso de una agrupación activa es fundamentalmente diferente del caso anterior, debido a que todas las radios de la agrupación deben tener las mismas características generales de fase y ganancia a un alto grado de precisión. Esta es una restricción de diseño estricta, especialmente si la agrupación debe operar en condiciones ambientales

amplias, como suele ser el caso. Normalmente, en la técnica actual, la uniformidad eléctrica de la agrupación se realiza construyendo en primer lugar las radios con arquitecturas y componentes, que tienen características estables en condiciones ambientales amplias. Además, la arquitectura de agrupación incluye medios para ajustar la fase general y las características de magnitud de cada elemento de agrupación para poder compensar las impredecibles variaciones operativas y de fabricación. Por último, la agrupación se calibra durante la fabricación y, a menudo, se recalibra a intervalos regulares de mantenimiento programados. La recalibración es necesaria debido a que en la mayoría de los casos la uniformidad eléctrica de la agrupación se deteriora lentamente en el tiempo debido a las condiciones de operación y ambientales.

Naturalmente, el enfoque de diseño descrito anteriormente para las agrupaciones activas convencionales produce altos costes de fabricación y mantenimiento. La patente de Estados Unidos 8.611.959 describe unos métodos para diseñar agrupaciones activas, que tienen un coste significativamente menor que las agrupaciones convencionales debido a su arquitectura simplificada única. Sin embargo, el rendimiento de incluso estas agrupaciones es susceptible a la degradación debido a las variaciones de fabricación y operativas tales como la temperatura, la humedad y el envejecimiento. En el presente documento se desvelan unos métodos para calibrar estas agrupaciones de manera eficaz y automática. Algunos de estos métodos pueden aplicarse sin interrumpir la operación normal de la agrupación. Además, estos métodos también pueden aplicarse a muchas otras agrupaciones activas, incluidas algunas agrupaciones convencionales tales como las agrupaciones digitales.

El documento EP 2 372 836 A1, describe una agrupación de transceptores activos para una red de telecomunicaciones inalámbrica. La agrupación de transceptores comprende una pluralidad de módulos de transceptor calibrables. Cada módulo de transceptor comprende una cadena de transceptor operable para procesar una señal primaria y generar una señal primaria procesada; una unidad de comparación operable para comparar dicha señal primaria y dicha señal primaria procesada para determinar un error en la cadena de transceptor inducido por dicha cadena de transceptor en dicha señal primaria procesada; y una unidad de corrección que usa el error de transceptor para corregir dicha señal primaria a procesar por dicha cadena de transceptor.

El documento US 5 412 414 A describe un radar de agrupación en fase con auto monitorización/calibración en el que puede monitorizarse/calibrarse la ruta de operación para la transmisión y la ruta de operación para la recepción mediante la adición de una red de calibración corporativa acoplada en el extremo plural a los elementos de antena y en el extremo singular al excitador/receptor, y unos medios de conmutación para encaminar selectivamente la señal de monitorización/calibración obtenida a partir del excitador en una ruta de transmisión a la secuencia de ruta de calibración o en una ruta de calibración a la secuencia de ruta de recepción.

La patente US 6.157.343 describe un método y un sistema relacionado para calibrar la recepción y la transmisión de una red de antenas para su uso en un sistema de comunicación móvil. La calibración de la recepción de la agrupación de antenas se realiza inyectando una única señal de calibración en cada una de varias secciones de antena de recepción, en paralelo. Las señales se recogen después de haber pasado los componentes de recepción que podrían haber distorsionado la fase y la amplitud. Los factores de corrección se generan y se aplican a las señales recibidas. La calibración de la transmisión de la agrupación de antenas se realiza de manera similar. Se genera una sola señal de calibración y se inyecta en cada una de varias secciones de antena de transmisión, una cada vez. Las señales se recogen, una cada vez, después de haber pasado los componentes de transmisión que podrían haber distorsionado la fase y la amplitud. Los factores de corrección se generan y se aplican a las señales a transmitir.

Sumario

Las realizaciones de la presente invención incluyen métodos y sistemas para calibrar automáticamente las agrupaciones en fase antes de comenzar la operación normal y durante la operación normal.

En general, en un aspecto, al menos una de las invenciones cuenta con un método para calibrar una red en fase que incluye una agrupación de elementos de antena, una pluralidad de circuitos de comunicación de RF cada uno de los cuales está acoplado eléctricamente a un elemento de antena correspondiente diferente dentro de la agrupación de elementos de antena y una red de alimentación de señal que acopla eléctricamente una primera línea de señal a una pluralidad de segundas líneas de señal, en el que cada segunda línea de señal de la pluralidad de segundas líneas de señal está acoplada eléctricamente a un circuito de comunicación de RF correspondiente diferente entre pluralidad de circuitos de comunicación de RF. El método implica: realizar una primera fase de una operación de calibración, implicando la primera fase de la operación de calibración calibrar la red de alimentación de señal independientemente de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF; y realizar una segunda fase de la operación de calibración, implicando la segunda fase de la operación de calibración calibrar, independientemente de la red de alimentación de señal, cada uno de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF hasta que se calibren todos los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF.

Otras realizaciones incluyen una o más de las siguientes características. El método también implica realizar repetidamente la segunda fase de la operación de calibración sin repetir la primera fase de la operación de calibración. El método implica realizar la segunda fase de la operación de calibración a intervalos de tiempo

predeterminados o realizar la segunda fase de la operación de calibración siempre que se detecte un cambio predeterminado en el entorno de la agrupación en fase. La calibración de la red de alimentación de señal implica determinar una corrección de fase y/o una corrección de magnitud para cada una de la pluralidad de segundas líneas de señal y a continuación aplicar las correcciones de fase y/o las correcciones de magnitud para la pluralidad de segundas líneas a la agrupación en fase. Calibrar cada uno de los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF implica determinar una corrección de fase y/o una corrección de magnitud para cada uno de los circuitos de comunicación de RF y a continuación aplicar las correcciones de fase y/o correcciones de magnitud para la pluralidad de circuitos de comunicación de RF a la agrupación en fase.

Otras realizaciones más incluyen una o más de las siguientes características. La red de alimentación de señal es una red de distribución de señal y cada circuito de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF es un circuito de transmisión de RF para accionar el elemento de antena al que ese circuito de comunicación de RF está acoplado eléctricamente. Como alternativa, la red de alimentación de señal es una red de agregación de señal y cada circuito de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF es un módulo de recepción de RF para procesar una señal recibida por el elemento de antena al que ese circuito de comunicación de RF está acoplado eléctricamente. Cada circuito de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF incluye al menos uno de un mezclador para la conversión ascendente de una señal de IF recibida desde la red de distribución a RF y un mezclador para la conversión descendente de una señal de RF recibida desde el elemento de antena acoplado a ese circuito de comunicación de RF a IF. Durante la segunda fase de la operación de calibración, calibrar solo un subconjunto de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF cada vez, en el que cada subconjunto es al menos uno pero no todos los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF. En algunas realizaciones, cada subconjunto incluye solo un circuito de comunicación de RF. Durante la segunda fase de la operación de calibración, desconectar eléctricamente cualquier circuito de comunicación de RF que está calibrándose de la red de señalización mientras está calibrándose ese circuito de comunicación de RF.

En general, en otro aspecto más, al menos una de las invenciones dispone de un sistema de agrupación de antenas en fase que incluye: una red de alimentación de señal que acopla eléctricamente una primera línea de señal a una pluralidad de segundas líneas de señal; una agrupación de elementos de antena; una pluralidad de circuitos de comunicación de RF, teniendo cada circuito de comunicación de RF de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF un primer puerto y un segundo puerto, estando el primer puerto conectado eléctricamente a una segunda línea de señal correspondiente diferente entre la pluralidad de segundas líneas de señal de la red de alimentación de señal y estando el segundo puerto conectados eléctricamente a un elemento de antena correspondiente diferente dentro de la agrupación de elementos de antena; y una pluralidad de circuitos de calibración igual en número a la pluralidad de circuitos de comunicación de RF, estando cada uno conectado eléctricamente y para calibrar, independientemente de la red de alimentación de señal, un circuito de comunicación de RF correspondiente diferente entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF.

Otras realizaciones incluyen una o más de las siguientes características. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 20, incluye además una pluralidad de conmutadores, estando cada uno de los cuales asociado a un circuito de comunicación de RF diferente entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF y cada uno de los cuales es para conectar y desconectar eléctricamente su circuito de comunicación de RF asociado de la segunda línea de señal correspondiente a la que ese circuito de comunicación de RF está conectado eléctricamente. La agrupación de antenas en fase también incluye un sistema de procesador programado para ejecutar una operación de calibración durante la que el sistema de procesador usa cada circuito de calibración para realizar mediciones en su circuito de comunicación de RF conectado y generar datos de corrección de calibración a partir de las mediciones. El sistema de procesador está programado para secuenciar a través de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF seleccionando un subconjunto de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF cada vez y, para cada subconjunto seleccionado de circuitos de comunicación de RF, usar los circuitos de calibración para el subconjunto seleccionado de los circuitos de comunicación de RF para calibrar los circuitos de comunicación de RF seleccionados, hasta que se calibren todos de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF, y en el que cada uno de los subconjuntos seleccionados incluye al menos uno pero no todos de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF. El sistema de procesador también está programado para secuenciar a través de todos de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF seleccionando uno de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF cada vez y, para ese circuito de comunicación de RF seleccionado, usar el circuito de calibración para ese circuito de comunicación de RF seleccionado para calibrar ese circuito de comunicación de RF seleccionado, hasta que se calibren todos de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF. El sistema de procesador está programado para hacer que los conmutadores desconecten eléctricamente cada circuito de comunicación de RF de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF de su segunda línea de señal correspondiente de la red de alimentación de señal cuando ese circuito de comunicación de RF está calibrándose.

Otras realizaciones más incluyen una o más de las siguientes características. Cada circuito de calibración entre la pluralidad de circuitos de calibración incluye: una línea de salida de señal de referencia para introducir una señal de referencia en el circuito de comunicación de RF conectado a ese circuito de calibración; una línea de monitorización para recibir del circuito de comunicación de RF conectado a ese circuito de calibración una señal de salida resultante de la señal de referencia introducida en ese circuito de comunicación de RF; y un circuito de calibración de fase para

generar una corrección de fase para ese circuito de comunicación de RF, en el que la corrección de fase para ese circuito de calibración se obtiene a partir de las señales de referencia y de salida para ese circuito de calibración. Cada circuito de calibración entre la pluralidad de circuitos de calibración incluye además: un circuito de calibración de magnitud para generar una corrección de magnitud para ese circuito de comunicación de RF, en el que la corrección de magnitud para ese circuito de calibración se obtiene a partir de las señales de referencia y de salida para ese circuito de calibración. Cada circuito de comunicación de RF de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF incluye: un mezclador de RF; una circuitería de entrada de RF conectada eléctricamente al elemento de antena; una circuitería de ajuste de fase para ajustar la fase de una señal que pasa a través de ese circuito de comunicación de RF; una línea de señal de comunicación para transportar una señal de comunicación entre una red de señalización exterior y ese circuito de comunicación de RF; y una línea de señal de LO para recibir una señal de oscilador local (LO) para el mezclador de RF.

Los detalles de una o más realizaciones de las invenciones se exponen en los dibujos adjuntos y la descripción siguiente. Otras características, objetivos y ventajas de las invenciones serán evidentes a partir de la descripción y los dibujos, y de las reivindicaciones.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 representa un diagrama esquemático simplificado de una agrupación en fase analógica clásica típica.

La figura 2 representa un diagrama esquemático simplificado de un módulo de Tx/Rx de agrupación en fase con un único canal de transmisión y un único canal de recepción.

La figura 3 representa un diagrama esquemático simplificado de un módulo de Tx/Rx de agrupación en fase con múltiples canales de transmisión y recepción.

La figura 4 representa un diagrama esquemático reducido de una agrupación en fase analógica clásica con múltiples canales de transmisión y recepción.

La figura 5 representa un diagrama esquemático de una alimentación corporativa clásica con ocho ramas superiores.

La figura 6 representa un diagrama esquemático simplificado de un método de calibración de transmisor típico para la agrupación en fase analógica clásica de la figura 4.

La figura 7 representa un diagrama esquemático simplificado de un método de calibración de receptor típico para la agrupación en fase analógica clásica de la figura 4.

La figura 8 representa un diagrama esquemático reducido de una agrupación en fase analógica con alimentaciones de IF similares a la arquitectura descrita en la patente de Estados Unidos 8.611.959.

La figura 9 representa un diagrama esquemático de una red de alimentación en serie.

La figura 10 representa un diagrama esquemático de una red de distribución de LO de acuerdo con los métodos descritos en la patente de Estados Unidos 8.553.826.

La figura 11 representa el principio para calibrar el cambio de fase de transmisor del módulo de Tx/Rx 2347 de la figura 8.

La figura 12 representa el principio para calibrar el cambio de fase de receptor del módulo de Tx/Rx 2347 de la figura 8.

La figura 13 representa el principio para calibrar la ganancia de transmisor del módulo de Tx/Rx 2347 de la figura 8.

La figura 14 representa el principio para calibrar la ganancia de receptor del módulo de Tx/Rx 2347 de la figura 8.

La figura 15 representa un diagrama esquemático simplificado de la parte del transmisor de un módulo de Tx/Rx con fase de transmisor y circuitos de calibración de ganancia.

La figura 16 representa un diagrama esquemático simplificado de la parte del receptor de un módulo de Tx/Rx con fase de receptor y circuitos de calibración de ganancia.

La figura 17 representa un primer principio para la calibración de la distribución de IF y las redes de agregación de IF de la agrupación en fase de la figura 8.

La figura 18 representa un segundo principio para la calibración de la distribución de IF y las redes de agregación de IF de la agrupación en fase de la figura 8.

5 La figura 19 representa un esquema simplificado de un posible circuito que genera señales de referencia de IF (bloque 6c en la figura 18).

La figura 20 representa un sistema que soporta el método de calibración de dos etapas para una agrupación analógica.

10 La figura 21 representa un sistema que soporta el método de calibración de dos etapas para una agrupación digital.

La figura 22 es un diagrama de flujo del bucle de programa principal.

15 La figura 23 es un diagrama de flujo de la subrutina que realiza la primera etapa de la operación de calibración.

La figura 24 es un diagrama de flujo de la subrutina que realiza la segunda fase de la operación de calibración.

20 Descripción detallada

Agrupaciones activas analógicas convencionales

25 Las agrupaciones de antenas activas típicas contienen una pluralidad de elementos de antena localizados en una rejilla, que puede ser lineal, plana, o conforme a una superficie. La separación física de los elementos de antena está relacionada con la frecuencia de operación de la agrupación y muy a menudo equivale a la mitad de la longitud de onda promedio de las señales transmitidas o recibidas. Esto es necesario para que la agrupación genere haces estrechos con lóbulos laterales bajos. Ya que las agrupaciones típicas tienen una gran cantidad de elementos, son sistemas eléctricos fundamentalmente grandes. En otras palabras, el tamaño del sistema de agrupación es grande con respecto a las longitudes de onda de radiofrecuencia (RF) usadas.

30 La figura 1 ilustra la estructura típica de una agrupación activa analógica convencional, tal como una agrupación en fase para aplicaciones FDD (duplexación por división de frecuencia). Los elementos de antena 1 se colocan en configuraciones lineales, planas o conformes. Los módulos de Tx/Rx activos 2340 accionan los elementos de antena para la transmisión y reciben señales de los elementos de antena para la recepción. El sistema de agrupación de la figura 1 funciona de la siguiente manera. Durante la transmisión, el procesador de banda base 10 envía una señal digital a una etapa de transmisión de frecuencia intermedia (IF) 9t, que convierte esta señal en una señal de IF analógica usando convertidores y filtros de digital a analógico y la aplica al nodo IFt. Un mezclador 7t usa una señal de oscilador local (LO) generada por el generador de LO 8 para la conversión ascendente de la señal de IF de transmisión analógica a radiofrecuencia (RF) y la aplica al nodo RFt. A continuación, esta señal de RF se distribuye a todos los módulos de Tx/Rx 2340 a través de la red de distribución de Tx 5t. Los módulos de Tx/Rx accionan los elementos de antena 1. Durante la recepción, las señales de RF de los elementos de antena 1 se reciben por los módulos de Tx/Rx 2340 y se agregan a través de la red de agregación de Rx 5r en una sola señal de recepción de RF aplicada en el nodo de RFr. Esta señal de recepción de RF se convierte descendente a IF mediante el mezclador 7r usando la señal de LO del generador de LO 8. La etapa de recepción de IF 9r convierte la señal de recepción de IF analógica en una señal digital usando unos convertidores y filtros de analógico a digital y la envía al procesador de banda base 10. En general, los valores de IF de transmisión y recepción pueden ser diferentes (en cuyo caso hay dos señales de LO, no mostradas en la figura 1 por simplicidad) pero también pueden ser iguales. En el caso donde las señales de IF que pasan a través de las etapas 9t y 9r son señales de banda base (cero IF), las etapas de IF 9t y 9r y los mezcladores 7t y 7r son bloques complejos, es decir, procesan señales en fase (I) y en cuadratura (Q). Los valores de IF (no cero o cero) no son esenciales. Para el resto de esta memoria descriptiva se consideran valores de IF distintos de cero (sin procesamiento I/Q), pero todas las discusiones y conclusiones también son válidas para los casos de IF cero.

55 Los módulos de Tx/Rx activos 2340 de la figura 1 contienen amplificadores, filtros, cambiadores de fase ajustables y etapas de ganancia ajustables. Los bloques de control 12 y 11 fijan o cambian la configuración de estos cambiadores de fase y etapas de ganancia por separado e independientemente, en general en buses de control digital. Un programa que se ejecuta en el procesador de banda base 10 u otro controlador digital (no mostrado por simplicidad) acciona los bloques de control 11 y 12. Cada conjunto de valores de fase y ganancia para todos los elementos de antena implementan patrones de radiación específicos, tal como un haz estrecho o una forma más compleja. Al cambiar estos conjuntos de valores de fase y magnitud de manera apropiada, la radiación de agrupación (tanto de transmisión como de recepción) se conforma para implementar funciones avanzadas tales como la dirección del haz para rastrear un objetivo móvil, escaneo del haz, abanico (cambio del tamaño del haz), etc.

65 La figura 2 muestra un esquema simplificado de un módulo de Tx/Rx típico 2340. En la ruta de transmisión, la señal de transmisión de RF en el nodo At pasa a través de una etapa de ganancia ajustable 4t, un cambiador de fase

ajustable 3t y un amplificador de potencia 2t. Finalmente, la señal de transmisión se envía al elemento de antena 1 a través de un duplexor 2d. En la ruta de recepción, la señal de RF recibida pasa desde el elemento de antena 1 a través del duplexor 2d al amplificador de bajo ruido 2r, un cambiador de fase ajustable 3r y una etapa de ganancia ajustable 4r. La señal de RF recibida sale del módulo de Tx/Rx en el nodo Ar. El bloque 2 que contiene el amplificador de potencia 2t, el amplificador de bajo ruido 2r y el duplexor 2d se llama entrada de RF FE-RF.

La arquitectura de la agrupación activa en la figura 1 contiene un único canal de transmisión y un único canal de recepción. Pueden soportarse múltiples canales independientes agregando rutas paralelas de transmisión y recepción. Por ejemplo, un segundo canal de transmisión independiente tendría una conexión digital separada del controlador de banda base 10, una etapa de IF separada 9t, un mezclador de conversión ascendente separado 7t, una red de distribución separada 5t y unos cambiadores de fase ajustables separados 3t y unas etapas de ganancia ajustables 4t en los módulos de Tx/Rx. Las dos señales de RF de transmisión se agregarían antes de entrar en el amplificador de potencia 2t en el módulo de Tx/Rx. Pueden agregarse canales de transmisión adicionales de la misma manera. De manera similar, pueden agregarse múltiples canales de recepción duplicando tantas veces como sea necesario los cambiadores de fase ajustables 3r y las etapas de ganancia ajustables 4r en el módulo de Tx/Rx, y también la red de agregación 5r, la red de conversión descendente 7r y la etapa de IF 9r. Al igual que en el caso del transmisor, se necesitarían múltiples conexiones digitales al procesador de banda base 10 para soportar múltiples canales de recepción.

