

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 980 632**

51 Int. Cl.:

H04B 1/58 (2006.01)
H03H 7/46 (2006.01)
H03H 9/70 (2006.01)
H04B 1/52 (2015.01)
H04B 1/56 (2006.01)
H03H 7/42 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.02.2019 PCT/EP2019/053628**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.08.2020 WO20164707**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.02.2019 E 19705342 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.04.2024 EP 3925078**

54 Título: **Circuito combinador diferencial**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.10.2024

73 Titular/es:
**TELEFONAKTIEBOLAGET LM ERICSSON
(PUBL) (100.0%)
164 83 Stockholm, SE**

72 Inventor/es:
SJÖLAND, HENRIK

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

ES 2 980 632 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

Circuito combinador diferencial

Campo técnico

5 Realizaciones del presente documento se refieren a circuitos combinadores diferenciales. En particular, se refieren a circuitos combinadores diferenciales para transceptores de dúplex completo o de dúplex por división de frecuencia flexible.

Antecedentes

10 Los dispositivos de comunicación inalámbrica suelen comprender transceptores que comprenden circuitos transmisores y receptores. Los circuitos transmisores típicamente convierten en sentido ascendente señales de banda base en señales de radiofrecuencia (RF) para su transmisión, y los circuitos receptores convierten en sentido descendente señales de RF recibidas en señales de banda base para su posterior procesamiento.

15 Existen grandes beneficios en los dispositivos de comunicación que pueden recibir y transmitir señales simultáneamente, en la misma frecuencia o en frecuencias diferentes. Preferiblemente, la antena debe compartirse entre el receptor y el transmisor. Entonces, el funcionamiento de un sistema de comunicación puede volverse más flexible, al no tener que planificar la recepción y la transmisión para que se produzcan en momentos diferentes, y se podrían reducir los retardos en las respuestas. A la transmisión y recepción simultáneas en la misma frecuencia se le hace referencia a menudo como dúplex completo, mientras que al uso de frecuencias diferentes se le hace referencia típicamente como dúplex por división de frecuencia (FDD). El dúplex completo tiene la ventaja de una mayor eficiencia espectral, pudiendo utilizar la misma frecuencia simultáneamente tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. Sin embargo, es extremadamente difícil lograr un aislamiento suficiente entre el transmisor y el receptor cuando la relación de potencia entre la señal a transmitir y recibir es elevada. Esto hace que el dúplex completo sea menos adecuado en sistemas de largo alcance donde la relación puede ser muy grande cuando el dispositivo de comunicación está muy lejos de una estación base. Por otro lado, el FDD se utiliza en sistemas de alcance relativamente largo, como las redes de telecomunicaciones de Evolución a Largo Plazo (LTE). En este caso se utiliza un conjunto de filtros fijos, el llamado duplexor, en cada banda de frecuencia, para separar las señales de recepción y transmisión. Un duplexor puede tener pérdidas bajas y aun así proporcionar un alto aislamiento. Para que esto sea posible, las dos señales deben estar suficientemente separadas en frecuencia y, por lo tanto, las señales típicamente se ubican separadas a la llamada distancia dúplex, y se fija qué señal está en la frecuencia más baja y cuál está en la más alta. Por tanto, el uso de filtros de dúplex hace que la utilización de frecuencias en una banda sea inflexible. Dado que se requiere un duplexor por banda de frecuencia, la utilización de la banda también se vuelve inflexible. Además, el número de bandas a admitir estará limitado por los costes y el tamaño físico de los filtros de dúplex.

20 Por tanto, los filtros de dúplex proporcionan un alto rendimiento pero tienen muy poca flexibilidad. Las frecuencias para señales de recepción y transmisión deben estar separadas por la distancia dúplex. Los filtros proporcionan un intervalo de frecuencias fijo para señales de transmisión y un intervalo de frecuencias fijo para señales de recepción. Por lo tanto, no será posible utilizar un filtro de dúplex en una aplicación en la que las frecuencias de recepción y transmisión salten aleatoriamente sobre la banda de frecuencia, como en el Bluetooth. Además, dado que la funcionalidad del duplexor se basa en tener una distancia en frecuencia entre las señales de recepción y transmisión, es fundamentalmente incompatible con la utilización del dúplex completo. A esto se suma el problema del número cada vez mayor de bandas de frecuencia a cubrir en los teléfonos móviles, lo que requiere un número cada vez mayor de duplexores grandes y costosos.

25 Si no se pueden utilizar filtros para aislar el receptor y el transmisor, debido a una flexibilidad deficiente, se pueden utilizar diferentes tipos de combinadores aislantes. El principal inconveniente es que estos combinadores aislantes tienen unas pérdidas de inserción inherentes de 3 dB. Los combinadores aislantes se suelen basar en el principio de cancelación y se construyen utilizando resistores combinados con elementos de circuito como líneas de transmisión y transformadores. Por ejemplo, en el documento US20110064004, se dan a conocer aisladores de equilibrio eléctrico que utilizan un transformador y una carga ficticia. Cuando la carga ficticia se adapta perfectamente a la impedancia de una antena, existe simetría en los aisladores y se obtiene un aislamiento perfecto. El inconveniente es que se necesita un transformador, con pérdidas asociadas. La materialización de una carga ficticia que sea totalmente programable con impedancia tanto inductiva como capacitiva sobre el intervalo de frecuencias deseado también es un tema importante. Otra opción es utilizar un combinador Wilkinson, que puede usarse para brindar cierta flexibilidad con diferentes modos de funcionamiento. Este combinador, sin embargo, requiere la implementación de dos líneas de transmisión de cuarto de onda. Las líneas de transmisión también son difíciles de sintonizar con otras frecuencias centrales. Queda también abierta la cuestión de cómo preservar el aislamiento y compensar las variaciones de impedancia de la antena, tanto inductivas como capacitivas.

30 En el documento US 2014/210542 A1, se describe un dispositivo electrónico, incluyendo el dispositivo un primer circuito dispuesto para transferir una señal con un primer desplazamiento de fase predeterminado, un segundo circuito, conectado en serie con el primer circuito, dispuesto para transferir una señal con un segundo desplazamiento de fase predeterminado, y una resistencia conectada en paralelo con el primer y segundo circuitos, en donde el primer circuito

incluye una primera capacitancia conectada entre un primer par de nodos, una segunda capacitancia conectada entre un segundo par de nodos, y un primer transformador que tiene un primer devanado conectado entre el primer par de nodos y un segundo devanado conectado entre el segundo par de nodos.

5 En "Two Tunable Frequency Duplexer Architectures for Cellular Transceivers", de I. u. Din, J. Wernehag, S. Andersson y H. Sjöland, de *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 64, n.º 11, págs. 2988-2999, noviembre de 2017, se presentan dos arquitecturas para duplexores sintonizables. La sintonización se logra a través de una capacitancia y una resistencia variables. Las arquitecturas se basan en un resonador serie-paralelo de tres elementos, con una frecuencia de paso y otra de rechazo. Ambas arquitecturas se fundamentan en el filtrado y la cancelación para lograr un buen aislamiento de Tx a Rx y al mismo tiempo mantener unas pérdidas de inserción bajas. 10 La primera arquitectura, el aislador equilibrado por transformador filtrado (FTB), tiene puertos de transmisión y antena de un solo terminal y un puerto de recepción diferencial. La segunda arquitectura, el aislador de filtrado con acoplamiento cruzado (CCF), es completamente diferencial. Para una Q de un resonador de 50, la relación de impedancia del resonador en las frecuencias de paso y de rechazo es de 18.5 dB para la banda I del 3GPP. En el aislador FTB, esto da como resultado unas pérdidas de inserción de 1.65 dB en Tx y 2.14 dB en Rx, y un aislamiento de 53 dB para un ancho de banda de canal de 20 MHz. En el aislador de CCF, esto da como resultado unas pérdidas de inserción de 1.9 dB en Tx y 1.9 dB en Rx, y un aislamiento de 59 dB para un ancho de banda de canal de 20 MHz. 15 Estas cifras se obtienen con una desadaptación resistiva del 20%, lo cual revela la viabilidad de un buen rendimiento en un entorno con impedancia cambiante.

20 En "Hybrid Transformer-Based Tunable Differential Duplexer in a 90-nm CMOS Process", de S. H. Abdelhalem, P. S. Gudem y L. E. Larson, de *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, n.º 3, págs. 1316-1326, marzo de 2013, se presenta un duplexor de transformador híbrido diferencial que cubre las bandas I, II, III y IX del 3GPP entre 1.7 y 2.2 GHz. Logra un aislamiento de diferencial a diferencial de 60 dB en la banda de transmisión (TX) y 40 dB en la banda de recepción (RX), y un aislamiento del modo diferencial al común de 60 dB en ambas bandas. El duplexor con un amplificador de bajo ruido (LNA) en cascada alcanza una figura de ruido de 5.6 dB en el trayecto de RX y unas pérdidas de inserción de 3.7 dB en el trayecto de TX. 25

El documento US 2004/180633A1 da a conocer un aparato de radiocomunicaciones que comprende una antena, un circuito de transmisión para dar salida a una señal de transmisión en una primera banda de frecuencia, un duplexor, conectado a la antena y que tiene un terminal de entrada monofásico y un terminal de salida equilibrado, para llevar la señal de transmisión introducida en el terminal de entrada monofásico a la antena y dar salida a una señal de 30 recepción en una segunda banda de frecuencia diferente de la primera banda de frecuencia recibida de la antena sustancialmente en forma de una señal diferencial desde el terminal de salida equilibrado, y un circuito de recepción conectado al terminal de salida equilibrado y que tiene un circuito en el que la ganancia de una señal de un componente diferencial es mayor que la de una señal de un componente en fase, o las pérdidas de la señal del componente diferencial son menores que las de la señal del componente en fase.

35 **Compendio**

Por lo tanto, un objetivo de realizaciones del presente documento es proporcionar un circuito aislador con rendimiento mejorado.

40 Según un aspecto de realizaciones del presente documento, el objetivo se logra mediante un circuito combinador diferencial. El circuito combinador diferencial comprende un primer puerto que tiene un primer terminal y un segundo terminal; un segundo puerto que tiene un primer terminal y un segundo terminal; y un tercer puerto que tiene un primer terminal y un segundo terminal.

El circuito combinador diferencial comprende además un primer subcircuito que comprende un primer inductor conectado entre los primeros terminales del primer y segundo puertos, y un primer condensador conectado entre los primeros terminales del segundo y tercer puertos.

45 El circuito combinador diferencial comprende además un segundo subcircuito que comprende un segundo inductor conectado entre los segundos terminales del primer y segundo puertos, y un segundo condensador conectado entre los segundos terminales del segundo y tercer puertos.

El circuito combinador diferencial comprende además un tercer condensador conectado entre el primer y segundo terminales del primer puerto, y un tercer inductor conectado entre el primer y segundo terminales del tercer puerto.

50 El circuito combinador diferencial comprende además un primer resistor conectada entre el primer terminal del primer puerto y el segundo terminal del tercer puerto, y un segundo resistor conectado entre el segundo terminal del primer puerto y el primer terminal del tercer puerto.

55 En otras palabras, un circuito combinador diferencial según las realizaciones del presente documento se realiza con un núcleo de tres inductores, tres condensadores y dos resistores. En el circuito combinador diferencial, se forman dos estructuras de balún. El primer balún comprende el primer subcircuito y una mitad del tercer condensador con el doble de la capacitancia y una mitad del tercer inductor con la mitad de la inductancia. El segundo balún comprende el segundo subcircuito y una mitad del tercer condensador con el doble de la capacitancia y una mitad del tercer

inductor con la mitad de la inductancia. El segundo puerto del circuito combinador diferencial puede servir como puerto de antena acoplado a una antena. El primer puerto del circuito combinador diferencial puede servir como puerto de recepción acoplado a un receptor y el tercer puerto del circuito combinador diferencial puede servir como puerto de transmisión acoplado a un transmisor o viceversa. Por lo tanto, los dos balunes están conectados de manera diferencial al puerto de antena y los dos resistores están conectados en acoplamiento cruzado entre los dos balunes.

El circuito combinador diferencial según las realizaciones del presente documento proporciona un alto aislamiento entre los puertos de recepción y transmisión para señales centradas en la frecuencia de resonancia de LC del circuito. Esto se debe a una cancelación entre dos trayectos, uno a través del subcircuito con estructura de LC y otro a través de los resistores en acoplamiento cruzado. Los resistores en acoplamiento cruzado tienen una función de resistores de aislamiento.

El circuito combinador diferencial según las realizaciones del presente documento proporciona un amplio ancho de banda, evita el uso de líneas de transmisión y transformadores, y no requiere una carga ficticia con inductancia programable. A pesar de su simplicidad y bajo número de componentes, admite circuitos totalmente diferenciales y proporciona un alto aislamiento entre el receptor y el transmisor. El circuito combinador diferencial es adecuado para una integración completa como aislador en chip y proporciona pérdidas adicionales bajas con inductores en chip de bajo factor de calidad. Con un aislador en chip como este, resulta factible introducir el dúplex completo o el dúplex por división de frecuencia flexible en transceptores de corto alcance y bajo coste.