El diagrama de un módulo de Tx/Rx de canal múltiple 234 se muestra en la figura 3. Hay n terminales de entrada para n canales de transmisión (At-1, At- 2... At-n) y p terminales de salida para p canales de recepción (Ar-1, Ar-2... Ar-p). En el interior del módulo de Tx/Rx 234, todas las señales de transmisión se agregan con el sumador 22t y todas las señales de recepción se generadas por el divisor de señal 22r. El FE-RF 2 en el interior del módulo de Tx/Rx 234 es el mismo que en el módulo de Tx/Rx 2340 de la figura 2.

La arquitectura de la agrupación activa en la figura 1 con múltiples canales de transmisión/recepción y módulos de Tx/Rx como en la figura 3 tiene simetría entre las rutas de transmisión y recepción si se ignoran las direcciones de flujo de señal. Por esta razón, es posible y conveniente representar esta arquitectura compleja de manera muy simple como en la figura 4. Cuando se trata cualquier ruta de transmisión, se considera que las señales fluyen desde el procesador de banda base 10 a los elementos de antena 1 y cuando se trata cualquier ruta de recepción, se considera que las señales fluyen desde los elementos de antena 1 al procesador de banda base 10. Por lo tanto, el cambiador de fase ajustable 3 de la figura 4 comprende los cambiadores de fase 3t y 3r de la figura 3, la etapa de ganancia ajustable 4 comprende las etapas de ganancia 4t y 4r, la red 5 comprende las redes 5t y 5r, el mezclador 7 comprende los mezcladores 7t y 7r y la etapa de IF 9 comprende las etapas de IF 9t y 9r.

Sin embargo, otra posibilidad arquitectónica representada igualmente por el diagrama de la figura 4 es una operación de agrupación en fase en el modo de duplexación por división de tiempo (TDD). Todos los casos tratados hasta ahora son para la duplexación por división de frecuencia (FDD). En el caso de TDD, el FE-RF contiene un conmutador de RF en lugar del duplexador. Los enfoques descritos en este caso son igualmente válidos para las arquitecturas de FDD y TDD. Para el resto de esta memoria descriptiva, la operación de FDD se muestra específicamente, pero todas las discusiones y conclusiones pueden aplicarse directamente a la operación de TDD.

Normalmente, cada módulo de Tx/Rx 234 es un sistema eléctricamente pequeño (tamaño físico en el mismo orden de magnitud o menor que la longitud de onda de RF), pero cuando una pluralidad de módulos de Tx/Rx se colocan detrás de los elementos de antena en la agrupación, se crea un gran sistema eléctrico activo. Para la agrupación analógica convencional de la figura 4, la red de distribución/agregación 5 es el único componente del sistema que abarca grandes distancias eléctricas. En la dirección de transmisión, el mezclador 7 acciona el único puerto de RF de la red 5, que distribuye la señal de RF de transmisión de manera coherente (por ejemplo, fases de salida iguales) a todos los módulos de Tx/Rx a través de las rutas 51, 52, 58, etc. En la dirección de recepción, los módulos de Tx/Rx accionan los puertos A, B... H de la red 5, que agrega estas señales de manera coherente en una sola señal de recepción aplicada al mezclador 7 a través de las rutas 51, 52, 58, etc. Normalmente, la red de distribución/agregación 5 es una red recíproca lineal pasiva con unas rutas eléctricamente idénticas 51, 52... 58. Este requisito garantiza la distribución/agregación coherente de las señales.

La figura 5 muestra la estructura de la red de distribución/agregación más común usada en agrupaciones activas, llamada "alimentación corporativa" o un "colector de RF". Esta red lineal pasiva consiste en unas secciones de líneas de transmisión conectadas en una estructura de árbol con simetría eléctrica de N pliegues, donde N es el número de ramas superiores que terminan en los nodos A, B... H. La distancia eléctrica o el tiempo de propagación de señal desde el nodo RAIZ a cualquiera de estos nodos son esencialmente idénticos. El ejemplo de la figura 5 es una alimentación corporativa unidimensional con ocho ramas. Las alimentaciones corporativas con más ramas y de mayor dimensión (por ejemplo, bidimensionales para agrupaciones planas) son similares pero más complejas. Cuantos más elementos alimenten, más simetrías eléctricas deben tener (rutas de extremo a extremo eléctricamente iguales). Esto explica la razón fundamental por la que las alimentaciones corporativas son caras de fabricar. El gran número de simetrías se logra manteniendo propiedades eléctricas uniformes a lo largo de grandes distancias eléctricas, lo que requiere materiales y tecnologías de ensamblaje caros.

En el presente documento se trata el caso habitual donde las rutas de red de distribución/agregación (por ejemplo, alimentación corporativa) tienen la misma longitud eléctrica, pero las redes de distribución/agregación con rutas que tienen diferentes longitudes eléctricas, también pueden usarse siempre que las diferencias en estas longitudes se tengan en cuenta al programar los cambios de fase en los módulos de Tx/Rx.

Calibración de agrupación activa de extremo a extremo convencional

Incluso cuando la red de distribución/agregación 5 de la figura 4 es una alimentación corporativa de alta calidad, todo el sistema es todavía susceptible a grandes errores de fase y magnitud debido a la fabricación y a las variaciones de operación de los módulos de Tx/Rx. Una opción práctica para obtener sistemas viables, aunque caros, es diseñar los módulos de Tx/Rx con características estables sobre las variaciones de operación, tal como la temperatura y la humedad, pero sin intentar obtener características totalmente predecibles sobre las variaciones de fabricación, lo que aumentaría aún más el coste ya de por sí elevado. Esto requiere una calibración de fábrica posterior a la fabricación y recalibraciones regulares después de un número de horas de operación en el campo.

Los métodos típicos para la calibración de las agrupaciones convencionales se muestran en las figuras 6 y 7 para la calibración del transmisor y del receptor respectivamente. En ambos casos, se necesita una red de calibración 100 para realizar la calibración de extremo a extremo de todas las rutas de agrupación de manera secuencial. En el caso del transmisor de la figura 6, el procesador de banda base 10 envía una señal a través del sistema de agrupación, que la red de calibración 100 recibe de cada elemento de antena, una cada vez (señales 101). En otras palabras, cuando la red de calibración 100 recibe la señal 101 desde un elemento de antena específico, todos los módulos de Tx/Rx se apagan excepto el módulo de Tx/Rx del elemento de antena en consideración. La red de calibración 100 envía la señal recibida de vuelta al procesador de banda base 10, que compara la señal recibida 102 con la señal transmitida y calcula las características de fase y magnitud de esa ruta de transmisión específica. Después de que todas las rutas de transmisión correspondientes a todos los elementos de antena se caractericen de la misma manera, el procesador de banda base 10 tiene toda la información necesaria para compensar los valores de las magnitudes y las fases de agrupación a través de la señal 103 tal como para eliminar las variaciones de fabricación.

El caso del receptor mostrado en la figura 7 es similar a la calibración del transmisor con señales invertidas. El procesador de banda base 10 envía una señal 104 a la red de calibración 100, que la redirige a todos los elementos de antena uno cada vez (señales 105). La señal 105 recibida por un solo módulo Tx/Rx (todos los demás están apagados) se propaga a través del sistema de agrupación y regresa al procesador de banda base 10. Una comparación entre las señales transmitidas y recibidas da como resultado una caracterización precisa de fase/magnitud de todas las rutas de recepción. Como en el caso del transmisor, el procesador de banda base 10 tiene toda la información necesaria para compensar los valores de las magnitudes y las fases de agrupación a través de la señal 103, tal como para eliminar las variaciones de fabricación.

Obsérvese que tanto en los casos del transmisor y receptor, estos procesos de calibración de extremo a extremo compensan el total de errores de fase/magnitud de cada ruta de extremo a extremo, que son las sumas de los errores que se producen en la red de distribución y en los módulos de Tx/Rx. Los valores de compensación totales obtenidos de esta manera no pueden separarse en valores de compensación para la red de distribución y en valores de compensación para los módulos de Tx/Rx. Sin embargo, si la red de distribución tiene errores insignificantes, como suele ser el caso con las alimentaciones corporativas de alta calidad, los valores de compensación resultan solo de los errores del módulo de Tx/Rx. Sin embargo, una limitación importante de estas técnicas de calibración de extremo a extremo es que durante la calibración se debe detener toda la operación normal de la agrupación debido a que una parte de cualquier ruta de señal a calibrar está compartida por todas las rutas de señal (por ejemplo, la red de distribución).

El método de calibración agrupación convencional de extremo a extremo descrito en esta sección se basa en el uso de una red de calibración precisa 100, cuidadosamente construida y ajustada manualmente para generar señales iguales 101 en el sistema de la figura 6 y señales iguales 105 en el sistema de la figura 7 para/desde todos los elementos de antena de la agrupación. Esta red de calibración es principalmente adecuada para su uso en el entorno de fábrica como una configuración de prueba separada debido a que incluirla en el sistema de agrupación es bastante poco económico para agrupaciones grandes.

La aplicación de la compensación de agrupación después de la calibración puede realizarse con medios de hardware tales como las líneas de retardo de ajuste o las etapas de ganancia o con medios de software calculando los valores de fase y magnitud necesarios para los módulos de Tx/Rx, que compensan los errores de agrupación además de generar el patrón de radiación deseado.

A continuación, se describe un nuevo método calibración para las agrupaciones activas que produce implementaciones económicas adecuadas para su inclusión en la agrupación. Además, este método permite la calibración automática del extremo de entrada del sistema de agrupación sin interrumpir la operación normal de la agrupación.

Agrupaciones analógicas con alimentación de IF

La figura 8 ilustra una arquitectura de agrupación analógica con alimentación de IF, similar a las estructuras descritas en la patente de Estados Unidos 8.611.959. El diagrama de la figura 8 está reducido de la misma manera que el de la figura 4, representando una agrupación con múltiples canales de transmisión y recepción que operan en modo FDD o TDD. El mezclador 7 de la figura 4 se ha movido al interior de los módulos de Tx/Rx 2347. Naturalmente, ahora en el sistema hay tantas instancias del mezclador 7 como de módulos de Tx/Rx. Este cambio tiene importantes consecuencias beneficiosas para el coste de la agrupación activa. En primer lugar, la red de distribución/agregación 5 transporta ahora señales de IF en lugar de señales de RF. Esto simplifica sustancialmente el diseño de esta red, ya que la red de distribución/agregación se vuelve mucho más pequeña eléctricamente en IF que en RF (el tamaño físico de la red de distribución sigue siendo el mismo, pero las señales de IF que se propagan a través de la red tienen una frecuencia mucho menor que RF). Para valores de IF suficientemente bajos, puede usarse la red de distribución en serie simple de la figura 9 en lugar de la alimentación corporativa debido a que los cambios de fase de señal en un enlace en serie en IF son mucho más pequeños que en RF. En segundo lugar, las etapas de ganancia 4 también operan en IF en lugar de RF, otra simplificación importante de las especificaciones de diseño. En tercer lugar, los cambiadores de fase 3 ahora pueden colocarse en la ruta de LO en lugar de en la ruta de señal como en la figura 4. Esto permite diseños mucho más fáciles de estos componentes debido a que cambiar la fase de una señal sinusoidal es mucho más fácil que cambiar la fase de una señal modulada. De hecho, una de las barreras de costes más difíciles de atravesar en las agrupaciones en fase tradicionales, tales como el sistema de la figura 4, es la disponibilidad de cambiadores de fase programables de alta calidad y bajo coste que operen en un ancho de banda de señal amplio. En contraste, existen varios métodos para implementar cambios de fase programables de muy bajo coste en una sola frecuencia. Estos cambiadores de fase ajustables con señal de LO se denominarán rotadores de fase.

Uno de los defectos de mover la mezcladora 7 del esquema de la figura 4 en los módulos de Tx/Rx 2347 en la figura 8, es la introducción de un nuevo requisito para generar señales de LO en los módulos de Tx/Rx, que son globalmente coherentes (frecuencia idéntica y fases predecibles con un alto grado de precisión). Esto puede lograrse usando una alimentación corporativa para distribuir a través de la agrupación la señal de LO generada por el oscilador 8. Una opción de menor coste para una distribución coherente de LO, de acuerdo con la patente de Estados Unidos 8.611.959, es emplear el método de distribución descrito en la patente de Estados Unidos 8.553.826. La figura 10 muestra un esquema simplificado de este método de distribución. Se construye una red de árbol dual 6a con un troncal largo y múltiples ramas cortas, tal como para generar pares de nodos al final de las ramas cortas que proporcionan pares respectivos de señales con fases que se suman a una constante. Los circuitos de sincronización 6b conectados a estos pares de nodos generan señales de LO globalmente coherentes. Otro método nuevo y más simple para la distribución coherente de LO se describe en U.S.S.N., titulado "Calibrating a Serial Interconnection", presentado al mismo tiempo con el presente documento, y todo el cual se incorpora en el presente documento como referencia.

La agrupación de la figura 8 puede calibrarse de acuerdo con los métodos convencionales de las figuras 6 y 7. Sin embargo, ya que la parte de la agrupación desde el procesador de banda base 10 hasta los puntos A, B, C... H, opera a bajas frecuencias y la red de distribución suele ser pasiva, es posible diseñar esta parte de la agrupación para que tenga unas características de fase y magnitud constantes en condiciones operativas tales como temperatura sin una gran penalización de costes. En este caso, las únicas partes de la agrupación, que son vulnerables a variaciones de fase y magnitud significativas en las condiciones de operación, son los módulos de Tx/Rx. Estos deben calibrarse tan a menudo como lo requieran las desviaciones operativas en fase y magnitud.

Calibración de los módulos de Tx/Rx

Para el fin de esta sección, se asume que todas las rutas de señal de la agrupación de la figura 8 desde el procesador de banda base 10 a los puntos A, B, C... H y viceversa son idénticas en términos de fase y características de magnitud y las únicas partes de la agrupación que necesitan calibración son los módulos de Tx/Rx 2347. Los métodos de calibración de fase propuestos para el módulo de Tx/Rx se muestran en las figuras 11 y 12 para las rutas de transmisión y recepción, respectivamente, y los métodos de calibración de ganancia propuestos para el módulo de Tx/Rx se muestran en las figuras 13 y 14 para las rutas de transmisión y recepción, respectivamente. En todos los casos, el módulo de Tx/Rx bajo calibración está desconectado eléctricamente de la red de distribución/agregación de IF 5. A continuación, se describe cada método por separado.

Para el caso de calibración de fase de transmisión mostrado en la figura 11, un circuito de calibración 200 aplica una señal de IF 201 que tiene la frecuencia de transmisión apropiada para la IF de entrada del módulo de Tx/Rx y detecta la señal de RF 202 procedente del elemento de antena conectado al módulo de Tx/Rx respectivo. La señal de RF 202 es la respuesta del módulo de Tx/Rx a la señal de IF 201. En el caso idealizado donde la etapa de ganancia 4, el mezclador 7 y el FE-RF 2 tienen un tiempo de propagación instantáneo (sin demoras), la fase resultante de la señal 202 se define como una fase de referencia de RF con respecto a la señal de IF 201. En general, la fase real de la señal 202 es mayor que la fase de referencia de RF (202 retrasada con respecto a 201) debido al tiempo de propagación finito a través de los diversos componentes del módulo de Tx/Rx tal como la etapa de ganancia 4, el mezclador 7 y el FE-RF 2. La diferencia entre la fase de la señal 202 y la fase de referencia de RF

varía de un módulo de Tx/Rx a un módulo de Tx/Rx con condiciones de fabricación y operación y varía en el tiempo incluso para el mismo módulo de Tx/Rx con condiciones de operación (por ejemplo, la temperatura). Esta es exactamente la razón por la que es necesaria la calibración de fase. El circuito de calibración 200 mide la diferencia entre la fase de la señal 202 y la fase de referencia de RF con respecto a la señal de IF 201 y genera una señal 203.

Esta señal 203 ajusta la configuración del rotador de fase 3 hasta que dicha diferencia de fase se convierte en un número fijo tal como 90 grados (generalmente mayor que la diferencia de fase original debido a que los sistemas reales son causales). Esto es posible debido a que el cambio de fase de la señal de LO a través del rotador de fase 3 afecta directa y linealmente a la fase de la señal de calibración que se propaga a través del módulo de Tx/Rx. Si todos los módulos de Rx/Tx de la agrupación se calibran de esta manera, durante un tiempo durante el que las condiciones de operación no cambian significativamente, toda la sección de transmisión de la agrupación se calibra en fase.

El caso de calibración de fase de recepción mostrado en la figura 12 es similar al caso de calibración de fase de transmisión con las señales invertidas. El circuito de calibración 200 aplica una señal de RF 204 que tiene la frecuencia de recepción apropiada para la entrada de RF del módulo de Tx/Rx y detecta la señal de IF 205 que proviene del puerto de IF del módulo de Tx/Rx respectivo. La señal de IF 205 es la respuesta del módulo de Tx/Rx a la señal de RF 204. En el caso idealizado donde el FE-RF 2, el mezclador 7 y la etapa de ganancia 4 tienen un tiempo de propagación instantáneo (sin demoras), la fase resultante de la señal 205 se define como una fase de referencia de IF con respecto a la señal de RF 204. En general, la fase real de la señal 205 es mayor que la fase de referencia de IF debido al tiempo de propagación finito a lo largo de los diversos componentes del módulo de Tx/Rx tales como el FE-RF 2, el mezclador 7 y la etapa de ganancia 4. La diferencia entre la fase de la señal 205 y la fase de referencia de IF varía de un módulo de Tx/Rx a un módulo de Tx/Rx con condiciones de fabricación y operación y varía en el tiempo incluso para el mismo módulo de Tx/Rx con condiciones de operación (por ejemplo, la temperatura). El circuito de calibración 200 mide la diferencia entre la fase de la señal 205 y la señal de referencia de IF con respecto a la señal de RF 204 y ajusta la configuración del rotador de fase 3 hasta que dicha diferencia de fase se convierta en un número fijo tal como 90 grados (generalmente mayor que la diferencia de fase original debido a que los sistemas reales son causales). Esto es posible debido a que el cambio de fase de la señal de LO a través del rotador de fase 3 afecta directa y linealmente la fase de la señal de calibración que se propaga a través del módulo de Tx/Rx. Si todos los módulos de Rx/Tx de agrupación se calibran de esta manera, durante un tiempo durante el que las condiciones de operación no cambian significativamente, toda la sección de recepción de la agrupación se calibra en fase.

Para el caso de calibración de ganancia de transmisión mostrado en la figura 13, un circuito de calibración 300 aplica una señal de IF 301 que tiene la frecuencia de transmisión apropiada a la entrada de IF del módulo de Tx/Rx y detecta la señal de RF 302 procedente del elemento de antena conectado al módulo de Tx/Rx respectivo. La señal de RF 302 es la respuesta del módulo de Tx/Rx a la señal de IF 301. En general, la relación entre la amplitud de la señal 302 y la amplitud de la señal 301 (ganancia de transmisión del módulo de Tx/Rx) varía de módulo de Tx/Rx a módulo de Tx/Rx con condiciones de fabricación y operación y varía en el tiempo incluso para el mismo módulo de Tx/Rx con condiciones de operación (por ejemplo, la temperatura). Esta es exactamente la razón por la que es necesaria la calibración de ganancia. El circuito de calibración 300 mide la relación entre las amplitudes de las señales 302 y 301 y emite una señal 303. Esta señal 303 ajusta la configuración de la etapa de ganancia 4 hasta que dicha relación se convierta en un número fijo tal como dos o diez. Si todos los módulos de Rx/Tx de agrupación se calibran de esta manera para la misma ganancia de transmisión del módulo de Tx/Rx, durante un tiempo la duración de las condiciones de operación no cambian significativamente, toda la sección de transmisión de la agrupación se calibra en ganancia.