Por lo tanto, el circuito combinador diferencial según realizaciones del presente documento proporciona un circuito aislador mejorado para transceptores de dúplex completo o de dúplex por división de frecuencia flexible.

Breve descripción de los dibujos

Se describen con más detalle ejemplos de realizaciones en el presente documento con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- Figura 1 es una vista esquemática de un circuito combinador diferencial según una primera realización del presente documento;
- Figura 2 es una vista esquemática de un circuito combinador diferencial de acuerdo con una segunda realización del presente documento;
- Figura 3 muestra resultados de simulación para el circuito combinador diferencial según una realización del presente documento;
- Figura 4 es un esquema de un circuito para analizar el circuito combinador diferencial según una realización del presente documento;
- Figura 5 muestra resultados de simulación para el circuito combinador diferencial según una realización del presente documento cuando la impedancia de la antena varía pero los resistores de aislamiento se mantienen constantes;
- Figura 6 muestra resultados de simulación para el circuito combinador diferencial según una realización del presente documento cuando la impedancia de la antena varía y los resistores de aislamiento también varían;
- Figura 7 es una vista esquemática de un circuito combinador diferencial según una tercera realización del presente documento;
- Figura 8 muestra resultados de simulación para el circuito combinador diferencial según una realización del presente documento mostrada en la figura 7;
- Figura 9 muestra resultados de simulación para el combinador diferencial que se muestra en la figura 7 con inductores no ideales;
- Figura 10 muestra resultados de simulación para el combinador diferencial que se muestra en la figura 7 con ajustes sintonizados más finamente de parámetros del circuito; y
- Figura 11 es un diagrama de bloques que ilustra un dispositivo electrónico en el que se puede implementar un transceptor según realizaciones del presente documento.

Descripción detallada

La **figura 1** muestra un circuito combinador diferencial **100** según una primera realización en el presente documento.

El circuito combinador diferencial 100 comprende dos balunes **101** y **102**. Cada balún tiene una estructura reticular con dos inductores y dos condensadores, y cada balún tiene tres terminales. El primer balún 101 tiene dos inductores **L1** y **L3a**, dos condensadores **C1** y **C3a**, un primer terminal **1a**, un segundo terminal **2a**, un tercer terminal **3a**. El segundo balún 102 tiene dos inductores **L2** y **L3b**, dos condensadores **C2** y **C3b**, un primer terminal **1b**, un segundo terminal **2b**, un tercer terminal **3b**. En cada balún, entre el primer terminal y una tierra de referencia para las señales hay un condensador C3a/C3b, entre el primer y el segundo terminales hay un inductor L1/L2, entre el segundo y el tercer terminales hay un condensador C1/C2, y entre el tercer terminal y la tierra de referencia para las señales hay un inductor L3a/L3b.

Los primeros terminales 1a, 1b del primer y segundo balunes forman un primer puerto del circuito combinador diferencial 100.

Los segundos terminales 2a, 2b del primer y segundo balunes forman un segundo puerto del circuito combinador diferencial 100.

Los terceros terminales 3a, 3b del primer y segundo balunes forman un tercer puerto del circuito combinador diferencial 100.

El circuito combinador diferencial 100 comprende además dos resistores R1 y R2, cada uno de ellos conectado entre el primer terminal 1a/1b de un balún y el tercer terminal 3b/3a del otro, es decir, están conectados en acoplamiento cruzado.

Dado que los dos balunes 101, 102 serán accionados con señales diferenciales en todos los puertos del circuito combinador diferencial 100, los dos condensadores C3a, C3b conectados a la tierra de referencia para las señales se pueden sustituir por un único condensador C3 con la mitad del valor entre los primeros terminales 1a, 1b de los dos balunes, y los dos inductores L3a, L3b conectados a la tierra de referencia para las señales se pueden sustituir de la misma manera por un inductor L3 con el doble del valor entre los terceros terminales 3a, 3b de los dos balunes. La **figura 2** muestra un circuito combinador diferencial **200** de este tipo de acuerdo con una segunda realización en el presente documento.

El circuito combinador diferencial 200 comprende un primer puerto que tiene un primer terminal **1a** y un segundo terminal **1b**; un segundo puerto que tiene un primer terminal **2a** y un segundo terminal **2b**; y un tercer puerto que tiene un primer terminal **3a** y un segundo terminal **3b**.

El circuito combinador diferencial 200 comprende además un primer subcircuito que comprende un primer inductor **L1** conectado entre los primeros terminales 1a, 2a del primer y segundo puertos, y un primer condensador **C1** conectado entre los primeros terminales 2a, 3a del segundo y tercer puertos.

El circuito combinador diferencial 200 comprende además un segundo subcircuito que comprende un segundo inductor **L2** conectado entre los segundos terminales 1b, 2b del primer y segundo puertos, y un segundo condensador **C2** conectado entre los segundos terminales 2b, 3b del segundo y tercer puertos.

El circuito combinador diferencial 200 comprende además un tercer condensador **C3** conectado entre el primer y segundo terminales 1a, 1b del primer puerto, y un tercer inductor **L3** conectado entre el primer y segundo terminales 3a, 3b del tercer puerto.

El circuito combinador diferencial 200 comprende además un primer resistor **R1** conectado entre el primer terminal 1a del primer puerto y el segundo terminal 3b del tercer puerto, y un segundo resistor **R2** conectado entre el segundo terminal 1b del primer puerto y el primer terminal 3a del tercer puerto.

Como puede verse, el circuito combinador diferencial 200 según las realizaciones del presente documento se implementa con un núcleo de tres inductores, tres condensadores y dos resistores. En el circuito combinador diferencial 200, se forman dos estructuras de balún. El primer balún comprende el primer subcircuito con L1, C1 y una mitad del tercer condensador C3 con el doble de la capacitancia y una mitad del tercer inductor L3 con la mitad de la inductancia. El segundo balún comprende el segundo subcircuito con L2, C2 y una mitad del tercer condensador C3 con el doble de la capacitancia y una mitad del tercer inductor L3 con la mitad de la inductancia. El segundo puerto del circuito combinador diferencial 200 puede servir como puerto de antena acoplado a una antena. El primer puerto del circuito combinador diferencial 200 puede servir como puerto de **RX** de recepción acoplado a un receptor y el tercer puerto del circuito combinador diferencial 200 puede servir como puerto de **TX** de transmisión acoplado a un transmisor o viceversa. Por lo tanto, los dos balunes están conectados de manera diferencial al puerto de antena y los dos resistores están conectados en acoplamiento cruzado entre los dos balunes.