El caso de calibración de ganancia recibida mostrado en la figura 14 es similar al caso de calibración de ganancia de transmisión con las señales invertidas. El circuito de calibración 300 aplica una señal de RF 304 que tiene la frecuencia de recepción apropiada para la entrada de RF del módulo de Tx/Rx y detecta la señal de IF 305 que proviene del puerto de IF del módulo de Tx/Rx respectivo. La señal de IF 305 es la respuesta del módulo de Tx/Rx a la señal de RF 304. En general, la relación entre la amplitud de la señal 305 y la amplitud de la señal 304 (ganancia de recepción del módulo de Tx/Rx) varía de un módulo de Tx/Rx a un módulo de Tx/Rx con condiciones de fabricación y operación y varía en el tiempo incluso para el mismo módulo de Tx/Rx con condiciones de operación (por ejemplo, la temperatura). El circuito de calibración 300 mide la relación entre las amplitudes de las señales 305 y 304 y ajusta la configuración de la etapa de ganancia 4 hasta que dicha relación se convierta en un número fijo tal como dos o diez. Si todos los módulos de Rx/Tx de agrupación se calibran de esta manera para la misma ganancia de recepción del módulo de Tx/Rx, durante un tiempo la duración de las condiciones de operación no cambian significativamente, toda la sección de recepción de la agrupación se calibra en ganancia.

En la práctica, existen muchas implementaciones posibles para los principios de calibración ilustrados en las figuras 11, 12, 13 y 14. La figura 15 muestra un ejemplo de una implementación de este tipo para la fase del transmisor y la calibración de ganancia del módulo de Tx/Rx. La electrónica del módulo de Tx/Rx 2347 de la figura 8 (etapa de ganancia ajustable 4, mezclador 7, rotador de fase 3 y FE-RF 2) se aumenta con un acoplador 15, un mezclador de RF 16, un mezclador de IF 17, una fase circuito de calibración 18, un circuito de calibración de ganancia 20 y dos detectores de magnitud 19. Además, el sistema de calibración requiere un generador de señal de referencia de IF 14a y un bloque de control de calibración 14b. El controlador de agrupación tal como el procesador de banda base

inicia/detiene la operación del bloque de control 14b. Los circuitos de calibración de fase y ganancia 18 y 20 y el bloque de control 14b contienen máquinas de estado digitales que ejecutan las metodologías de calibración descritas anteriormente y tienen control sobre los bloques requeridos en el módulo de Tx/Tx. La figura 15 muestra el flujo de control con líneas discontinuas terminadas por flechas. Una realización de este esquema está dentro de un circuito integrado con el fin de mantener una alta precisión y bajo coste.

El procedimiento de calibración de transmisor de módulo de Tx/Rx es el siguiente. Después de que el controlador de agrupación (por ejemplo, el procesador de banda base) inicializa la calibración, el bloque de control de calibración 14b activa la señal de referencia de IF del generador de referencia de señal de IF 14a. El generador de señal de referencia de IF 14a de la figura 15 aplica una señal de referencia de IF (señal de calibración) a la etapa de ganancia ajustable 4. Esta señal sale del FE-RF 2 como una señal de calibración de RF, convertida por el mezclador 7. La señal de referencia de calibración pasa a través de las mismas etapas que una señal real cuando la agrupación está en operación normal y, por lo tanto, incurre en los mismos cambios de fase y magnitud. El acoplador 15 detecta esta señal de calibración de RF y la aplica al primer detector de magnitud 19. La señal de referencia de IF del generador 14a también se aplica al segundo detector de magnitud 19. Los dos detectores de magnitud generan tensiones de CC proporcionales a la magnitud de sus respectivas señales de entrada. El circuito de calibración de ganancia 20 ajusta la ganancia de la etapa de ganancia 4 hasta que las tensiones de CC que provienen de los dos detectores de magnitud 19 están en una relación deseada predeterminada. Cuando se alcanza este estado, la ganancia de transmisión del módulo de Tx/Rx se establece en el valor respectivo.

El acoplador 15 se aplica la señal de referencia de RF procedente del FE-RF 2 también al mezclador de RF 16, la convierte descendientemente de nuevo a IF de tal manera que es posible la comparación de fase con la señal de referencia de IF original procedente del generador 14a (las fases solo pueden compararse cuando las señales tienen la misma frecuencia). El mezclador de IF 17 compara las fases de las dos señales de IF por multiplicación y genera una señal de CC igual a $\cos(\phi_1 - \phi_2)$, donde ϕ_1 y ϕ_2 son las fases respectivas. Este valor de CC es cero cuando las fases de las dos señales de IF difieren en $(2n-1)\pi/2$ radianes, donde n es cualquier número entero (lo más importante $n = 1$) y es un máximo o mínimo cuando las fases de las dos señales de IF difieren en $(2n)\pi/2$ radianes. Este esquema de detección de fase tiene una monotonía de 180 grados, que es lo suficientemente grande como para capturar todos los errores de fase prácticos. El circuito de calibración de fase 18 rota la fase del mezclador de activación de señal de LO 7, a través del rotador de fase 3 hasta que la CC generada por el mezclador 17 alcanza un valor establecido específico, preferentemente cero o un máximo/mínimo. Estos valores preferidos (cero o máximo/mínimo) son importantes en la práctica debido a que son valores relativos con respecto a todos los demás valores de CC generados por el mezclador 17 y, por lo tanto, son fáciles de detectar y son insensibles a las variaciones del circuito. Después de que el circuito de calibración de fase alcance el estado deseado, el retraso de señal a través de la ruta de transmisión de módulo de Tx/Rx corresponde a una diferencia de fase predeterminada, tal como 90 grados (valor de CC cero en la salida del mezclador 17) o 180 grados (valor de CC mínimo en la salida del mezclador 17). Es importante observar que la calibración de ganancia precederá a la calibración de fase debido a que cambiar la ganancia del módulo de Tx/Rx también puede cambiar la fase, mientras que los cambios de fase no afectan a la ganancia.

La figura 16 muestra cómo el mismo módulo de Tx/Rx mejorado de la figura 15 puede usarse también para la fase de receptor y calibración de ganancia del módulo de Tx/Rx. En este caso, es necesario un generador de señales de referencia de RF 14c que aplique la señal de referencia a la entrada de RF del módulo de Tx/Rx. La operación de este circuito es idéntica a la operación en la caja del transmisor con algunas señales invertidas, como se muestra en la figura 16. El acoplador 15 se usa para inyectar la señal de referencia de RF en el puerto de RF del módulo de Tx/Rx.

En todos los casos de calibración de módulo de Tx/Rx (fase o magnitud), los valores de calibración para el rotador de fase 3 y la etapa de ganancia 4 pueden procesarse localmente a nivel del módulo de Tx/Rx o globalmente a nivel del control agrupación que reside generalmente en el procesador de banda base 10 (véase la figura 8) o en otro controlador. Si los valores de calibración se procesan localmente, el módulo de Tx/Rx debe contener medios para agregar estos valores de calibración a la fase de programación y los valores de magnitud recibidos del procesador de banda base de agrupación. Si los valores de calibración se procesan globalmente, estos valores de calibración deben informarse al procesador de banda base (por ejemplo, a través de buses digitales), que los incluirá en el cálculo de las fases y magnitudes necesarias para generar patrones de radiación específicos.

Calibración de la red de distribución/agregación

A continuación, se retira el supuesto realizado en la sección anterior de que para la agrupación de la figura 8 todas las rutas de señal del procesador de banda base 10 a los puntos A, B, C... H y viceversa son idénticas en términos de características de fase y magnitud. Ya que el procesador de banda base 10 y la etapa de IF 9 son comunes a todas las rutas de señal, la suposición anterior es equivalente a suponer que la red de distribución 5 es perfecta y no produce errores de fase y magnitud.

En la práctica, las redes 5 en las figuras 4 y 8 logran errores de fase y magnitud insignificantes sobre las condiciones de fabricación y operación solo si se producen con materiales y ensamblajes caros. Esto puede ser aceptable para

algunas aplicaciones de gama alta, pero no lo es para la mayoría de las aplicaciones comerciales. La verdadera motivación para introducir la arquitectura de la figura 8 es reducir el coste de la red 5 operando en IF en lugar de en RF como en la arquitectura clásica de la figura 4.

5 Debido a la operación a una frecuencia mucho más baja de RF, la red 5 puede diseñarse para ser de bajo coste y todavía mantener bajas las variaciones de fase/magnitud en condiciones operativas de temperatura y otras. Este suele ser el caso incluso para una red de distribución/agregación en serie simple como en la figura 9 implementada en algunas de las placas de circuitos impresos (PCB) de menor coste, tales como las placas FR4 (designación estándar de "retardante de llama 4" por la Asociación nacional de fabricantes eléctricos). Sin embargo, las propiedades eléctricas de estas redes de distribución/agregación de bajo coste varían sustancialmente con el proceso de fabricación, lo que las hace inutilizables sin una calibración posterior a la fabricación para igualar las variaciones de fabricación. A continuación, se presentan diversos métodos de calibración para la red de distribución/agregación 5 de la figura 8.

15 El primer método de calibración para la red de distribución/agregación 5 se ilustra en la figura 17. Inicialmente, se considera un solo canal de transmisión y un solo canal de recepción. Más adelante, quedará claro que el caso de múltiples canales es una extensión directa de este caso. Las redes individuales de transmisión y recepción 5 (ambas representadas por el mismo bloque en la figura, de acuerdo con la convención anterior para la representación abreviada) se suponen idénticas o con longitudes eléctricas en relaciones mutuas conocidas. Esta es una suposición razonable si las dos redes se implementan en la misma PCB con diseños similares localizados muy próximos. Por ejemplo, dos enlaces serie como en la figura 9 (uno para transmisión y otro para recepción) implementados como líneas de transmisión colocadas una al lado de otra en una PCB, tienen propiedades eléctricas casi idénticas incluso para materiales de PCB de bajo coste.

25 Al lado de cada nodo A, B... H, donde los módulos de Tx/Rx se conectan a las dos redes 5, se colocan unos circuitos de bucle invertido adicionales 6d. Bajo el control 405 del procesador de banda base 10, estos circuitos pueden devolver cualquier señal proveniente de la red de distribución de transmisión al terminal correspondiente de la red de agregación de recepción. El proceso de calibración es el siguiente. El procesador de banda base 10 transmite una señal de IF 401 a través de la red de distribución de transmisión y solicita sucesivamente un solo circuito de bucle invertido cada vez para devolver esta señal a través de la red de agregación de recepción. Para cada transmisión de ida y vuelta, el procesador de banda base 10 mide la fase de ida y vuelta y las características de magnitud de las rutas de transmisión/recepción combinadas. Después de realizar todas las mediciones de ida y vuelta, el procesador de banda base 10 compara los valores esperados y medidos y asigna partes de los valores medidos a cada red 5 (transmisión o recepción) de acuerdo con diversos criterios. Por ejemplo, si las simulaciones mostraron que una diferencia de fase de ida y vuelta total se divide en un 60 % para la ruta de transmisión y un 40 % para la ruta de recepción, el desplazamiento de fase medido real se asigna en las mismas proporciones. Otro criterio para la asignación de valores puede obtenerse de las mediciones de laboratorio de las proporciones anteriores. Una vez que se conocen las características reales de las redes de transmisión y recepción 5, el procesador de banda base 10 ajusta las configuraciones de los rotadores de fase 3 y de las etapas de ganancia 4 para igualar todas las rutas. El caso de múltiples canales es similar con la posibilidad adicional de medir muchas combinaciones de rutas de avance y retorno.

45 El método de calibración de ida y vuelta de la figura 17 se basa en predecir con exactitud la división correcta de los valores de ida y vuelta medidos entre dos redes independientes (transmisión y recepción). El segundo método de calibración para la red 5 mostrada en la figura 18 mide las redes de transmisión y recepción de manera independiente. Este método aprovecha el hecho de que la arquitectura de la agrupación en la figura 8 proporciona una señal de LO globalmente coherente en cada sitio del módulo de Tx/Rx. Los circuitos 6c generan señales de referencia de IF locales (en los sitios del módulo de Tx/Rx) a partir de las señales de LO globalmente coherentes. Naturalmente, estas señales de referencia de IF locales también son globalmente coherentes. En una etapa de este método, las señales de referencia de IF 500 se transmiten una cada vez a través de la red de agregación 5 al procesador de banda base 10. El procesador de banda base mide la fase y las magnitudes para cada ruta de la red de agregación determinando los valores de compensación para los rotadores de fase 3 y las etapas de ganancia 4 necesarios para corregir las diferencias de los valores ideales. En otra etapa de este método, el procesador de banda base 10 envía las señales de IF 501 a través de la red de distribución 5, que se comparan con las señales de IF de referencia en los sitios del módulo de Tx/Rx mediante comparadores de fase/magnitud en el interior del bloque 6c. A continuación, este bloque informa al procesador de banda base 10 de los valores de fase/magnitud medidos para que el procesador de banda base pueda eliminar los errores, nuevamente a través de ajustes de los rotadores de fase 3 y las etapas de ganancia 4.

60 Para la calibración de magnitud correcta usando las técnicas ilustradas en la figura 18, es importante asegurarse de que las señales de referencia de IF generadas por los bloques 6c tienen magnitudes iguales. Esto es posible a través de diversos métodos tal como distribuir una tensión de referencia de CC global a todos los bloques 6c o usar referencias de tensión estándares.

65 Una implementación típica del circuito 6c de la figura 18 se muestra en la figura 19. El sintetizador de frecuencia 91 genera señales de calibración de IF globalmente coherentes a partir de las señales de LO globalmente coherentes.

La referencia de tensión 93 (por ejemplo, referencias de tensión de salto de banda estándar) genera señales de CC de valores absolutos precisos. El detector de pico 95 proporciona una medida de la magnitud de las señales en su entrada, y el amplificador de ganancia variable (VGA) 92 escala la magnitud de la señal que pasa a través del mismo de acuerdo con la señal de control aplicada por el comparador 94. El rotador de fase 3, el mezclador 7 y el comparador 99 se usan para la alineación de fase de las señales de IF en el módulo de Tx/Rx. El controlador 999 controla todos los bloques en el interior del circuito 6c y se comunica con el procesador de banda base 10 a través del control 404.

En una aplicación del método descrito en la figura 18, el controlador 999 establece los conmutadores 96 y 98 a encendidos, el conmutador 97 a apagado y deshabilita el rotador de fase 3, el mezclador 7 y el comparador 99. La señal de salida del sintetizador de frecuencia 91 pasa a través del VGA 92 y se envía al procesador de banda base 10 como una señal de calibración 500. Esta señal es globalmente coherente (misma fase en todos los módulos de Tx/Rx) debido a que se sintetiza a partir de las señales de LO globalmente coherentes y también tiene una magnitud conocida. Esto está garantizado debido a que el comparador 94 ajusta la ganancia del VGA 92 hasta que la magnitud de la señal 500 esté relacionada con una tensión establecida de la referencia de tensión 93 en una relación predeterminada (por ejemplo, igual). Como se ha descrito anteriormente, el procesador de banda base 10 usa las señales 500 procedentes de todos los módulos de Tx/Rx para compensar los cambios de magnitud y fase que se producen en las redes de distribución.

En otra aplicación del método descrito en la figura 18, el controlador 999 establece los conmutadores 96 y 98 a apagados, el conmutador 97 a encendido, y habilita el rotador de fase 3, el mezclador 7 y el comparador 99. En este caso el procesador de banda base 10 envía las señales de calibración 501 a través de la red de distribución. La fase de la señal 501 después de llegar al módulo de Tx/Rx se compara con la señal globalmente coherente generada por el sintetizador de frecuencia 91 usando el rotador de fase 3, el mezclador 7 y el comparador 99. Al igual que en el caso de las metodologías de calibración del módulo de Tx/Rx descritas anteriormente, el controlador 999 cambia la fase del rotador de fase 3 hasta que el comparador 99 emite un valor de CC predeterminado (preferiblemente un valor máximo o un valor cero) correspondiente a una diferencia de fase conocida entre las entradas del mezclador 7. De esta manera, el controlador 999 determina la fase de la señal 501 en relación con las señales globalmente coherentes generadas por el sintetizador de frecuencia 91. La señal 501 también pasa a través del VGA 92 con el fin de determinar su magnitud. El comparador 94 ajusta la ganancia del VGA 92 hasta que la magnitud de la señal en la salida del VGA 92 se relaciona con una tensión establecida de la referencia de tensión 93 en una relación predeterminada. Después de que se establezca este bucle de control, la configuración de ganancia VGA puede usarse para compensar los cambios de magnitud en la señal 501 desde el procesador de banda base 10 al módulo de Tx/Rx. Por ejemplo, estas configuraciones pueden usarse para ajustar las ganancias de las etapas de ganancia ajustables 4 en la figura 18.

Agrupaciones con calibración de dos etapas

La posibilidad de calibrar los módulos de Tx/Rx y la red de distribución de la agrupación de la figura 8 indica por separado una arquitectura de agrupación en general adecuada para un método de calibración de dos etapas, cuyas ventajas sobre la calibración de una etapa de extremo a extremo tradicional se describirán más adelante. Esta arquitectura se muestra en la figura 20 incluyendo unos subsistemas de agrupación convencionales y unos subsistemas adicionales. Como anteriormente (figuras 4 y 8), se usa la convención de que múltiples canales de transmisión y recepción están representados en forma reducida por bloques únicos.

Los subsistemas de agrupación convencionales de la figura 20 son el procesador de banda base 10, el convertidor de señal 701, la red de distribución/agregación de señal 702 y la red de distribución de control 703. El convertidor de señal 701 es el bloque donde se realizan las conversiones de digital a analógico y de analógico a digital, así como conversión de frecuencia ascendente/descendente en algunos casos. En general, las señales intercambiadas entre el convertidor de señal 701 y la red de distribución 702 son señales analógicas, o bien en la banda base o en IF o en RF. La red de distribución de control 703 transporta señales de control (generalmente digitales) entre el procesador de banda base y los módulos de Tx/Rx 670. Estos módulos son una combinación de circuitos convencionales como en la figura 3 y de circuitos de calibración apropiados que soportan los métodos de calibración mostrados en las figuras 11, 12, 13, 14, 17 y 18.

Los subsistemas de la figura 20, que son adicionales a los subsistemas de agrupación convencionales, son el generador de referencia 704, el generador de calibración 706, la red de distribución de referencia 705, y la red de distribución de calibración 707. El generador de referencia 704 genera una señal de referencia global, que se distribuye a todos los módulos de Tx/Rx a través de la red de distribución de referencia 705 de tal manera que las réplicas coherentes de esta señal estén disponibles en todos los sitios del módulo de Tx/Rx. Con este fin, la red de distribución de referencia 705 podría ser una alimentación corporativa (figura 5) o la red mostrada en la figura 10 (patente de Estados Unidos 8.611.959) u otra red de distribución coherente. Los módulos de Tx/Rx pueden usar las señales de referencia coherentes distribuidas por la red 705 (por ejemplo, la agrupación activa de la figura 8) o no pueden usarlas (por ejemplo, la agrupación activa de la figura 4). El generador de calibración 706 genera una o varias señales de calibración, que se transmiten a los módulos de Tx/Rx a través de la red de distribución 707. A diferencia de la señal de referencia distribuida a través de la red 705, las señales de calibración que llegan a los

módulos de Tx/Rx no necesitan ser recíprocamente coherentes.

La calibración de dos etapas del sistema de agrupación de la figura 20 opera de la siguiente manera. En primer lugar, el procesador de banda base 10 desconecta todos los módulos de Tx/Rx de la red de distribución/agregación 702 y aplica los métodos de calibración para esta red como se describe en las figuras 17 y 18. Esto representa la primera etapa del proceso de calibración de agrupación de dos etapas. En este procedimiento, el procesador de banda base puede usar las señales de referencia coherentes distribuidas a los módulos de Tx/Rx (véase la figura 18). A continuación, el procesador de banda base inicia el proceso de calibración del módulo de Tx/Rx, como se ha descrito anteriormente, un módulo cada vez o varios (o todos) módulos simultáneamente. Ya que la calibración del módulo de Tx/Rx es un proceso independiente, muchos módulos de Tx/Rx pueden calibrarse al mismo tiempo. Esta es la segunda etapa del proceso de calibración de dos etapas de agrupación. En este procedimiento, los módulos de Tx/Rx usan las señales de calibración distribuidas a través de la red 707, como se ha descrito anteriormente (véanse las figuras 11, 12, 13 y 14).

Cada etapa del proceso de calibración de dos etapas descrito en esta sección aborda una parte diferente de la agrupación, reaccionando a las condiciones ambientales de manera diferente que la otra parte. Los módulos de Tx/Rx, que se calibran durante la segunda etapa, en general son bastante sensibles a las condiciones ambientales debido a que contienen circuitos activos. Sin embargo, las diferencias entre las rutas de señal desde el procesador de banda base hasta los módulos de Tx/Rx, que se calibran durante la primera etapa del proceso de calibración de dos etapas, a menudo son invariables a lo largo de las condiciones ambientales, especialmente si la red de distribución 702 de la figura 20 es pasiva. Por lo tanto, no es necesario realizar la primera etapa del proceso de calibración, sino en el momento del inicio del sistema, para compensar las variaciones de fabricación y debe repetirse solo raramente para compensar las lentas derivaciones debido al envejecimiento, etc. Este hecho es una gran ventaja del método de calibración de dos etapas en comparación con el método de calibración tradicional de extremo a extremo (etapa única) debido a que siempre que el sistema esté funcionando sin errores hasta los módulos de Tx/Rx, será posible calibrar el resto de la agrupación sin interrumpir la operación normal. Esto se desvela en la siguiente sección.

Calibración de agrupación activa de dos etapas sin interrumpir la operación de agrupación

Una ventaja importante de una agrupación activa a lo largo de un sistema activo de elemento único es que si uno o un número limitado de los elementos de la agrupación dejan de funcionar, el impacto en el rendimiento general de la agrupación es mínimo o incluso imperceptible. Por ejemplo, si un elemento en una agrupación en fase con 100 elementos se apaga, solo se pierde el 1 % de la potencia transmitida total (suponiendo una potencia igual en todos los elementos) y los patrones de radiación permanecen prácticamente sin cambios. Uno puede beneficiarse de este hecho usando el proceso de calibración de dos etapas descrito en el presente documento para calibrar una agrupación activa sin interrumpir su operación normal. Sigue un posible procedimiento.

En el inicio (tiempo de inicio), la agrupación activa se calibra completamente a través de la primera etapa y la segunda etapa, incluyendo la calibración de todos los módulos de Tx/Rx. Esto garantiza que los errores debidos a variaciones de fabricación y otros factores se eliminen para las condiciones de operación existentes en ese momento. A continuación, la agrupación activa se coloca en operación normal. En ciertos momentos prescritos o sugeridos por los cambios ambientales monitorizados, etc., los módulos de Tx/Rx se recalibran (calibración de etapa dos repetida) uno cada vez mientras el resto de la agrupación permanece funcionando. En algunas situaciones, se puede calibrar más de un módulo de Tx/Rx cada vez. Además, en ciertos casos (por ejemplo, entornos muy variables o componentes muy sensibles), puede ser necesaria una calibración continua del módulo de Tx/Rx en un modo de turnos rotativos. De esta manera, la agrupación mantendrá condiciones prácticamente libres de errores durante largos períodos.

Como se ha descrito hasta ahora, el método de calibración de dos etapas mantiene la operación de agrupación normal durante la calibración de la segunda etapa pero interrumpe la operación normal durante la calibración de la primera etapa. Esta limitación puede eliminarse agregando a la arquitectura de la figura 20 una red de distribución adicional 702 y la capacidad de intercambiar la red de distribución existente con la red adicional sin detener la operación normal de la agrupación. La red de distribución adicional se calibra fuera de línea antes del intercambio para que el sistema permanezca libre de errores después del intercambio. Naturalmente, la red de distribución que se saca del sistema también se calibrará fuera de línea y se usará nuevamente en el sistema cuando la red de distribución adicional se desvíe de la calibración. Este proceso puede continuar indefinidamente.

Calibración de dos etapas de agrupaciones digitales

El método de calibración de dos etapas puede usarse también en agrupaciones digitales. La figura 21 muestra esta posibilidad. En este caso, la red de distribución/agregación 802 es digital, por lo tanto, no es necesario usar el bloque de convertidor de señal 701 de la figura 20. Además, los módulos de Tx/Rx 670 de la figura 20 se reemplazan con radios completas 800, que incluyen la funcionalidad del módulo de Tx/Rx y la funcionalidad del convertidor de datos (convertidores de analógico a digital y de digital a analógico). La señal de referencia generada por el generador de señal de referencia 704 se distribuye a las radios 800 por la red de distribución de referencia

705. La señal de referencia se usa por las radios 800 para operaciones de muestreo de señal (para los convertidores de analógico a digital y de digital a analógico) y posiblemente para operaciones de conversión ascendentes/descendentes.

5 La calibración de dos etapas para la agrupación digital de la figura 21 opera de la misma manera que para la agrupación analógica de la figura 20. La única diferencia no esencial es que la calibración de la primera etapa de la red de distribución/agregación 802 se realiza con señales digitales y no analógicas. Naturalmente, no hay necesidad de calibrar la amplitud de la red de distribución/agregación 802 (las señales digitales conservan la información de amplitud perfecta si no hay errores de transmisión). Sin embargo, los errores de retraso, que dan lugar a errores de fase, deben compensarse.

Algoritmo de Calibración

15 En la realización descrita, el procesador de banda base ejecuta un programa que realiza la operación de calibración de dos etapas descrita anteriormente. Como alternativa, puede usarse otro procesador o múltiples procesadores que se encuentren cerca de los circuitos de Tx/Rx, o que se localicen en otro lugar. A continuación, se hace referencia a la entidad programada que controla y realiza la calibración de la agrupación en fase como el sistema de procesador.

20 Un diagrama de flujo de la operación del sistema de procesador se muestra en las figuras 22-24 entre las cuales la figura 22 ilustra el bucle de programa principal, la figura 23 ilustra una subrutina que realiza la primera etapa de la operación de calibración, y la figura 24 ilustra una subrutina que realiza la segunda fase de la operación de calibración. Inicialmente, el sistema de procesador, usando la circuitería descrita anteriormente en el sistema de antenas de agrupación en fase, llama a la subrutina que realiza la primera etapa de la operación de calibración durante la que el sistema de procesador calibra la red de distribución/agregación de IF (2000) independientemente de los circuitos de Tx/Rx. Durante esta subrutina, se desconecta la red de distribución/agregación de los circuitos de Tx/Rx. Como consecuencia, no pueden recibirse ni enviarse señales de RF a través de la agrupación de antenas durante esta etapa de la operación.

30 Haciendo referencia a la figura 23, durante la subrutina que realiza la primera etapa de la operación de calibración (2010), el sistema de procesador selecciona una o unas trayectorias de señal a través de la red de distribución/agregación (2012) y calibra la o las rutas de señal seleccionadas (2014), usando uno de los enfoques descritos anteriormente ilustrado por las figuras 17 y 18. La calibración de la o las rutas de señal seleccionadas implica determinar las correcciones de fase y de magnitud que se aplicarán a la o las rutas de señal seleccionadas. Estos valores determinados se almacenan a continuación en la memoria local del sistema de procesador o en otro lugar.

35 Después de que se calibre la ruta seleccionada, el sistema de procesador comprueba si hay algunas rutas de señal restantes dentro de la red de distribución/agregación que aún no se hayan calibrado (2016). Si hay rutas que aún no se han calibrado, el sistema de procesador realiza un ciclo a través de esas rutas de señal no calibradas, calibrando una por una (véanse los bloques 2016, 2018 y 2014) hasta que haya calibrado completamente la red de distribución/agregación. En ese punto, el sistema de procesador sale de esta subrutina (2020) y vuelve al bucle de programa principal mostrado en la figura 22.

45 Después de regresar al bucle de programa principal, el sistema de procesador llama a la segunda etapa de la subrutina de calibración durante el que se calibran los circuitos de Tx/Rx independientes de la red de distribución/agregación (2002). Durante esta etapa de la operación de calibración, cuyos detalles se muestran en la figura 24, el sistema de procesador selecciona un circuito de Tx/Rx (2032) y calibra ese circuito usando, por ejemplo, los enfoques ilustrados por las figuras 11-14 (2034). La calibración del circuito de Tx/Rx seleccionado implica determinar las correcciones de fase y de magnitud que se aplicarán al circuito de Tx/Rx seleccionado. Estos valores determinados se almacenan en la memoria local del sistema de procesador o en otro lugar.

50 Después de que el circuito de Tx/Rx seleccionado esté calibrado, el sistema de procesador comprueba si existen algunos circuitos de Tx/Rx restantes dentro de la agrupación que aún no se hayan calibrado (2036). Si hay circuitos de Tx/Rx que aún no se han calibrado, el sistema de procesador realiza un ciclo a través de esos circuitos de Tx/Rx no calibrados, calibrándolos uno por uno (véanse los bloques 2036, 2038 y 2034) hasta que hayan calibrado completamente todos los circuitos de Tx/Rx en la agrupación. En este punto, el sistema de procesador sale (2040) de la subrutina de calibración de la segunda etapa y vuelve al bucle de programa principal mostrado en la figura 22.

60 A continuación, el sistema de procesador entra en un bucle en el que primero comprueba la aparición de cualquier condición que requiera que el sistema de procesador realice de nuevo, o bien la primera etapa de la operación de calibración (2004) o la segunda etapa de la operación de calibración (2006). La condición podría ser un comando de un operador, que es más probable que sea el enfoque que se usaría para invocar la primera etapa de la operación de calibración, o podría ser la expiración de un temporizador, o podría ser un cambio detectado en una condición ambiental tal como, entre otras, la temperatura de la agrupación, la humedad del entorno en el que se opera, etc., o podría ser una degradación detectada en el rendimiento de la agrupación, o cualquier combinación de tales consideraciones o factores.

5 Como ha observado anteriormente, ya que la red de distribución/agregación es una parte mucho más estable del sistema de agrupación en fase para las frecuencias en las que opera, los momentos en los que necesitará calibrarse serán infrecuentes. Por el contrario, los circuitos de Tx/Rx necesitarán recalibrarse con frecuencia, especialmente si la agrupación opera en un entorno en el que las condiciones (por ejemplo, temperatura, humedad, etc.) cambian con frecuencia. Por lo tanto, en la práctica, el sistema de procesador repetirá la segunda etapa de la operación de calibración muchas veces antes de volver a ejecutar la primera etapa de la operación de calibración.

10 Aunque se ha descrito la calibración de los circuitos de Tx/Rx como que se realiza una cada vez y de manera secuencial, esto no es necesariamente el caso. Pueden calibrarse múltiples circuitos de Tx/Rx simultáneamente. Recuerdese que cuando se calibra un circuito de Tx/Rx, se elimina de la agrupación activa y no puede usarse para transmitir o recibir señales de comunicación. En una agrupación en fase con muchos elementos de antena, es probable que la eliminación de un solo circuito de Tx/Rx durante la calibración no tenga un impacto muy adverso en el rendimiento de la agrupación. Si la agrupación es lo suficientemente grande, la degradación del rendimiento resultante de la eliminación de múltiples circuitos de Tx/Rx podría resultar aceptable. En consecuencia, en ese caso
15 tendría sentido calibrar múltiples circuitos de Tx/Rx simultáneamente para acortar el tiempo que lleva realizar completamente la segunda etapa del proceso de calibración.

20 Otras realizaciones están dentro de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un método para calibrar una agrupación en fase que incluye una agrupación de elementos de antena (1), una pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347), cada uno de los cuales está acoplado eléctricamente a un elemento de antena correspondiente diferente dentro de la agrupación de elementos de antena, y una red de alimentación de señal (6, 6a, 6b) que acopla eléctricamente una primera línea de señal a una pluralidad de segundas líneas de señal, estando cada segunda línea de señal de la pluralidad de segundas líneas de señal acoplada eléctricamente a un circuito de comunicación de RF correspondiente diferente entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF, comprendiendo dicho método:
- realizar una primera fase de una operación de calibración (2000), implicando dicha primera fase de la operación de calibración calibrar la red de alimentación de señal independientemente de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF; y
- realizar una segunda fase de la operación de calibración (2002), implicando dicha segunda fase de la operación de calibración calibrar, independientemente de la red de alimentación de señal, cada uno de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF hasta que todos los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF estén calibrados.
2. El método de la reivindicación 1, en el que la segunda fase de la operación de calibración (2002) se realiza después de que se complete la primera fase de la calibración (2000).
3. El método de la reivindicación 1, que comprende además realizar repetidamente la segunda fase de la operación de calibración (2002) sin repetir la primera fase de la operación de calibración.
4. El método de la reivindicación 1, que comprende además realizar la segunda fase de la operación de calibración (2002) a intervalos de tiempo predeterminados.
5. El método de la reivindicación 1, que comprende además realizar la segunda fase de la operación de calibración (2002) cada vez que se detecta un cambio predeterminado en el entorno de la agrupación en fase.
6. El método de la reivindicación 1, en el que calibrar la red de alimentación de señal implica determinar una corrección de fase para cada una de la pluralidad de segundas líneas de señal.
7. El método de la reivindicación 6, que comprende además aplicar las correcciones de fase para la pluralidad de segundas líneas a la agrupación en fase.
8. El método de la reivindicación 1, en el que calibrar cada uno de los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF implica determinar una corrección de fase para cada uno de los circuitos de comunicación de RF.
9. El método de la reivindicación 8, que comprende además aplicar las correcciones de fase para la pluralidad de circuitos de comunicación de RF a la agrupación en fase.
10. El método de la reivindicación 1, en el que calibrar la red de alimentación de señal implica determinar una corrección de fase y una corrección de magnitud para cada una de la pluralidad de segundas líneas de señal.
11. El método de la reivindicación 10, que comprende además aplicar las correcciones de fase y de magnitud para la pluralidad de segundas líneas a la agrupación en fase.
12. El método de la reivindicación 1, en el que calibrar cada uno de los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF implica determinar una corrección de fase y una corrección de magnitud para cada uno de los circuitos de comunicación de RF.
13. El método de la reivindicación 12, que comprende además aplicar las correcciones de fase y de magnitud para la pluralidad de circuitos de comunicación de RF a la agrupación en fase.
14. El método de la reivindicación 1, en el que la red de alimentación de señal es una red de distribución de señal y en el que cada circuito de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF es un circuito de transmisión de RF para accionar el elemento de antena al que ese circuito de comunicación de RF está acoplado eléctricamente.
15. El método de la reivindicación 1, en el que la red de alimentación de señal es una red de agregación de señal y en el que cada circuito de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF es un módulo de recepción de RF para procesar una señal recibida por el elemento de antena al que ese circuito de comunicación de RF está acoplado eléctricamente.

16. El método de la reivindicación 1, en el que cada circuito de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF incluye un mezclador (7t) para la conversión ascendente de una señal de IF recibida desde la red de distribución a RF.
- 5 17. El método de la reivindicación 1, en el que cada circuito de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF incluye un mezclador (7r) para la conversión descendente a IF de una señal de RF recibida desde el elemento de antena acoplado a ese circuito de comunicación de RF.
- 10 18. El método de la reivindicación 1, en el que durante la segunda fase de la operación de calibración, se calibra cada vez solo un subconjunto de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF, en donde cada subconjunto es al menos uno pero no todos los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347).
- 15 19. El método de la reivindicación 1, en el que durante la segunda fase de la operación de calibración, se calibra cada vez solo uno de los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347).
- 20 20. El método de la reivindicación 1, en el que durante la segunda fase de la operación de calibración se desconecta eléctricamente cualquier circuito de comunicación de RF, que se esté calibrando, de la red de señalización mientras está calibrándose ese circuito de comunicación de RF.
21. Un sistema de agrupación de antenas en fase que comprende:
- 25 una red de alimentación de señal (6, 6a, 6b) que acopla eléctricamente una primera línea de señal a una pluralidad de segundas líneas de señal;
una agrupación de elementos de antena (1);
una pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347), teniendo cada circuito de comunicación de RF de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF un primer puerto y un segundo puerto, estando dicho primer puerto conectado eléctricamente a una segunda línea de señal correspondiente diferente entre la pluralidad de
30 segundas líneas de señal de la red de alimentación de señal y estando dicho segundo puerto conectado eléctricamente a un elemento de antena correspondiente diferente dentro de la agrupación de elementos de antena (1);
una pluralidad de circuitos de calibración (200, 300) igual en número a la pluralidad de circuitos de comunicación de RF, estando cada uno conectado eléctricamente a y para calibrar, independientemente de la red de
35 alimentación de señal, un circuito de comunicación de RF correspondiente diferente entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347); y un sistema de procesador (10) programado para ejecutar una primera fase de una operación de calibración, implicando dicha primera fase de la operación de calibración calibrar la red de alimentación de señal independientemente de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF; y realizar una segunda fase de la operación de calibración, implicando dicha segunda fase de la operación de calibración
40 calibrar, independientemente de la red de alimentación de señal, cada uno de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF hasta que todos los circuitos de comunicación de RF entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF estén calibrados.
- 45 22. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 21, que comprende además una pluralidad de conmutadores, estando cada uno de los cuales asociado a un circuito de comunicación de RF diferente entre la pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347) y estando cada uno de los cuales para conectar y desconectar eléctricamente su circuito de comunicación de RF asociado de la segunda línea de señal correspondiente a la que ese circuito de comunicación de RF está conectado eléctricamente.
- 50 23. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 21, en el que el sistema de procesador (10) está programado para ejecutar la operación de calibración de tal manera que el sistema de procesador usa cada circuito de calibración para realizar mediciones en su circuito de comunicación de RF conectado y generar datos de corrección de calibración a partir de las mediciones.
- 55 24. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 23, en el que el sistema de procesador (10) está programado para secuenciar a través de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF seleccionando cada vez un subconjunto de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF y, para cada subconjunto seleccionado de circuitos de comunicación de RF, usar los circuitos de calibración para el subconjunto seleccionado de circuitos de comunicación de RF para calibrar los circuitos de comunicación de RF seleccionados, hasta que esté calibrada la
60 totalidad de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF, y en donde cada uno de los subconjuntos seleccionados incluye al menos uno pero no todos de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF.
- 65 25. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 23, en el que el sistema de procesador está programado para secuenciar a través de todos de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347) seleccionando cada vez uno de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF (200, 300) y, para ese circuito de comunicación de RF seleccionado, usar el circuito de calibración para ese circuito de comunicación de RF

seleccionado para calibrar ese circuito de comunicación de RF seleccionado, hasta que estén calibrados todos de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347).

5 26. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 23, que comprende además una pluralidad de conmutadores controlados por el sistema de procesador (10) para conectar y desconectar eléctricamente cada uno de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF de su segunda línea de señal correspondiente de la red de alimentación de señal.

10 27. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 26, en el que el sistema de procesador (10) está programado para hacer que los conmutadores desconecten eléctricamente cada circuito de comunicación de RF de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF de su segunda línea de señal correspondiente de la red de alimentación de señal cuando ese circuito de comunicación de RF está siendo calibrado.

15 28. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 23, en el que cada circuito de calibración entre la pluralidad de circuitos de calibración (200, 300) comprende:

una línea de salida de señal de referencia para introducir una señal de referencia en el circuito de comunicación de RF conectado a ese circuito de calibración;

20 una línea de monitorización para recibir del circuito de comunicación de RF conectado a ese circuito de calibración una señal de salida resultante de la señal de referencia introducida en ese circuito de comunicación de RF; y

25 un circuito de calibración de fase para generar una corrección de fase para ese circuito de comunicación de RF, en donde la corrección de fase para ese circuito de calibración se obtiene a partir de las señales de referencia y de salida para ese circuito de calibración.

29. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 28, en el que cada circuito de calibración entre la pluralidad de circuitos de calibración comprende además:

30 un circuito de calibración de magnitud para generar una corrección de magnitud para ese circuito de comunicación de RF, en donde la corrección de magnitud para ese circuito de calibración se obtiene a partir de las señales de referencia y de salida para ese circuito de calibración.

30. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 23, en el que cada circuito de calibración entre la pluralidad de circuitos de calibración (200, 300) comprende:

35 una línea de salida de señal de referencia para introducir una señal de referencia en el circuito de comunicación de RF conectado a ese circuito de calibración;

40 una línea de monitorización para recibir del circuito de comunicación de RF conectado a ese circuito de calibración una señal de salida resultante de la señal de referencia introducida en ese circuito de comunicación de RF; y

un circuito de calibración de magnitud para generar una corrección de magnitud para ese circuito de comunicación de RF, en donde la corrección de magnitud para ese circuito de calibración se obtiene a partir de las señales de referencia y de salida para ese circuito de calibración.

45 31. El sistema de agrupación de antenas en fase de la reivindicación 23, en el que cada circuito de comunicación de RF de la pluralidad de circuitos de comunicación de RF (2347) comprende:

un mezclador de RF (16);

una circuitería de extremo frontal de RF conectada eléctricamente al elemento de antena;

50 una circuitería de ajuste de fase para ajustar la fase de una señal que pasa a través de ese circuito de comunicación de RF;

una línea de señal de comunicación para transportar una señal de comunicación entre una red de señalización exterior y ese circuito de comunicación de RF; y

una línea de señal de LO para recibir una señal de oscilador local (LO) para el mezclador de RF (16).