A todos los inductores L1, L2, L3a, L3b y condensadores C1, C2, C3a, C3b del circuito combinador diferencial 100, 200 se les pueden asignar los mismos valores de inductancia y capacitancia, por ejemplo un valor de inductancia de L y un valor de capacitancia de C. Para el tercer condensador C3 el cual es la combinación de los dos condensadores C3a, C3b, la mitad del valor de capacitancia C, y para el tercer inductor L3 el cual es la combinación de los dos inductores L3a, L3b, el doble del valor de inductancia L.

El circuito combinador diferencial 200 proporcionará un aislamiento elevado centrado en la frecuencia de resonancia $= 1/(2\pi\sqrt{LC})$. Su frecuencia de funcionamiento no está desplazada con respecto a la resonancia de LC, como en un circuito de adaptación en L, es decir, una red de adaptación que contiene un inductor y un condensador construida en forma de L, donde el desplazamiento depende del valor Q de calidad del circuito. El valor Q para que todos los puertos estén adaptados a una misma resistencia de puerto es igual a $1/(\text{raíz cuadrada de } 2)$, y este bajo valor Q proporcionará inherentemente un funcionamiento de banda ancha. Según algunas realizaciones, los dos resistores conectados en acoplamiento cruzado R1, R2 deberían tener cada uno de ellos un valor R_{iso} igual a la impedancia de los puertos diferenciales para un aislamiento óptimo. Sin embargo, otros valores también pueden proporcionar un aislamiento suficiente, dependiendo de los requisitos de una aplicación dada.

Se ha diseñado y simulado un circuito de ejemplo para verificar la funcionalidad y el rendimiento del circuito combinador diferencial 100, 200. El circuito de ejemplo se diseñó con una frecuencia central de 2 GHz y una impedancia de los puertos diferenciales R_{port} de 100 Ω . La inductancia L se selecciona como

$$L = \frac{R_{port}}{2} \frac{1}{2\pi f Q} = 50 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^9} = 5.63 \text{ nH} \quad (1)$$

Y la capacitancia C como

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot L} = 1.125 \text{ pF} \quad (2)$$

La resistencia R_{iso} de los resistores R1 y R2 se selecciona, para proporcionar un aislamiento óptimo, como

$$R_{iso} = -R_{port} = -100\Omega \quad (3)$$

La resistencia negativa se obtiene mediante acoplamiento cruzado; véanse los esquemas de las figuras 1 y 2, donde R1 y R2 son resistores conectados en acoplamiento cruzado para el aislamiento.

Se ha simulado el circuito de ejemplo. La **figura 3** muestra los parámetros S simulados, con $L1=L2=5.63 \text{ nH}$, $C1=C2=1.125 \text{ pF}$, $C3=0.5 \cdot 1.125 \text{ pF}$ y $L3=2 \cdot 5.63 \text{ nH}$, $R1=R2=100 \Omega$, $R_{port}=100 \Omega$. La curva de S31 es el parámetro S para los puertos de TX y RX que representa el aislamiento entre los puertos de TX y RX, la curva de S21 representa la transferencia de señal desde el Puerto de antena al puerto de RX y la curva de S32 representa la transferencia de señal desde el puerto de TX al Puerto de antena.

Como puede verse, para este circuito sencillo se obtiene un aislamiento de banda ancha. El comportamiento es el esperado con un aislamiento perfecto entre el puerto de RX y TX a 2 GHz, donde las pérdidas entre TX/RX y el puerto de antena son iguales a 3 dB. En una banda de 100 MHz de ancho, como lo indican las dos estrellas, el aislamiento supera los 40 dB.

El principio del circuito combinador diferencial 100, 200 puede explicarse y analizarse con referencia a la **figura 4**. Para analizar el circuito, se investiga una transferencia de un voltaje V_{TX} de la señal en el puerto de transmisión a una corriente i_{RX} en un puerto de recepción cortocircuitado. Se supone que el puerto de recepción está perfectamente aislado a la frecuencia de resonancia y, por lo tanto, no presenta ningún voltaje de señal, por lo que se puede utilizar una impedancia de cortocircuito para simplificar el análisis.

El análisis del circuito muestra que a la frecuencia de resonancia de L y C, la transferencia de v_{TX} a i_{RX} adquiere un valor real, según

$$i_{RX} = v_{TX} \cdot \frac{R_{ant}}{2} \cdot \frac{C}{L} \quad (4)$$

donde, R_{ant} es la impedancia de la antena. Esta corriente debe coincidir con la corriente inyectada por los resistores de aislamiento R1, R2. Esa corriente debería tener una fase opuesta, lo cual se materializa mediante el acoplamiento cruzado que se muestra en la figura 2. La magnitud de las corrientes debería ser igual, por lo que

$$R_{iso} = -\frac{v_{TX}}{i_{RX}} = -\frac{2L}{C \cdot R_{ant}} \quad (5)$$

Con la impedancia nominal de la antena de 100 Ω, la resistencia de aislamiento pasa a ser -100 Ω. El aislamiento también se puede lograr con otras impedancias de antena, si la resistencia de aislamiento se cambia de manera que sea inversamente proporcional a la impedancia de la antena según establece la ecuación (5). Por ejemplo, si la impedancia de la antena se reduce a la mitad a 50 Ω, la resistencia de aislamiento se debe duplicar a -200 Ω.

5 La **figura 5** muestra el resultado de una simulación, donde se realiza un barrido de la impedancia de la antena de 50 Ω a 200 Ω y la resistencia de aislamiento se mantiene constante a -100 Ω. Las curvas marcadas por la forma ovalada 501 son curvas de S31 para diferentes impedancias de antena de 50 Ω a 200 Ω. Las curvas marcadas por la forma ovalada 502 son curvas de S21, y por la forma ovalada 503 son curvas de S32.

10 La **figura 6** muestra el resultado de una simulación, donde se realiza un barrido de la impedancia de la antena de 50 Ω a 200 Ω y la resistencia de aislamiento se hace variar según la ecuación (5). Las curvas marcadas por la forma ovalada 601 son curvas de S31 para diferentes impedancias de antena de 50 Ω a 200 Ω. Las curvas marcadas por la forma ovalada 602 son curvas de S21, y por la forma ovalada 603 son curvas de S32.

15 Como se puede ver en las figuras 5 y 6, el circuito se comporta como se esperaba. Cuando se ajusta la resistencia de aislamiento de acuerdo con (5), se puede mantener un aislamiento perfecto a la frecuencia de resonancia aunque se cambie la impedancia de la antena.

20 Cuando la impedancia de la antena tiene una parte reactiva, la impedancia de la antena R_{ant} en la figura 4 va acompañada de un condensador o inductor, y la transferencia de v_{TX} a i_{RX} tendrá un desplazamiento de fase. Esta corriente desfasada se puede dividir en una parte en fase, cancelada por resistores de aislamiento dimensionados apropiadamente, y una parte de fase en cuadratura, cancelada por condensadores en paralelo con los resistores de aislamiento. Dependiendo del signo de la reactancia de la antena, los condensadores de aislamiento pueden estar conectados en acoplamiento cruzado o no. De este modo será posible compensar las cargas inductivas de la antena sin tener que introducir inductores adicionales en el circuito.

25 La **figura 7** muestra un circuito combinador diferencial 700 según realizaciones del presente documento, donde un primer y un segundo condensadores conectados en acoplamiento cruzado **Cc1**, **Cc2** están en paralelo con R1 y R2 respectivamente, un primer condensador no conectado en acoplamiento cruzado **Cnc1** está conectado entre los primeros terminales 1a, 3a del primer y tercer puertos, un segundo condensador no conectado en acoplamiento cruzado **Cnc2** está conectado entre los segundos terminales 1b, 3b del primer y tercer puertos. A los condensadores conectados en acoplamiento cruzado y no conectados en acoplamiento cruzado se les hace referencia en el presente documento como condensadores de aislamiento.

30 Reescribiendo la ecuación (5) para cubrir también impedancias de antena complejas:

$$Z_{iso} = -\frac{v_{TX}}{i_{RX}} = -\frac{2L}{C \cdot Z_{ant}} \quad (6)$$

35 Para verificar esto, se realiza un barrido de la impedancia de la antena pasando por los valores 100-j40 Ω, 100-j20 Ω, 100 Ω, 100+j20 Ω, 100+j40 Ω. Utilizando la ecuación (6), se calcula la impedancia de aislamiento para tener resistores conectados en acoplamiento cruzado de 100 Ω en paralelo con una reactancia de 250 Ω, 500 Ω, infinito, -500 Ω, -250 Ω. La reactancia a la frecuencia de resonancia de 2 GHz se materializa mediante condensadores no conectados en acoplamiento cruzado de 318 fF, 159 fF, 0 fF y condensadores conectados en acoplamiento cruzado de 159 fF y 318 fF, respectivamente. Como puede verse, el efecto de la reactancia de la antena se cancela mediante una capacitancia proporcional, con o sin acoplamiento cruzado según el signo de la reactancia. El valor de la resistencia es en este caso igual a la parte real de la impedancia de la antena. Por tanto, para el caso en que todos los puertos conectados al circuito combinador diferencial tienen la misma resistencia, es decir, los puertos de RX, de TX y de antena tienen la misma resistencia nominal, los resistores de aislamiento R1, R2 tienen entonces una resistencia igual a la resistencia del puerto. Sin embargo, bajo otras condiciones de funcionamiento la impedancia de la antena variará en torno al valor nominal, y a continuación los condensadores y los resistores de aislamiento se pueden ajustar para compensar la variación de la impedancia de la antena y mantener el aislamiento, de acuerdo con las ecuaciones 5 y 6.

45 La **figura 8** muestra resultados de una simulación. Como puede verse, el circuito se comporta como se esperaba y se puede compensar la reactancia de la antena. Las curvas marcadas por la forma ovalada 801 son curvas de S31 para diferentes impedancias de antena 100-j40 Ω, 100-j20 Ω, 100 Ω, 100+j20 Ω, 100+j40 Ω. Las curvas marcadas por la forma ovalada 802 son curvas de S21, y por la forma ovalada 803 son curvas de S32.

50 Hasta ahora, el circuito se ha simulado utilizando componentes pasivos ideales; la pérdida ha sido cercana en este caso a los 3 dB. En una implementación real, especialmente en un circuito integrado, los inductores tendrán pérdidas sustanciales. El factor de calidad Q de los inductores puede ser en este caso aproximadamente 10. Entonces es importante simular el circuito con dicho factor de calidad Q de los inductores para ver si se presta bien para la implementación en circuitos integrados y qué rendimiento se puede esperar. Con este fin, cada inductor se conectó con un resistor en paralelo de 1400 Ω, y un resistor en serie de 3.5 Ω, correspondiente a un Q del inductor igual a 10 a 2 GHz. Para compensar el desplazamiento de fase introducido por la parte resistiva de los inductores, los condensadores de aislamiento se calcularon utilizando un valor de desplazamiento de j10 Ω con respecto a la impedancia de la antena. A continuación se lleva a cabo el mismo barrido que en la figura 8.

La **figura 9** muestra resultados de una simulación para inductores no ideales con $Q = 10$. El valor de los condensadores de aislamiento se ha ajustado para mantener el aislamiento de pico de la señal con una frecuencia a 2 GHz. Las curvas marcadas por la forma ovalada 901 son curvas de S31 para diferentes impedancias de antena $100-j40 \Omega$, $100-j20 \Omega$, 100Ω , $100+j20 \Omega$, $100+j40 \Omega$. Las curvas marcadas por la forma ovalada 902 son curvas de S21, y por la forma ovalada 903 son curvas de S32. Como puede verse, se pierde algo de rendimiento en el aislamiento, pero se puede realizar una sintonización más precisa sobre la parte tanto real como imaginaria de la impedancia de aislamiento del circuito combinador diferencial 700, sintonizando tanto los resistores como los condensadores de aislamiento para obtener una mayor cancelación de banda estrecha. Como era de esperar, las pérdidas también han aumentado. Las pérdidas en la frecuencia central para un Q de un inductor de 10 son de aproximadamente 3.7 dB. Esto debería compararse con las pérdidas en el caso ideal, que son igual a 3 dB. Las pérdidas adicionales utilizando un inductor en chip son, por tanto, de aproximadamente 0.7 dB. También debería tenerse en cuenta que puede que resulte posible obtener valores Q superiores a 10 en un chip, dependiendo de la frecuencia, del proceso aplicado a los semiconductores y del área disponible del chip. Las pérdidas se situarán entonces entre 3 dB y 3.7 dB.