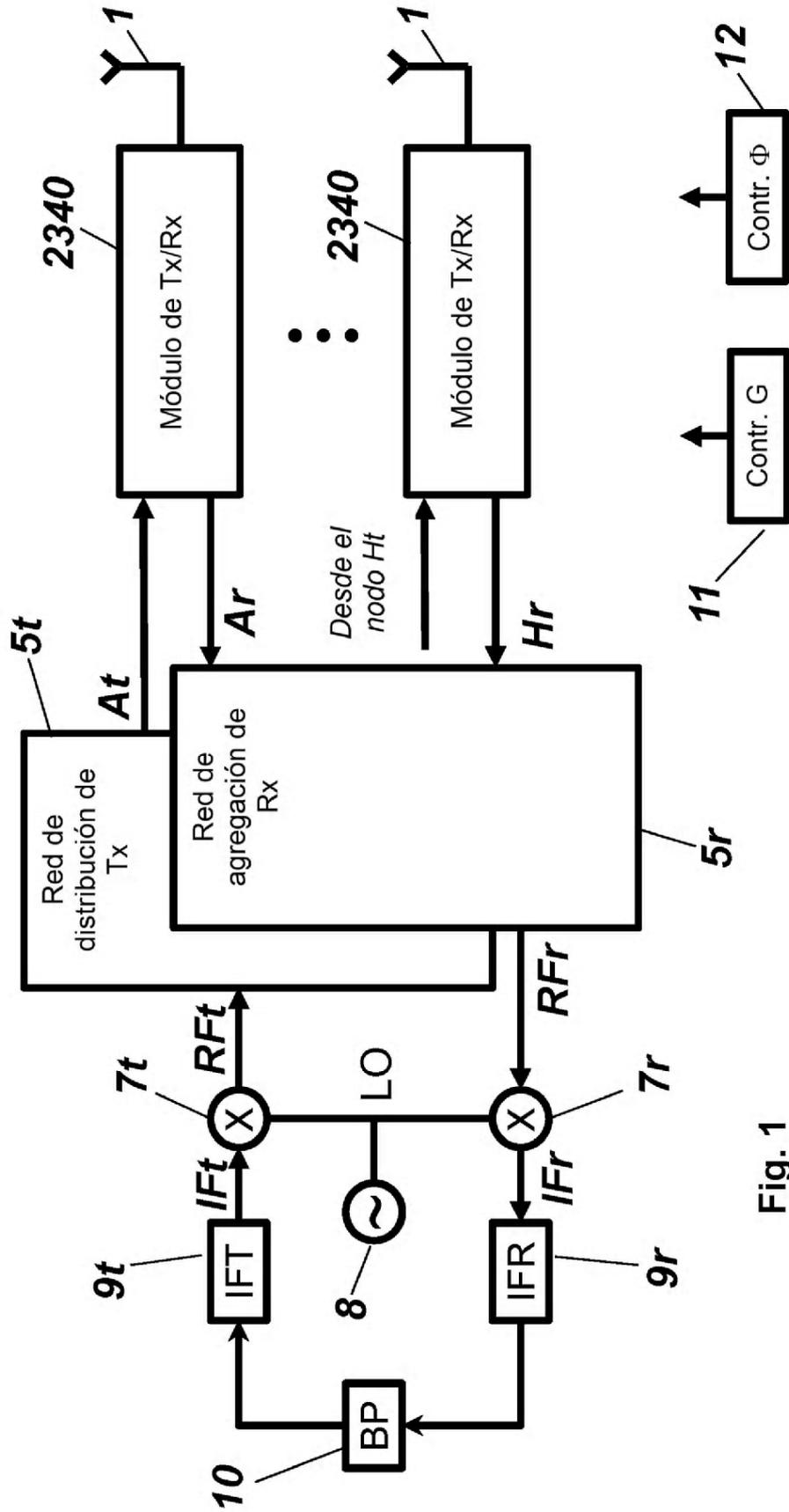


Fig. 1

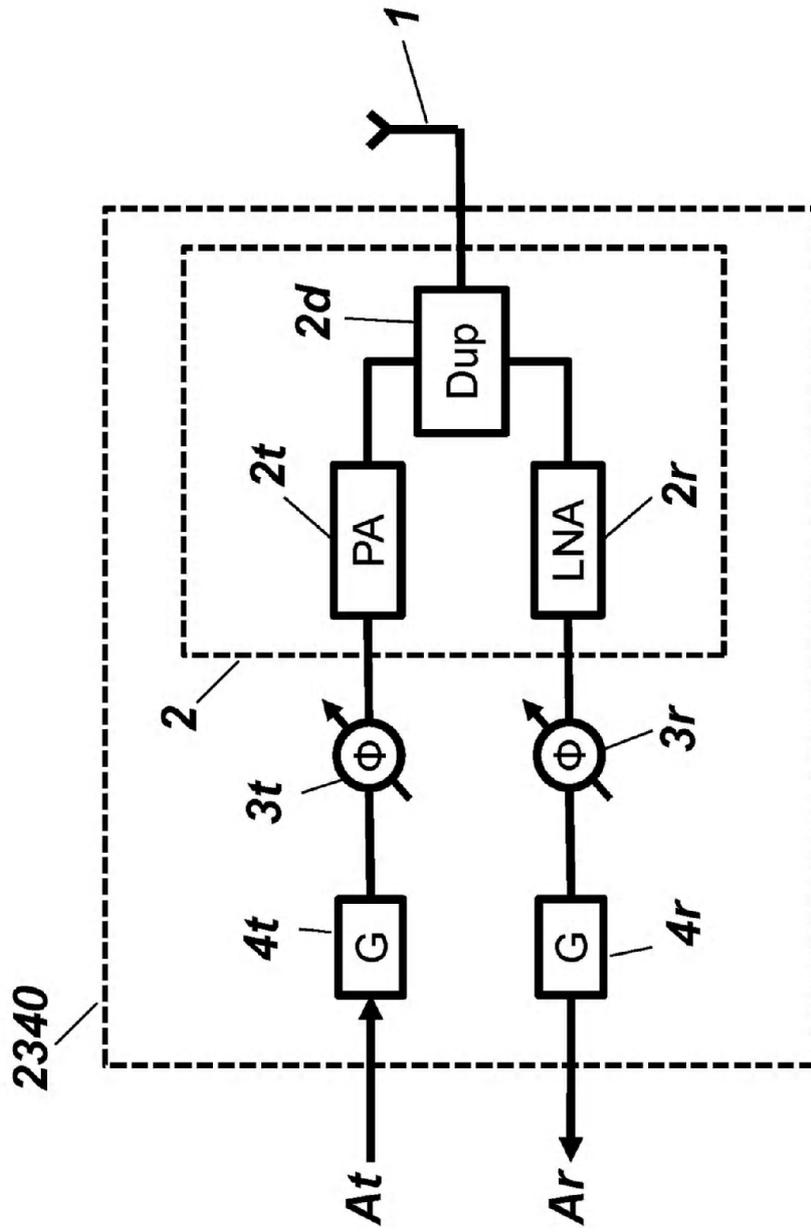


Fig. 2

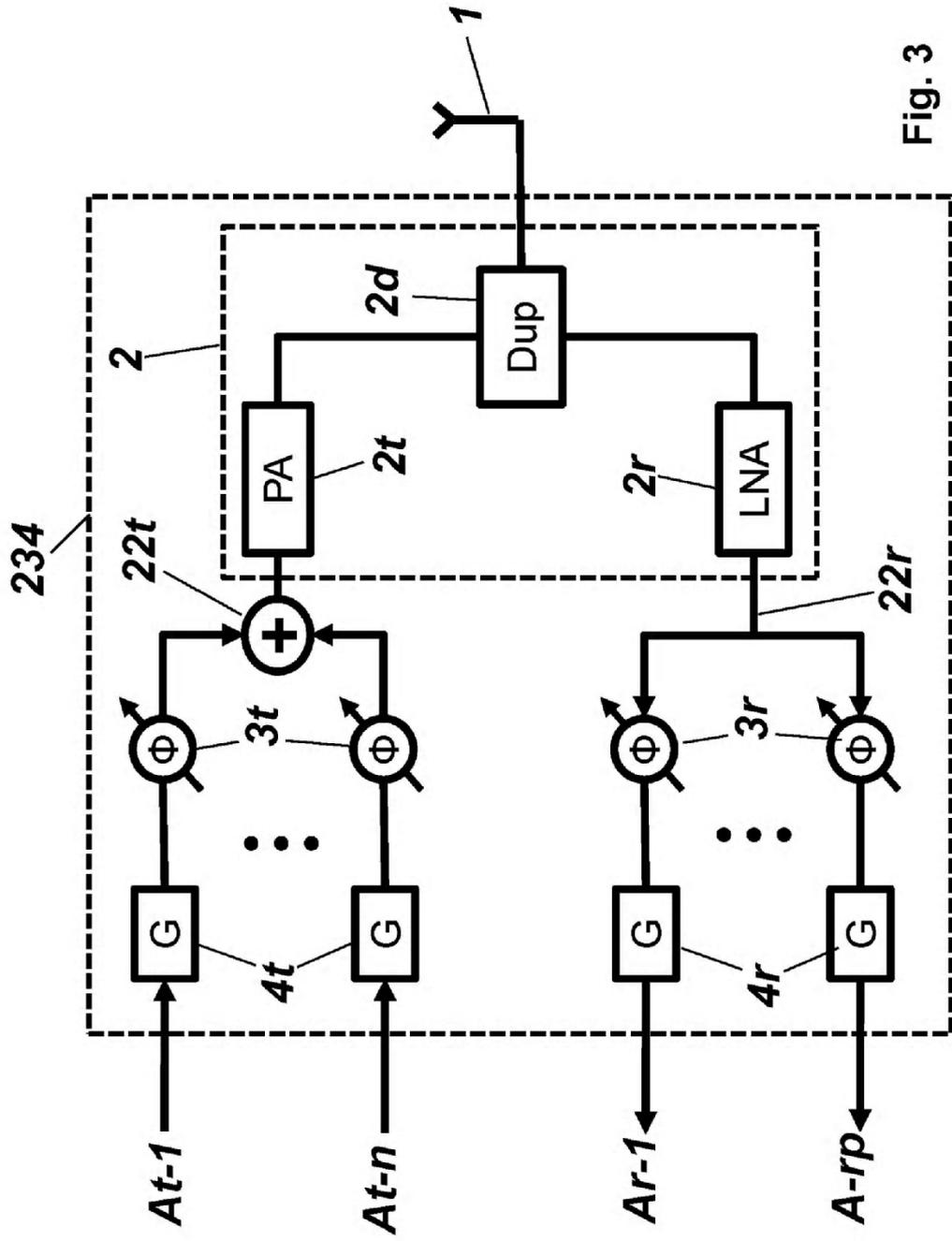


Fig. 3

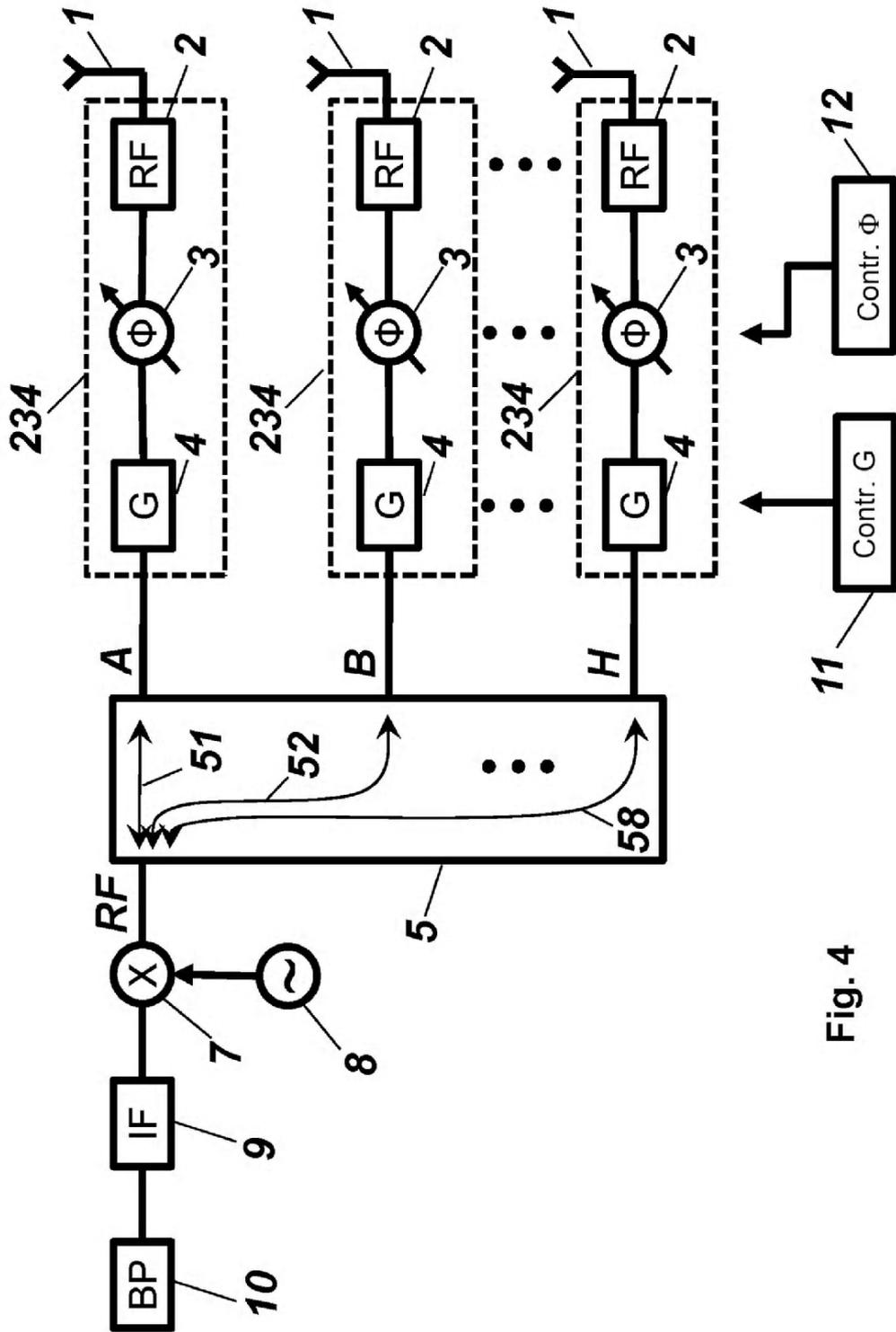


Fig. 4

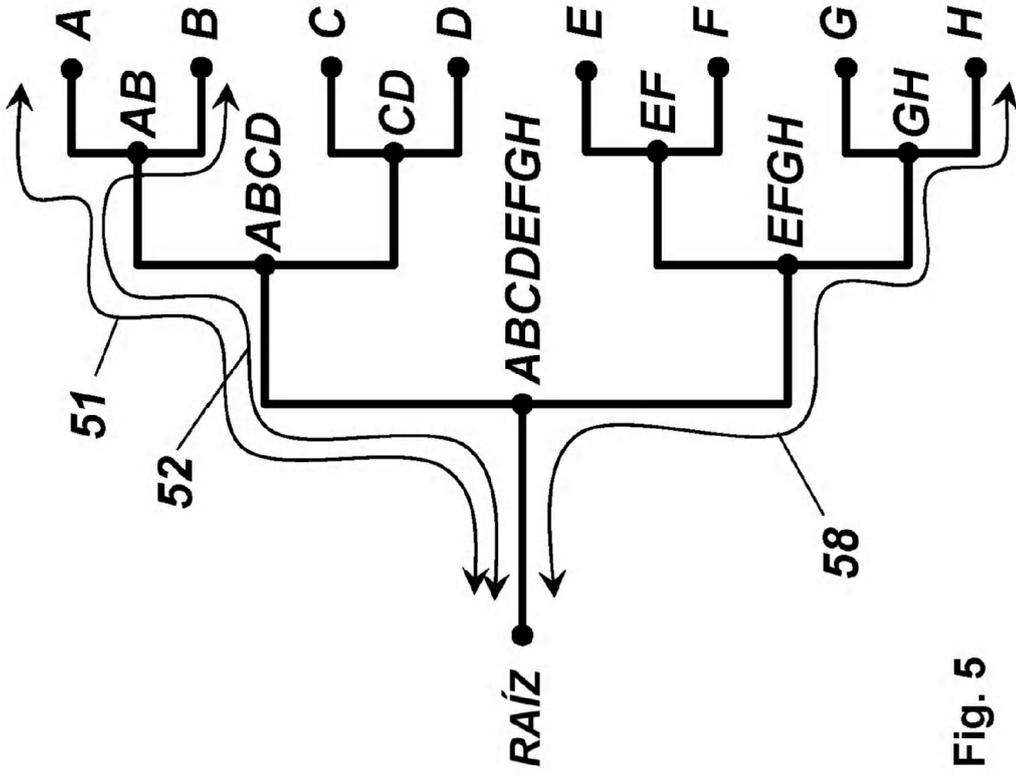
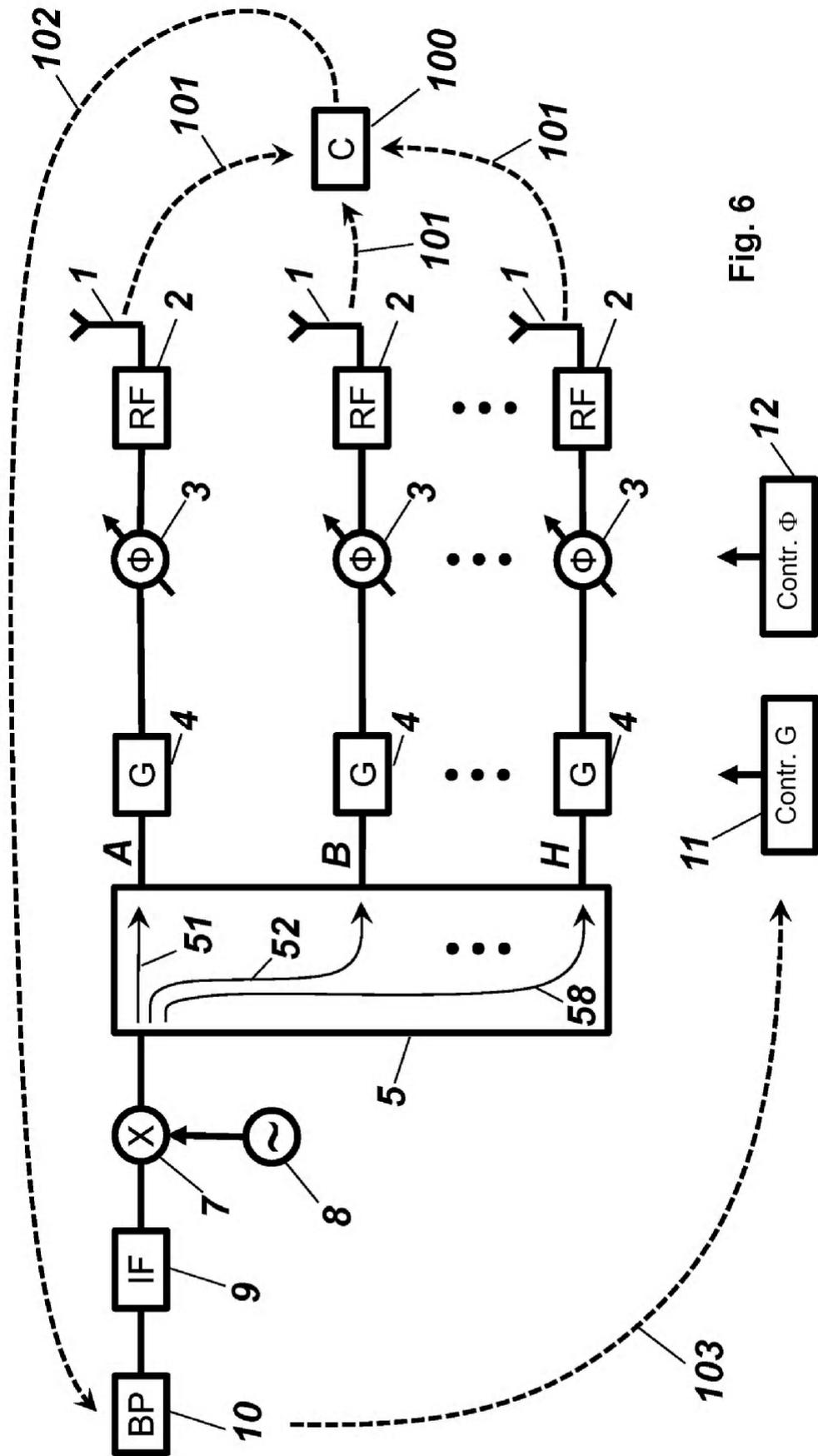