La **figura 10** muestra el resultado después de algo más de sintonización fina para aumentar el aislamiento. Aquí los condensadores del combinador diferencial 700 se han incrementado cada uno en un 9%. Los condensadores de aislamiento se han calculado con $j3 \Omega$ extra en Zant cuando se aplica la ecuación (6), y se han añadido 4Ω adicionales a los resistores de aislamiento. Las curvas marcadas por la forma ovalada 1001 son curvas de S31 para diferentes impedancias de antena $100-j40 \Omega$, $100-j20 \Omega$, 100Ω , $100+j20 \Omega$, $100+j40 \Omega$. Las curvas marcadas por la forma ovalada 1002 son curvas de S21, y por la forma ovalada 1003 son curvas de S32. Como puede verse a partir de la figura 10, es posible lograr un alto aislamiento también con inductores en chip no ideales.

Las desviaciones en la impedancia de la antena afectarán el aislamiento, ya que se ven afectadas la magnitud y fase de la corriente desde el transmisor al puerto del receptor. Para compensar esto, se puede hacer que la resistencia en el trayecto de aislamiento sea programable y se pueden usar dos conjuntos de condensadores programables, uno conectado en acoplamiento cruzado y otro sin acoplamiento cruzado. De esa manera, las cargas tanto capacitivas como inductivas se pueden gestionar con un aislamiento elevado sin usar ningún inductor adicional en el circuito combinador diferencial 100, 200, 700. Además, la frecuencia central o de resonancia del circuito combinador diferencial 100, 200, 700 también se puede sintonizar mediante el uso de inductores y condensadores programables.

Por lo tanto, según algunas realizaciones del presente documento, las resistencias del primer y segundo resistores R1, R2 pueden ser variables o programables.

La capacitancia del primer, segundo y tercer condensadores C1, C2, C3 puede ser variable o programable.

La inductancia del primer, segundo y tercer inductores L1, L2, L3 puede ser variable o programable.

El conjunto de condensadores conectados en acoplamiento cruzado Cc1, Cc2 puede ser variable o programable.

El conjunto de condensadores no conectados en acoplamiento cruzado Cnc1, Cnc2 puede ser variable o programable.

En resumen, cuando el combinador diferencial 100, 200, 700 está en funcionamiento, una señal recibida en el puerto de antena, es decir, el segundo puerto 2a, 2b, dará como resultado señales de fase opuesta en el primer puerto 1a, 1b y el tercer puerto 3a, 3b, si la frecuencia de la señal es igual a la frecuencia de resonancia del circuito combinador diferencial 100, 200, 700. Las señales resultantes en 1a y 3b estarán entonces en fase, por lo que no aparecerá ningún voltaje entre los terminales del primer resistor R1 debido a la señal recibida. De la misma manera no aparecerá ningún voltaje entre 1b y 3a ni ningún voltaje sobre la segunda resistencia R2. Por lo tanto, en este caso los resistores de aislamiento R1, R2 no tendrán ningún efecto sobre las señales. La potencia de la señal recibida se dividirá en partes iguales entre los puertos de recepción y transmisión, y la mitad de la potencia terminará en el puerto de recepción, lo que corresponde a las pérdidas habituales de 3 dB en un combinador aislante.

Cuando el transmisor inyecta una señal, en el puerto de transmisión diferencial, la señal está aislada con respecto al puerto de recepción. Esto se produce debido a una cancelación entre dos trayectos, uno a través de la estructura de LC y otro a través de los resistores. Como se ha explicado anteriormente, cuando se va a aislar el puerto de recepción, el mismo debería tener un voltaje de señal cero y, por lo tanto, puede considerarse como una tierra de referencia para las señales. A continuación se comprueban las corrientes de las señales de los dos trayectos provocadas por un voltaje en el puerto del transmisor. Con una impedancia de antena resistiva y funcionando a la frecuencia de resonancia de LC, se producirá un desplazamiento de fase cero de la transferencia desde el voltaje del puerto de transmisión a la corriente del puerto de recepción. Con los resistores conectados en acoplamiento cruzado se producirá un desplazamiento de fase de 180 grados. A continuación, seleccionando el valor de resistencia para que coincida la magnitud de las dos corrientes derivadas, se producirá una cancelación, aislándose así el puerto de recepción con respecto al transmisor en la frecuencia de resonancia. La potencia del transmisor se repartirá equitativamente entre los resistores y el puerto de antena, produciéndose unas pérdidas de 3 dB también para la transferencia de señal del transmisor a la antena.

5 El circuito combinador diferencial 100, 200, 700 se puede utilizar en un transceptor para dúplex completo o dúplex por división de frecuencia. El segundo puerto del circuito combinador diferencial 100, 200, 700 puede servir como puerto de antena acoplado a una antena. El primer puerto del circuito combinador diferencial 100, 200, 700 puede servir como puerto de recepción acoplado a un receptor y el tercer puerto del circuito combinador diferencial 100, 200, 700 puede servir como puerto de transmisión acoplado a un transmisor o viceversa.

10 El circuito combinador diferencial 100, 200, 700 puede emplearse en diversos circuitos integrados, circuitos electrónicos, dispositivos o aparatos. La **figura 11** muestra un diagrama de bloques de un dispositivo electrónico **1100**. El dispositivo electrónico 1100 comprende un transceptor **1110** que comprende el circuito combinador diferencial 100, 200, 700. El dispositivo electrónico 1100 puede comprender otras unidades, de las que se muestran una memoria **1120** y una unidad de procesamiento **1130**. El dispositivo electrónico 1100 puede ser un equipo de usuario o un dispositivo móvil, un dispositivo de comunicación inalámbrica o una estación base de radiocomunicaciones para un sistema de comunicación celular.

15 El circuito combinador diferencial 100, 200, 700 según las realizaciones del presente documento proporciona un ancho de banda amplio, evita el uso de líneas de transmisión y transformadores, y no requiere una carga ficticia con inductancia programable. A pesar de su simplicidad y bajo número de componentes, admite circuitería totalmente diferencial y proporciona un alto aislamiento entre el receptor y el transmisor. El circuito combinador diferencial es adecuado para una integración completa como aislador en chip y proporciona pérdidas adicionales bajas con inductores en chip de bajo factor de calidad. Con un aislador en chip como este, resulta factible introducir el dúplex completo o el dúplex por división de frecuencia flexible en transceptores de corto alcance y bajo coste.

20 Aquellos expertos en la técnica entenderán que el circuito combinador diferencial 100, 200, 700 según realizaciones del presente documento puede implementarse mediante cualquier tecnología de semiconductores, por ejemplo tecnología bipolar, NMOS, PMOS, CMOS o de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS), etc.

25 La palabra "comprende" o "comprendiendo", cuando se utiliza en el presente documento, se interpretará como no limitativa, es decir, con el significado de "consta al menos de".