Fig. 5



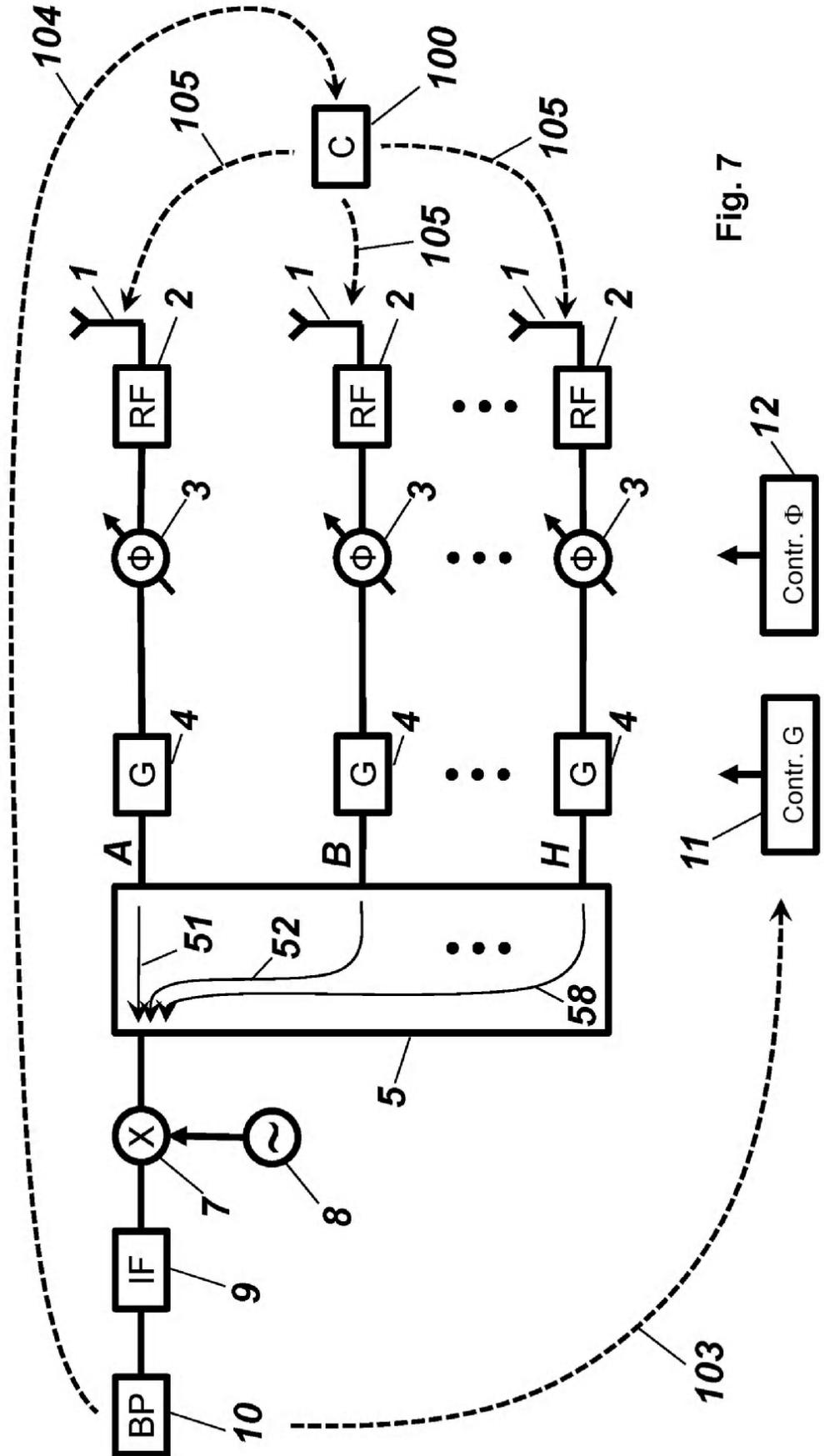


Fig. 7

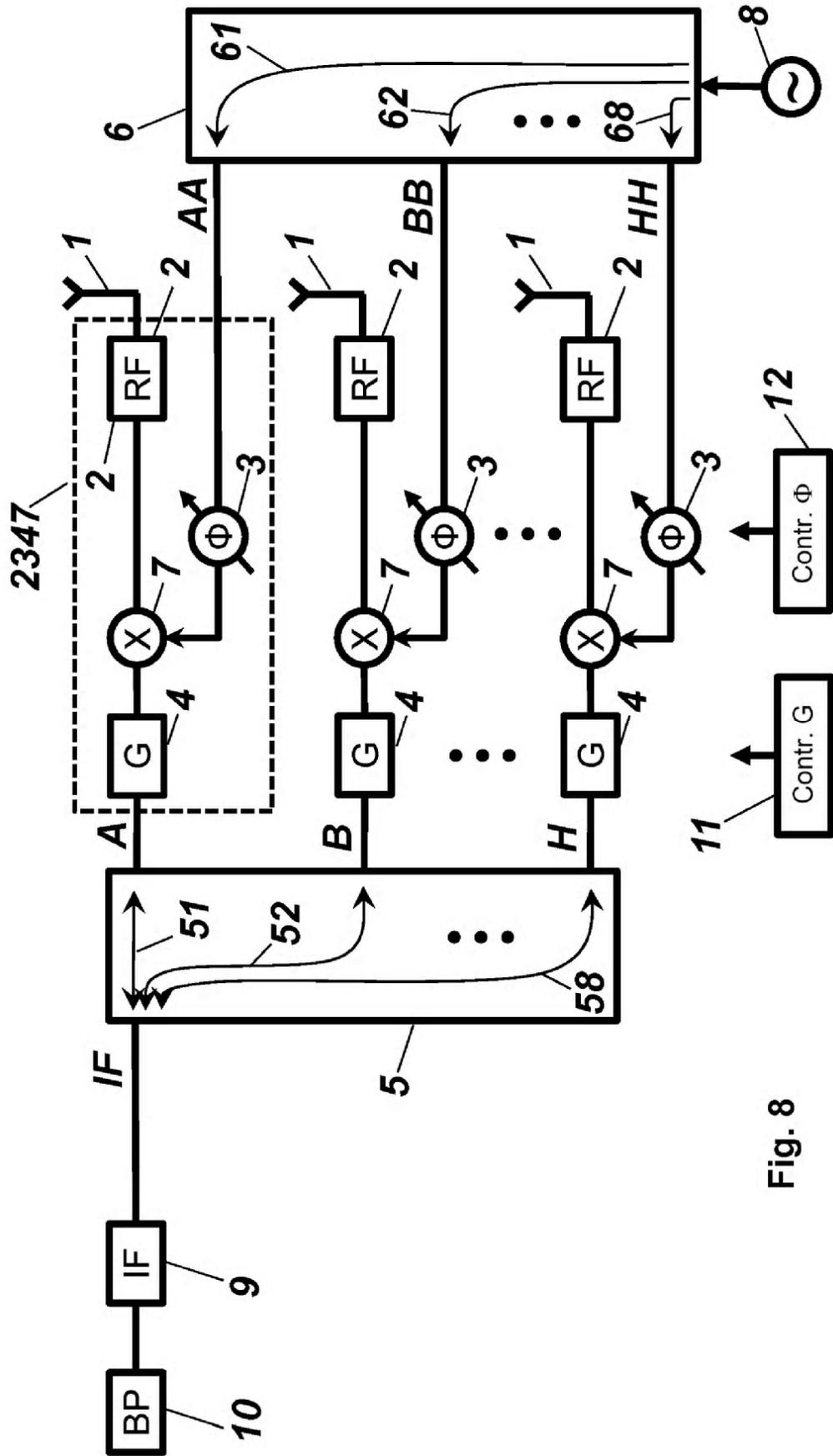


Fig. 8

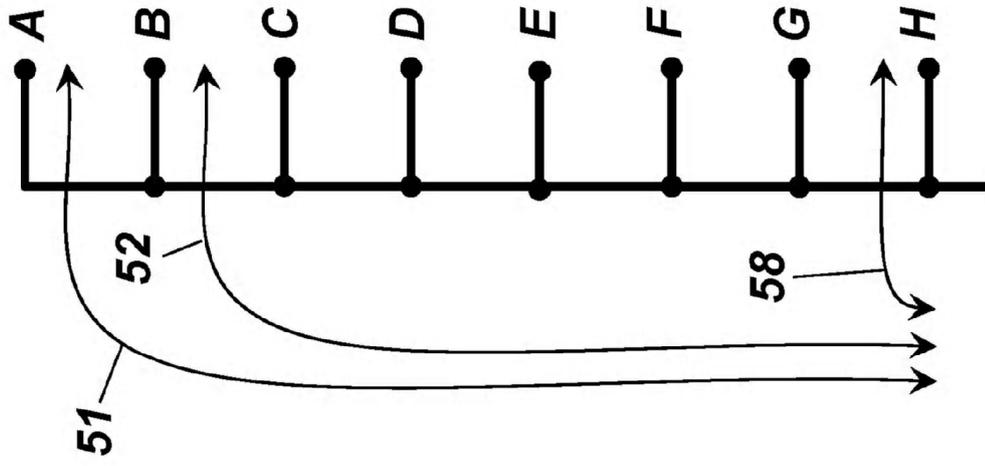


Fig. 9

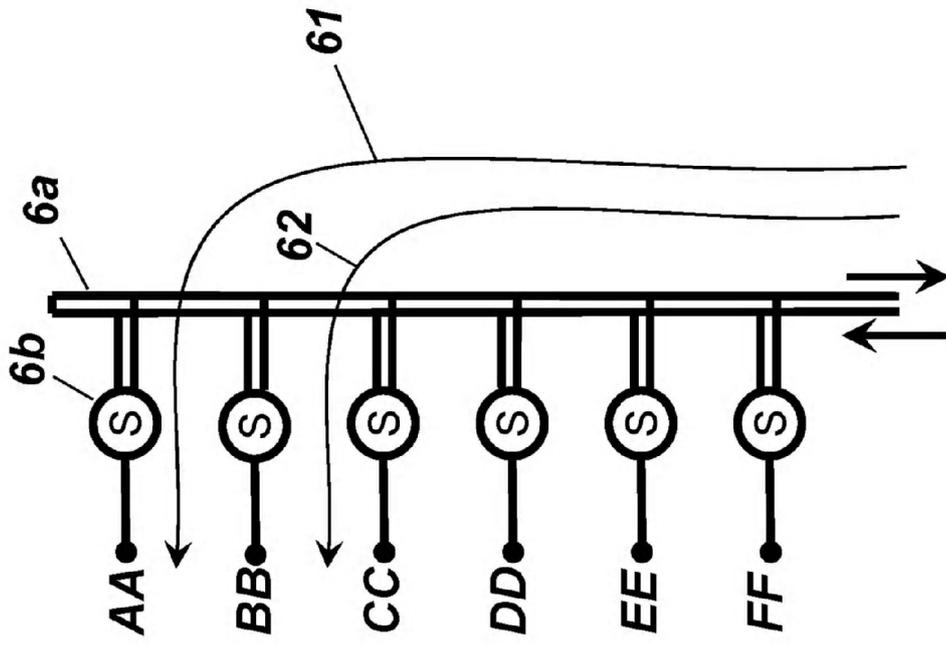


Fig. 10

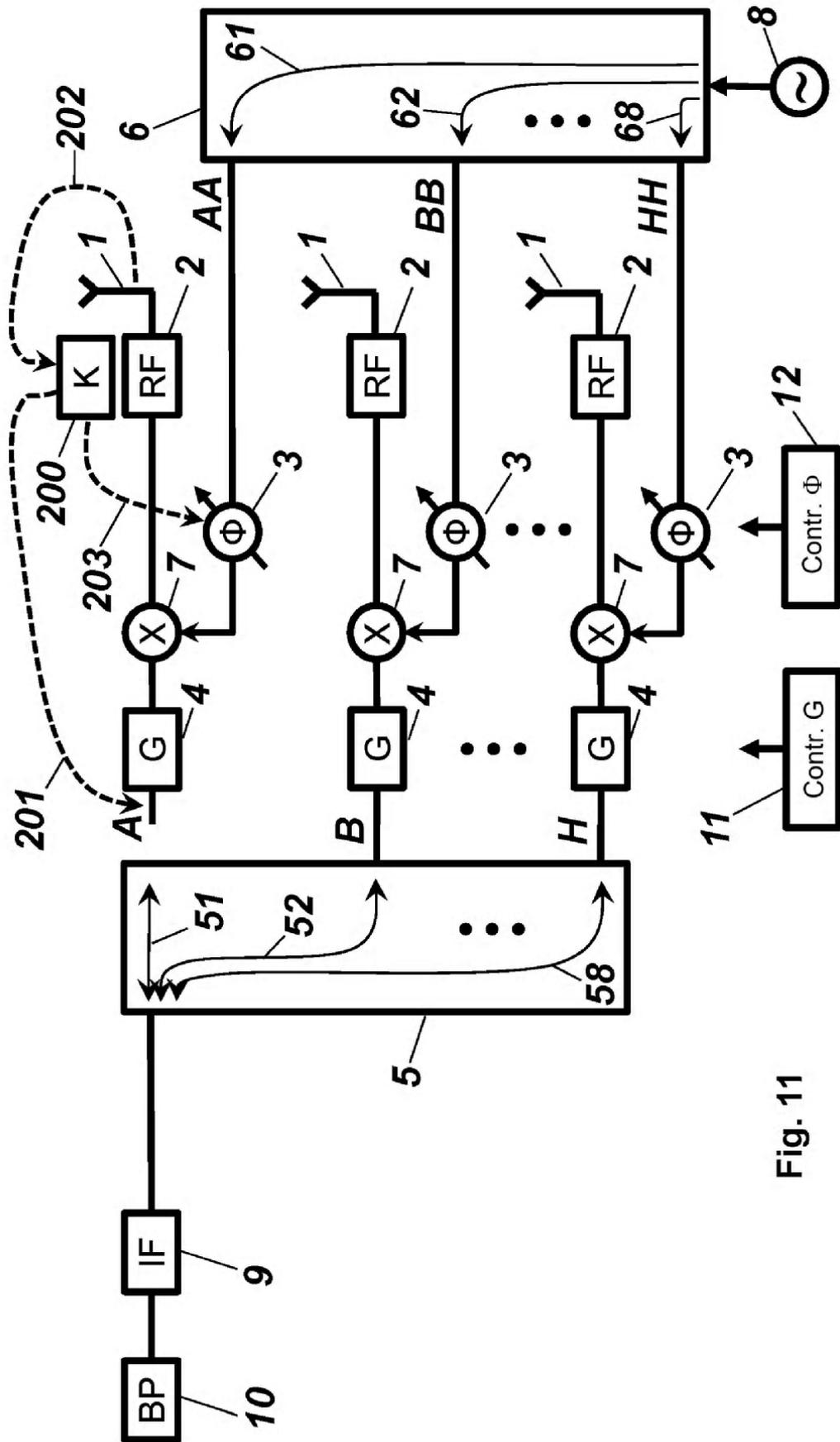


Fig. 11

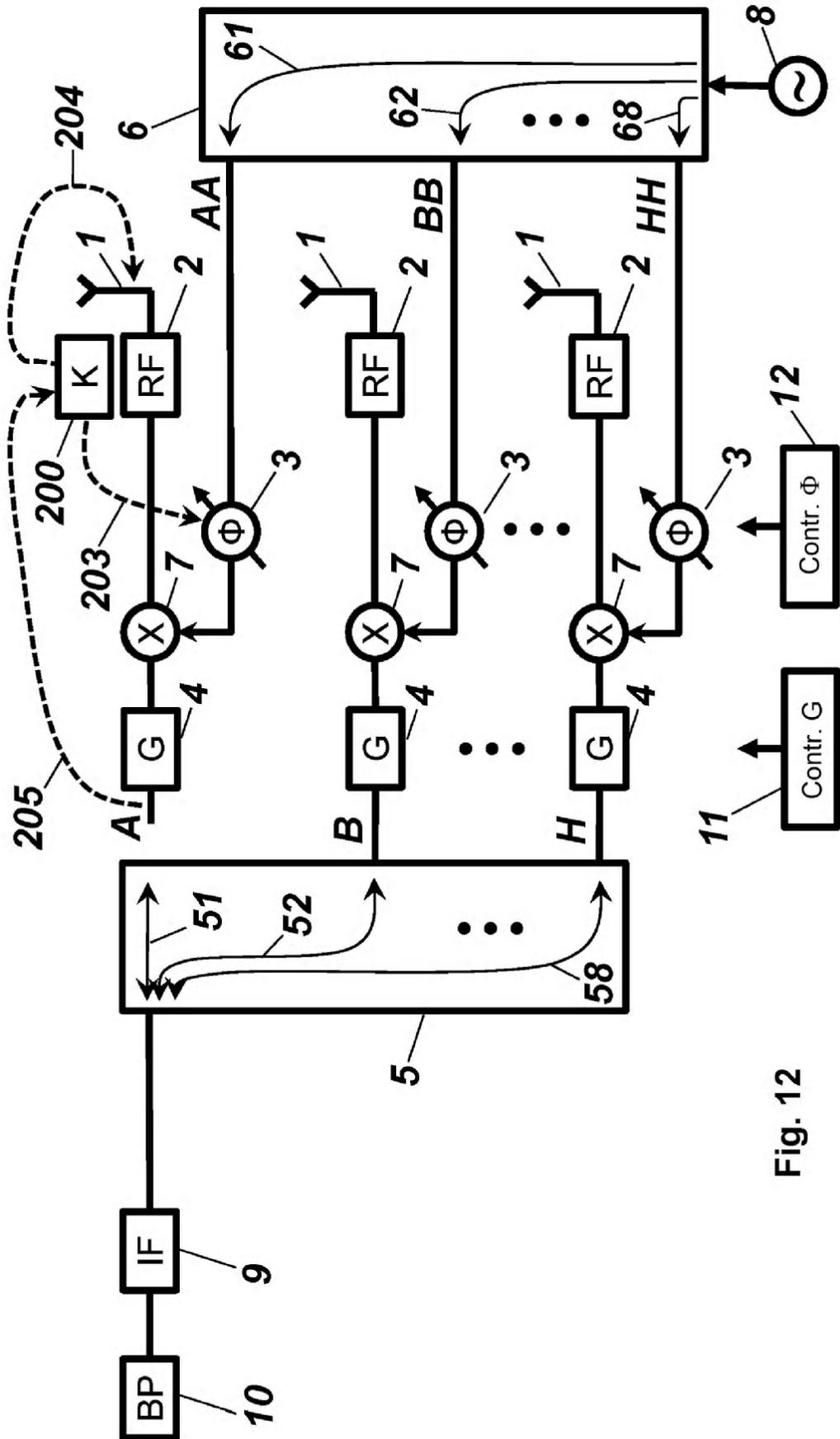


Fig. 12

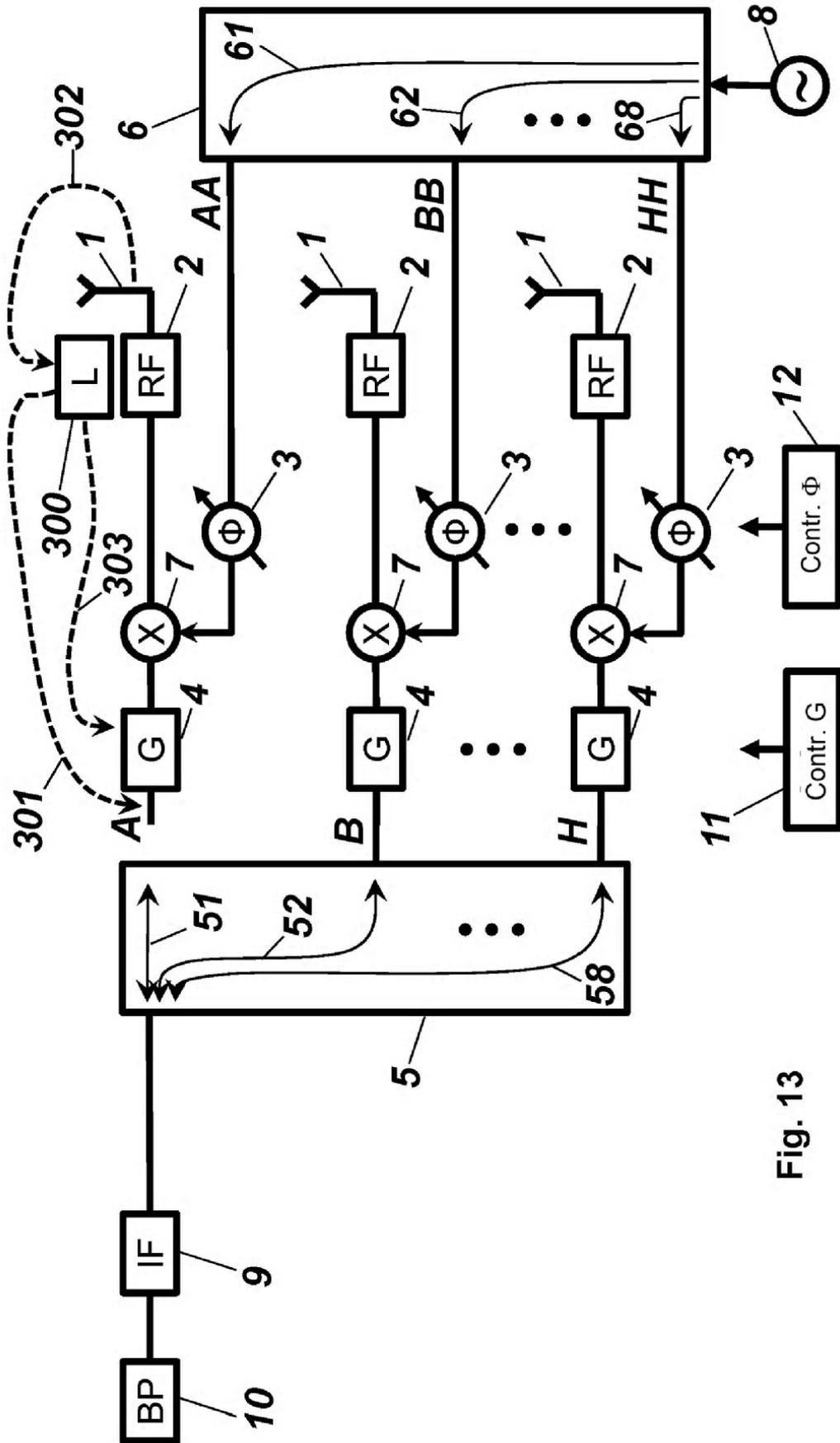


Fig. 13

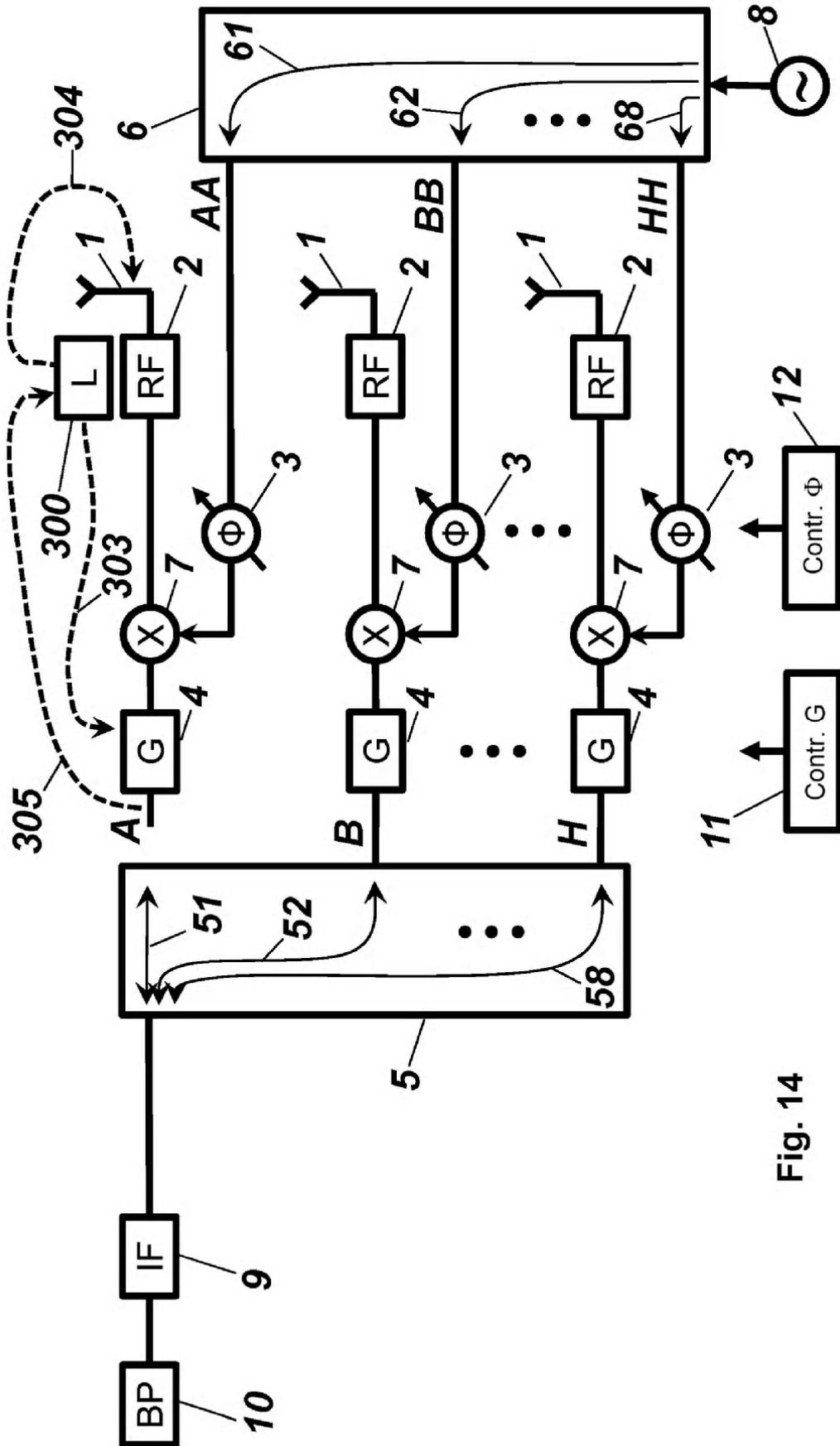


Fig. 14

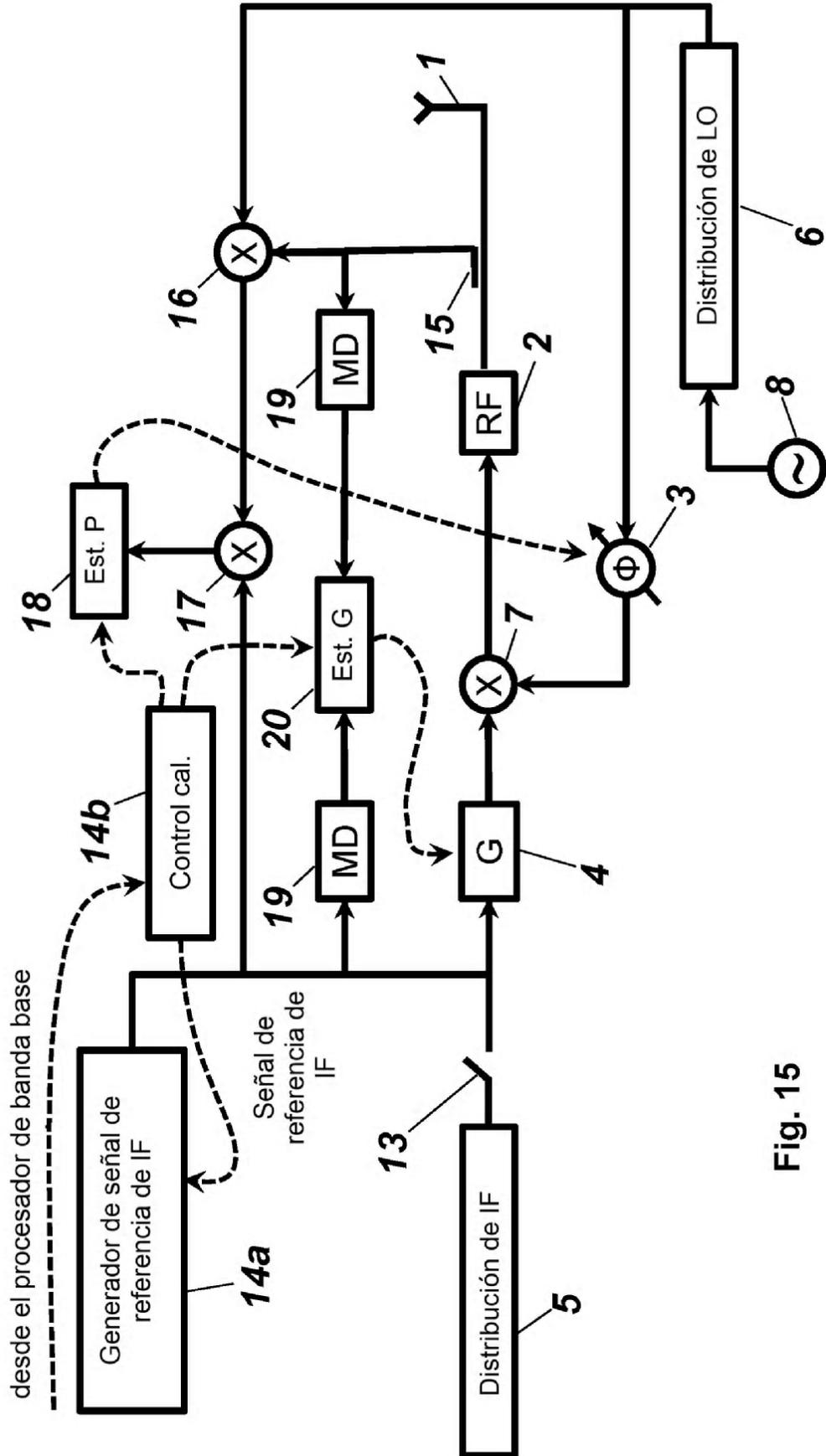


Fig. 15

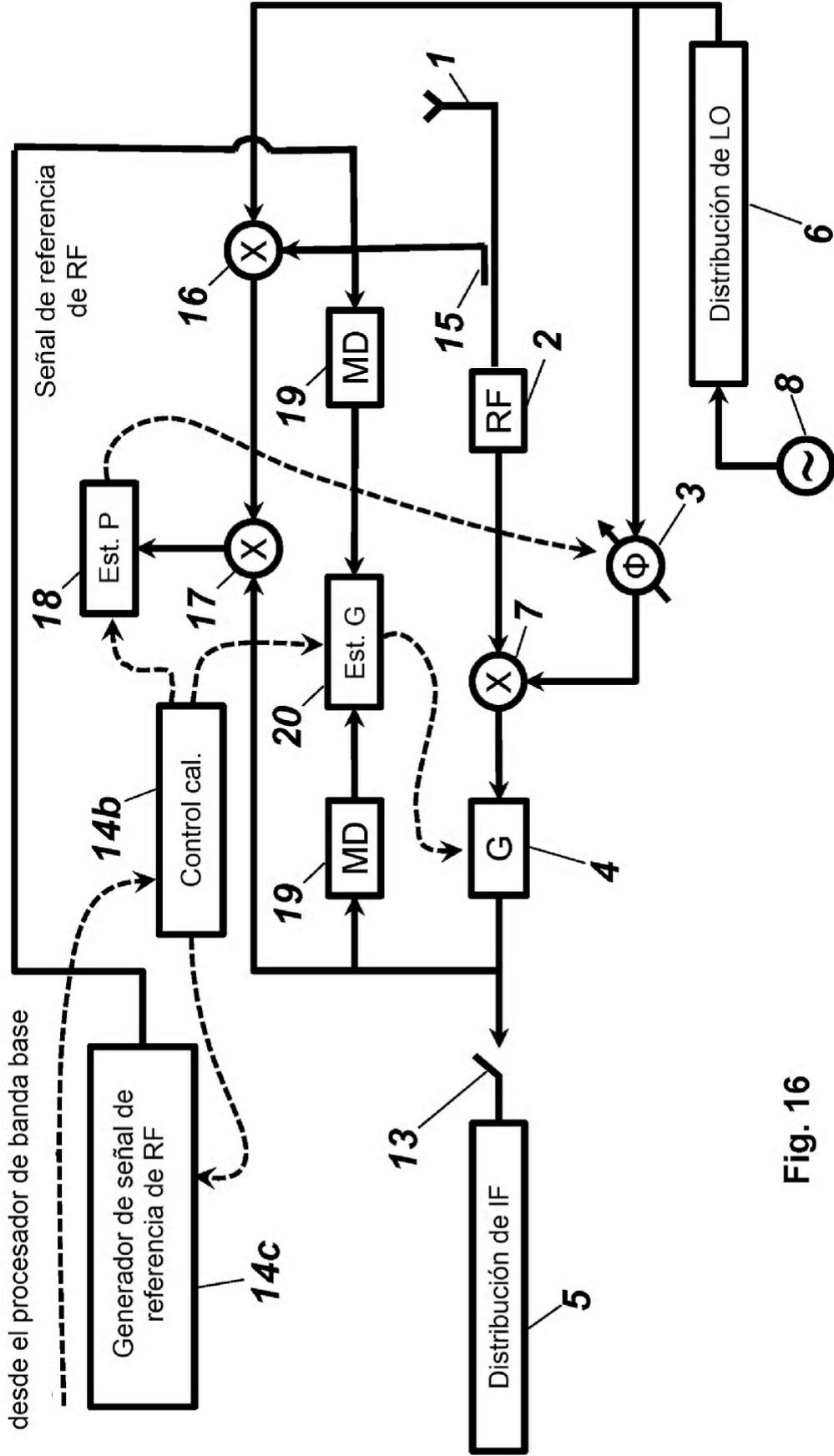


Fig. 16

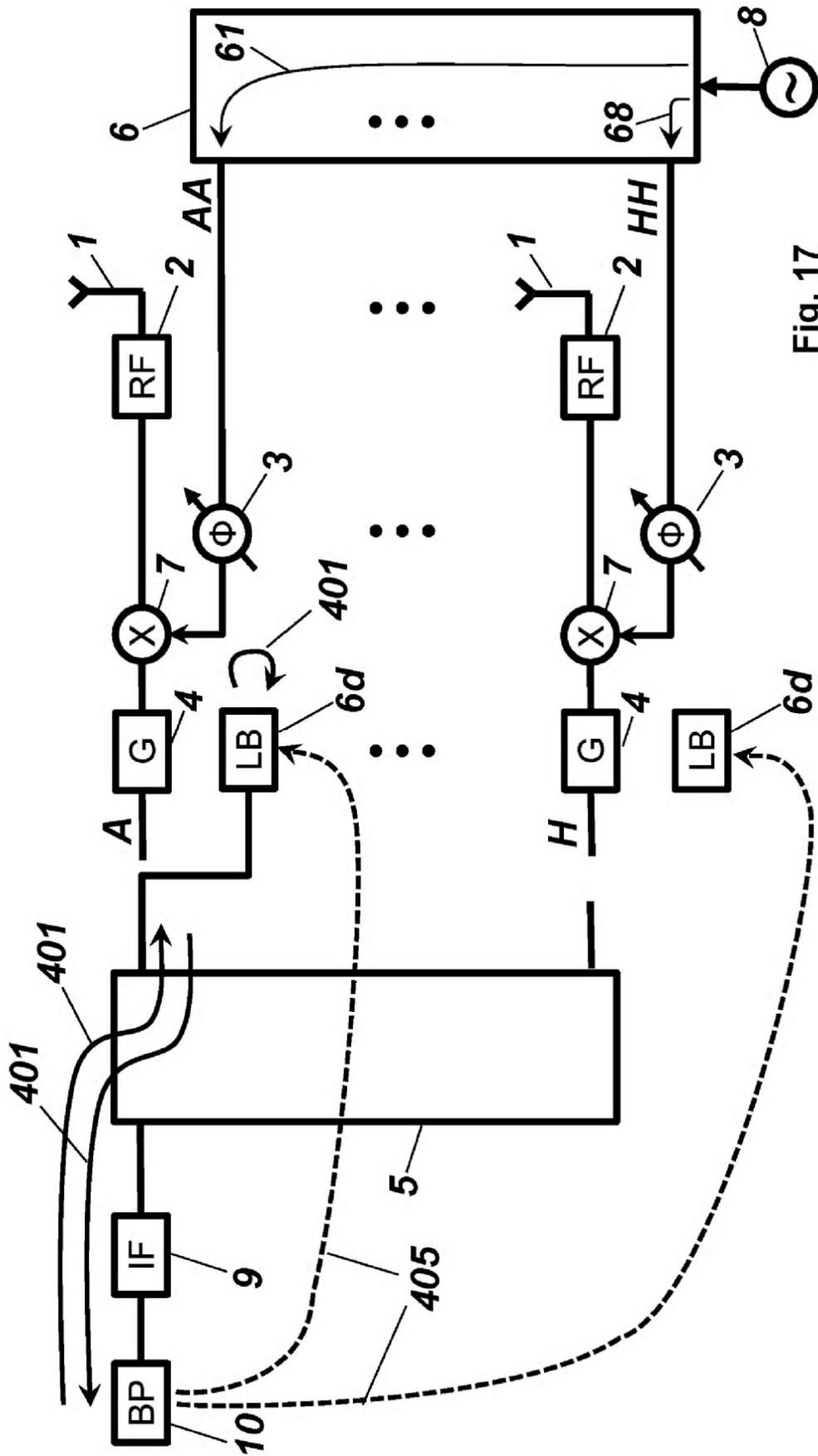


Fig. 17

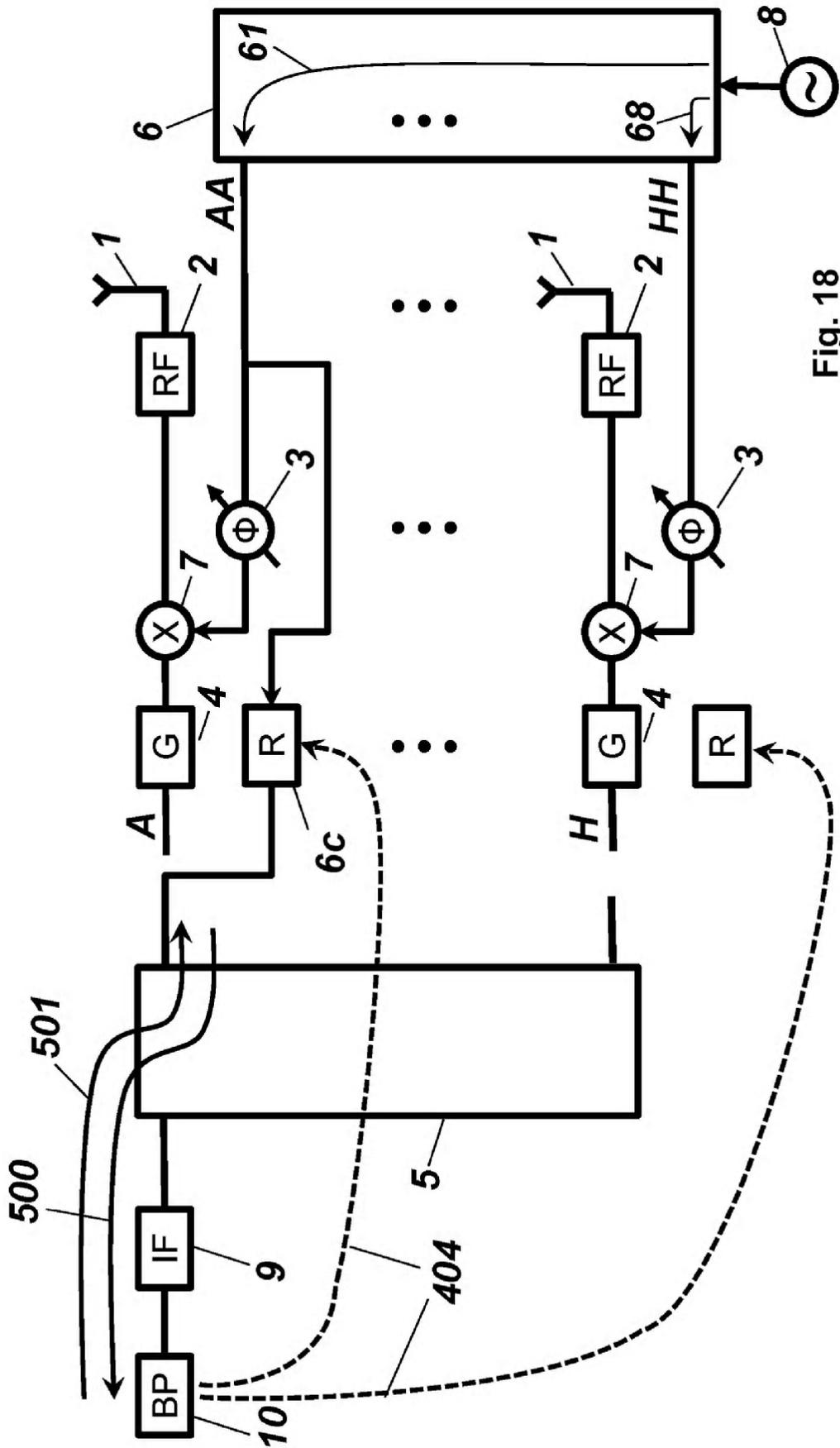


Fig. 18