REIVINDICACIONES

1. Un circuito combinador diferencial (200, 700) que comprende:
 - un primer puerto que tiene un primer terminal (1a) y un segundo terminal (1b);
 - un segundo puerto que tiene un primer terminal (2a) y un segundo terminal (2b);
 - 5 un tercer puerto que tiene un primer terminal (3a) y un segundo terminal (3b);
 - un primer subcircuito que comprende un primer inductor (L1) conectado entre los primeros terminales (1a, 2a) del primer y segundo puertos, y un primer condensador (C1) conectado entre los primeros terminales (2a, 3a) del segundo y tercer puertos;
 - 10 un segundo subcircuito que comprende un segundo inductor (L2) conectado entre los segundos terminales (1b, 2b) del primer y segundo puertos, y un segundo condensador (C2) conectado entre los segundos terminales (2b, 3b) del segundo y tercer puertos;
 - un tercer condensador (C3) conectado entre el primer y segundo terminales (1a, 1b) del primer puerto,
 - un tercer inductor (L3) conectado entre el primer y segundo terminales (3a, 3b) del tercer puerto;
 - 15 un primer resistor (R1) conectado entre el primer terminal (1a) del primer puerto y el segundo terminal (3b) del tercer puerto; y
 - un segundo resistor (R2) conectado entre el segundo terminal (1b) del primer puerto y el primer terminal (3a) del tercer puerto.
2. El circuito combinador diferencial (200, 700) según la reivindicación 1, en el que resistencias del primer y segundo resistores son variables o programables.
- 20 3. El circuito combinador diferencial (200, 700) según cualquiera de las reivindicaciones 1-2, en el que la capacitancia del primer, segundo y tercer condensadores es variable o programable.
4. El circuito combinador diferencial (200, 700) según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en el que la inductancia del primer, segundo y tercer inductores es variable o programable.
- 25 5. El circuito combinador diferencial (200, 700) según una cualquiera de las reivindicaciones 1-4, que comprende además un conjunto de condensadores variables o programables (Cc1, Cc2) en paralelo con el primer y segundo resistores.
6. El circuito combinador diferencial (200, 700) según una cualquiera de las reivindicaciones 1-5, que comprende además un conjunto de condensadores variables o programables (Cnc1, Cnc2), uno entre el primer terminal (1a) del primer puerto y el primer terminal (3a) del tercer puerto, y otro entre el segundo terminal (1b) del primer puerto y el segundo terminal (3b) del tercer puerto.
- 30 7. Un transceptor (1110) para dúplex completo o dúplex por división de frecuencia, que comprende un circuito combinador diferencial (100, 200, 700) según una cualquiera de las reivindicaciones 1-6, y en el que
 - el segundo puerto del circuito combinador diferencial sirve como puerto de antena acoplado a una antena; y
 - el primer puerto del circuito combinador diferencial sirve como puerto de recepción acoplado a un receptor y el tercer puerto del circuito combinador diferencial sirve como puerto de transmisión acoplado a un transmisor o viceversa.
 - 35
8. Un dispositivo (1100) de comunicación que comprende un transceptor (1110) según la reivindicación 7.