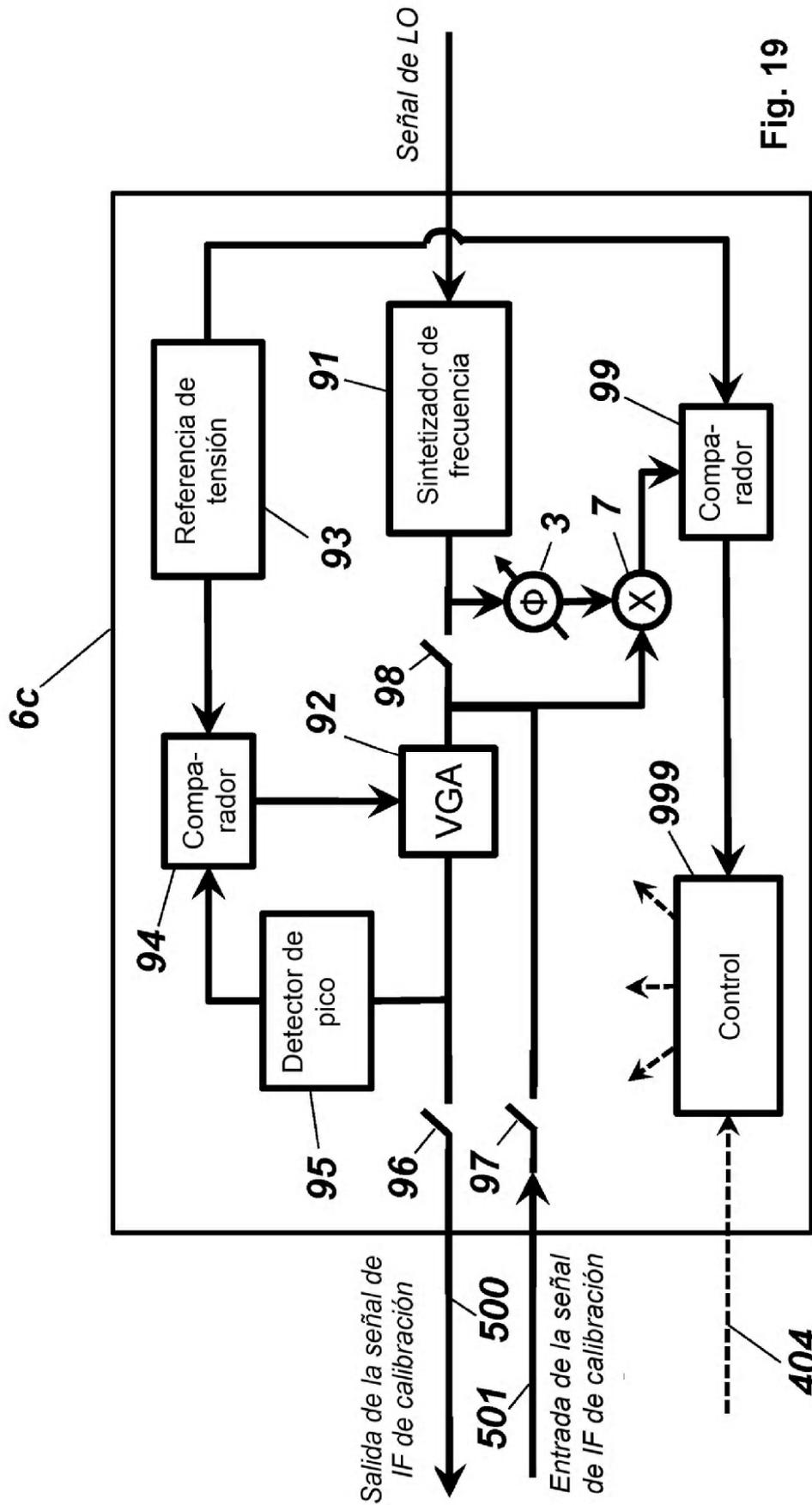


Fig. 19

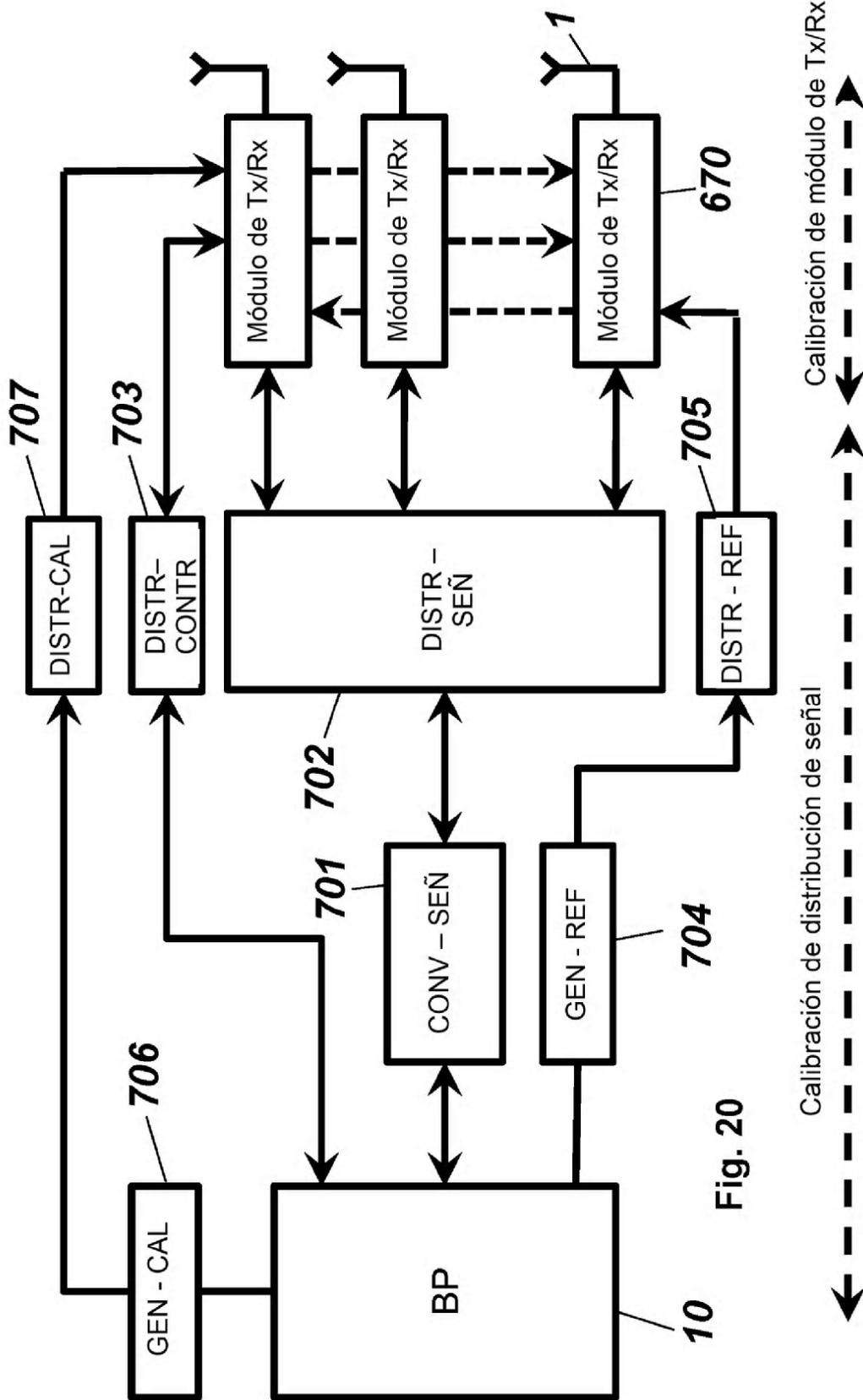


Fig. 20

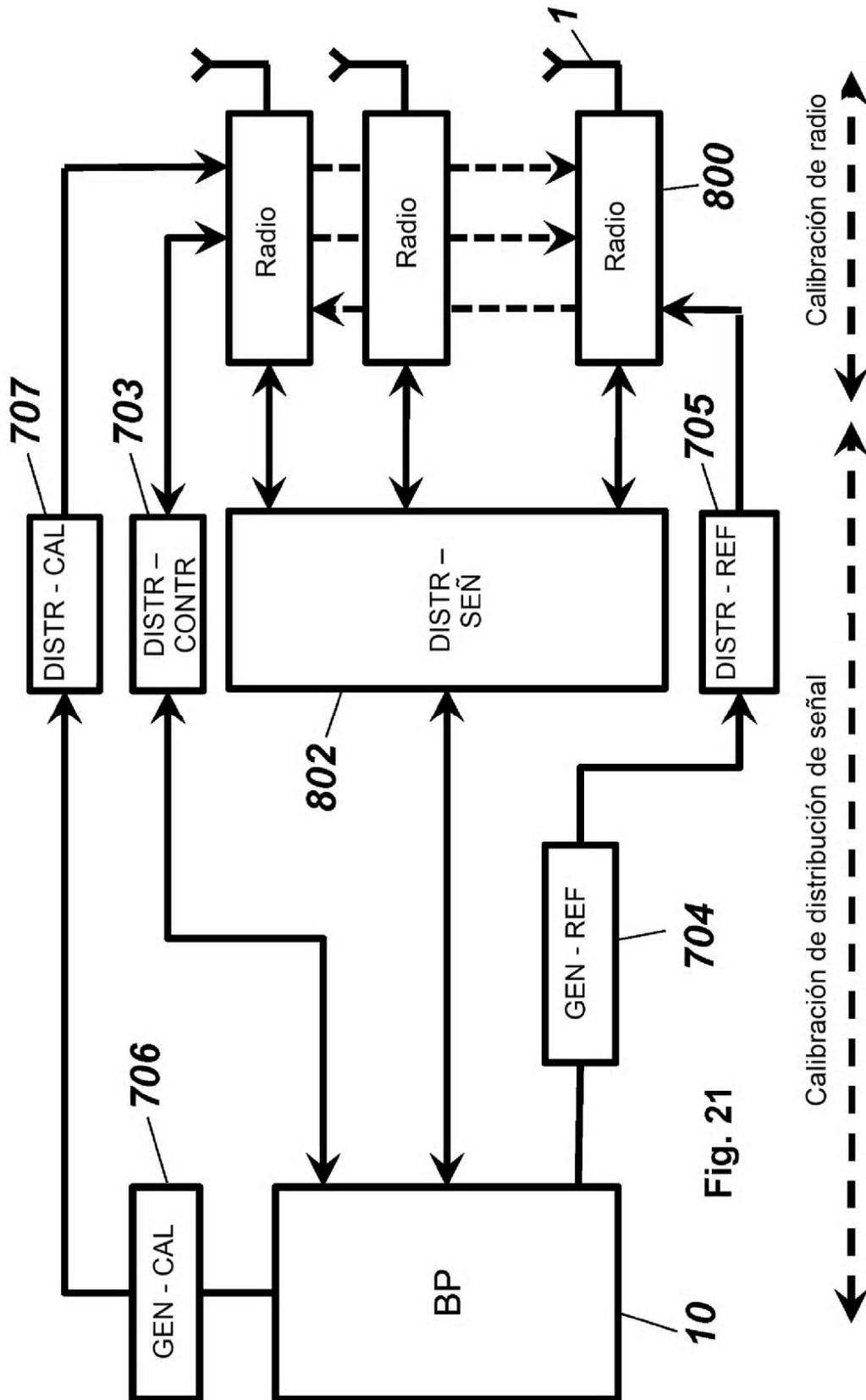


Fig. 21

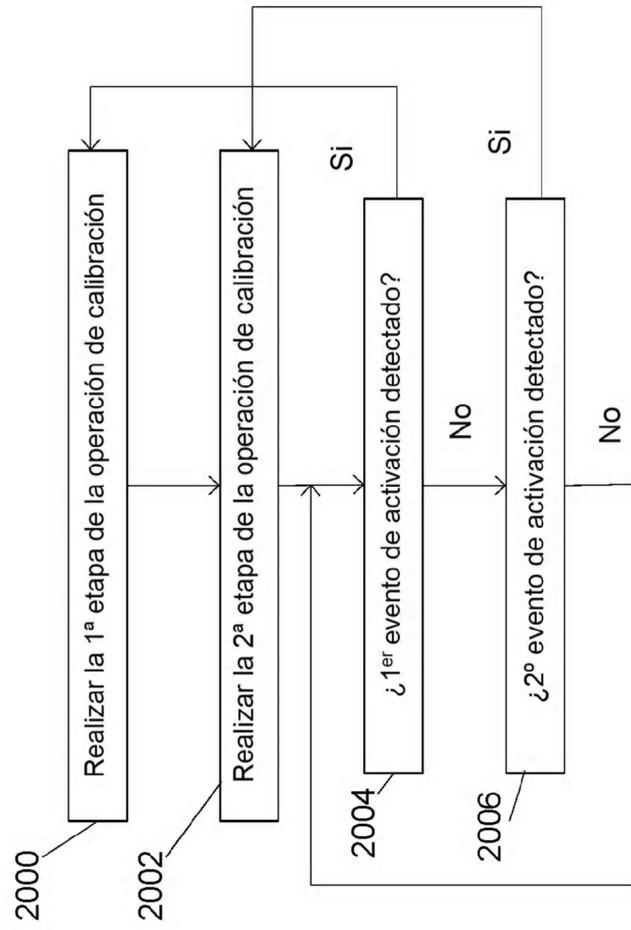


Fig. 22

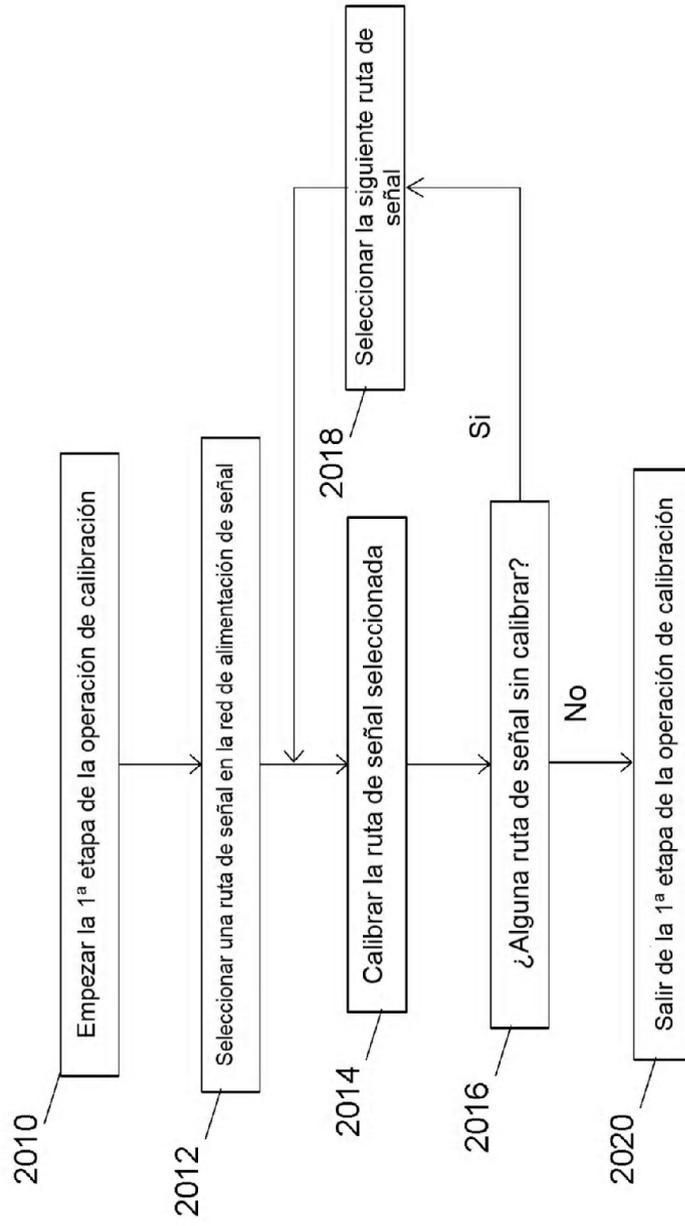


Fig. 23

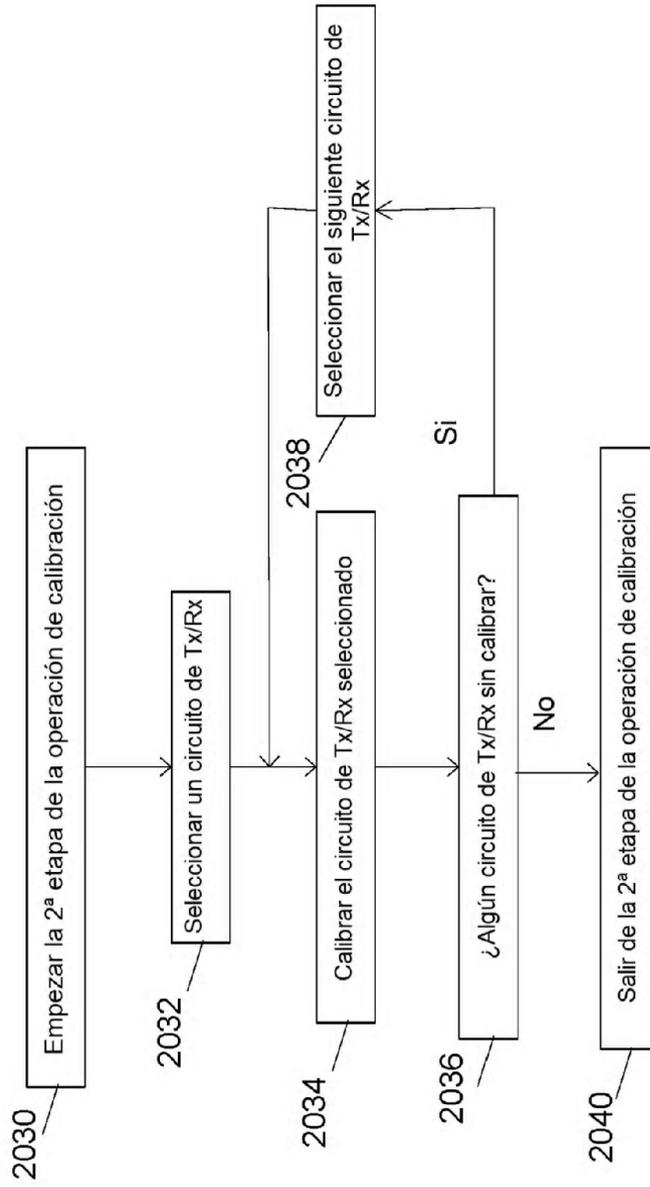


Fig. 24