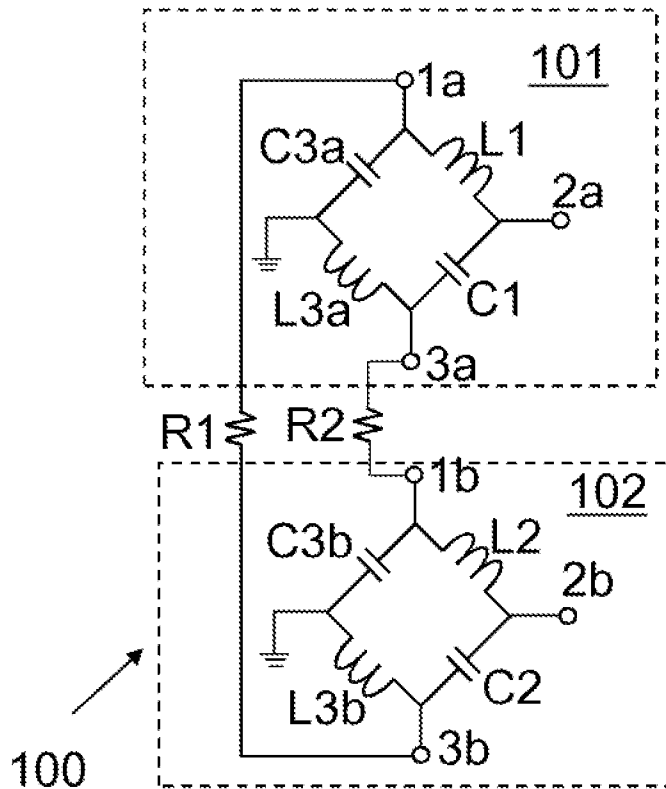


Fig. 1

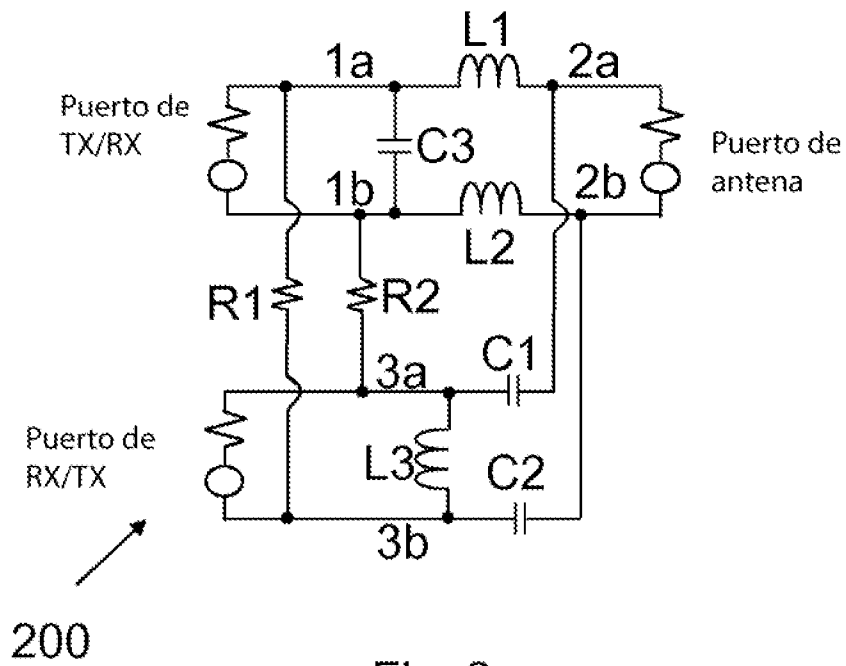


Fig. 2

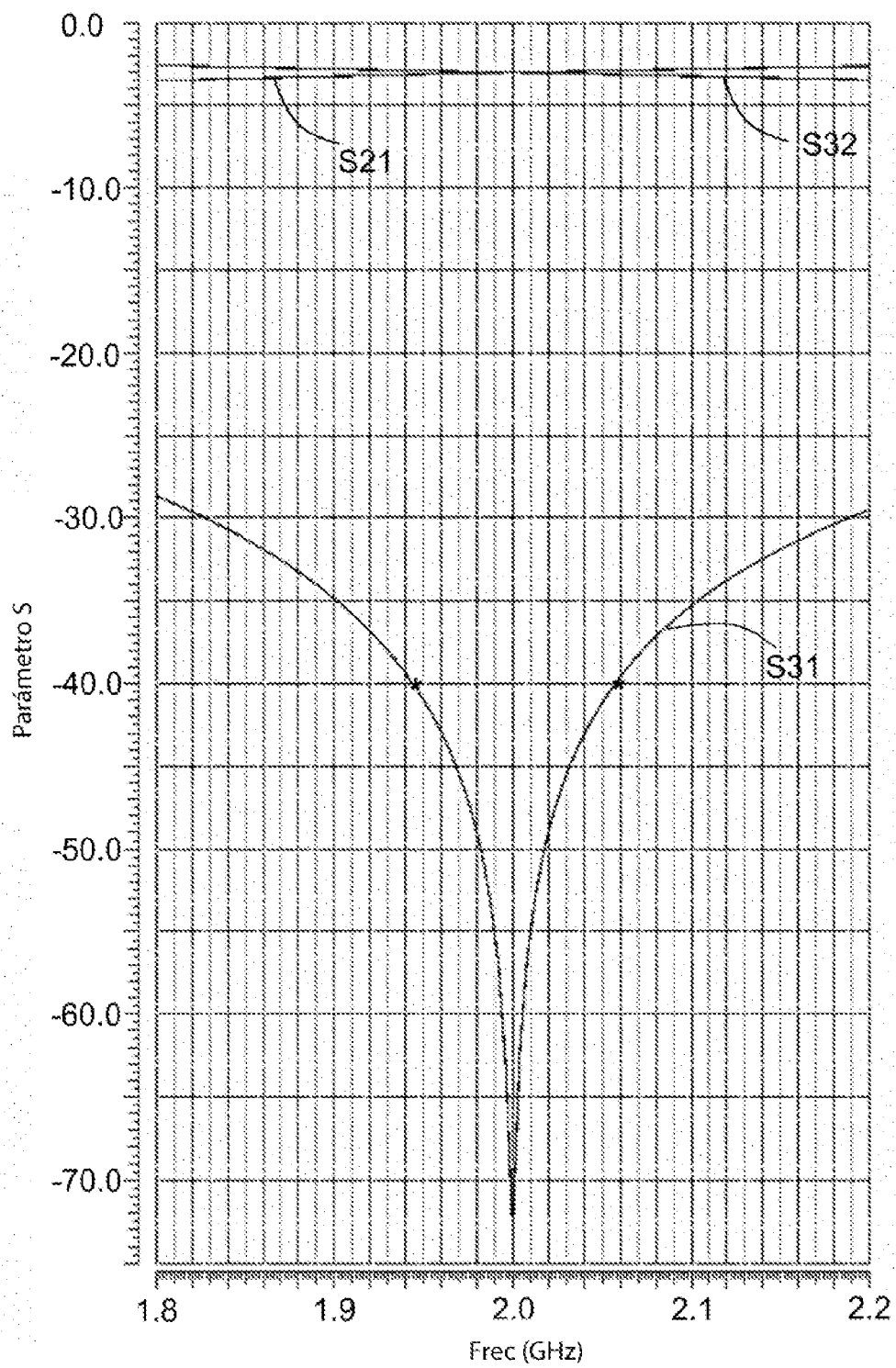


Fig. 3

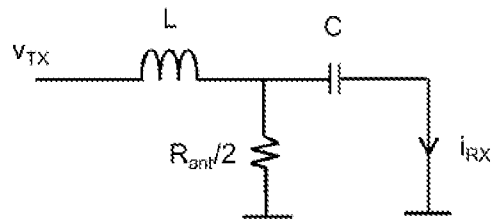


Fig. 4

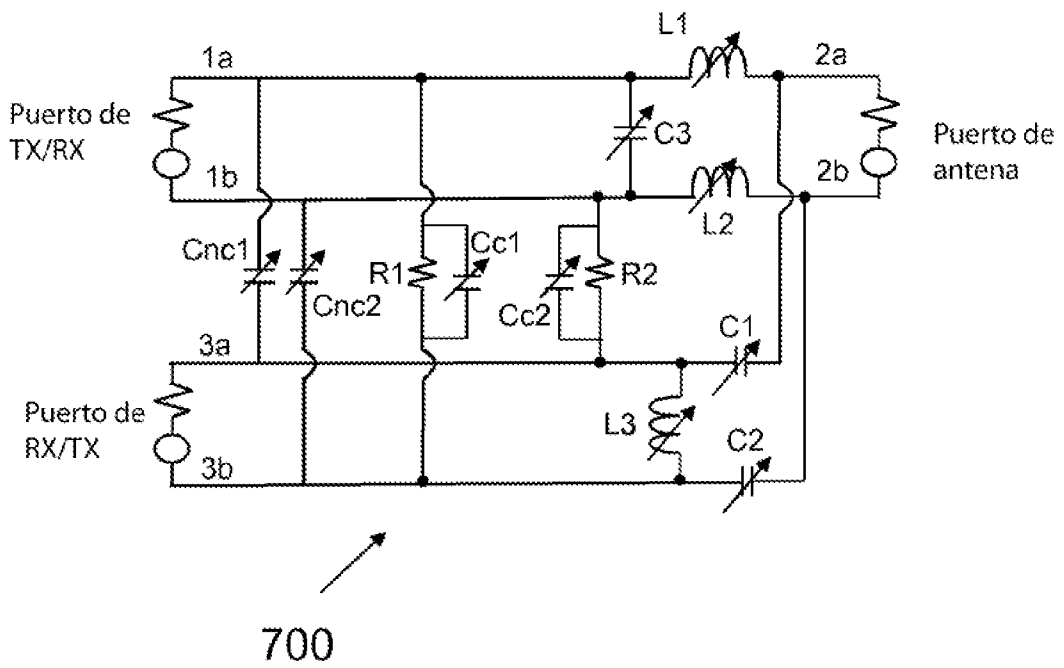


Fig. 7

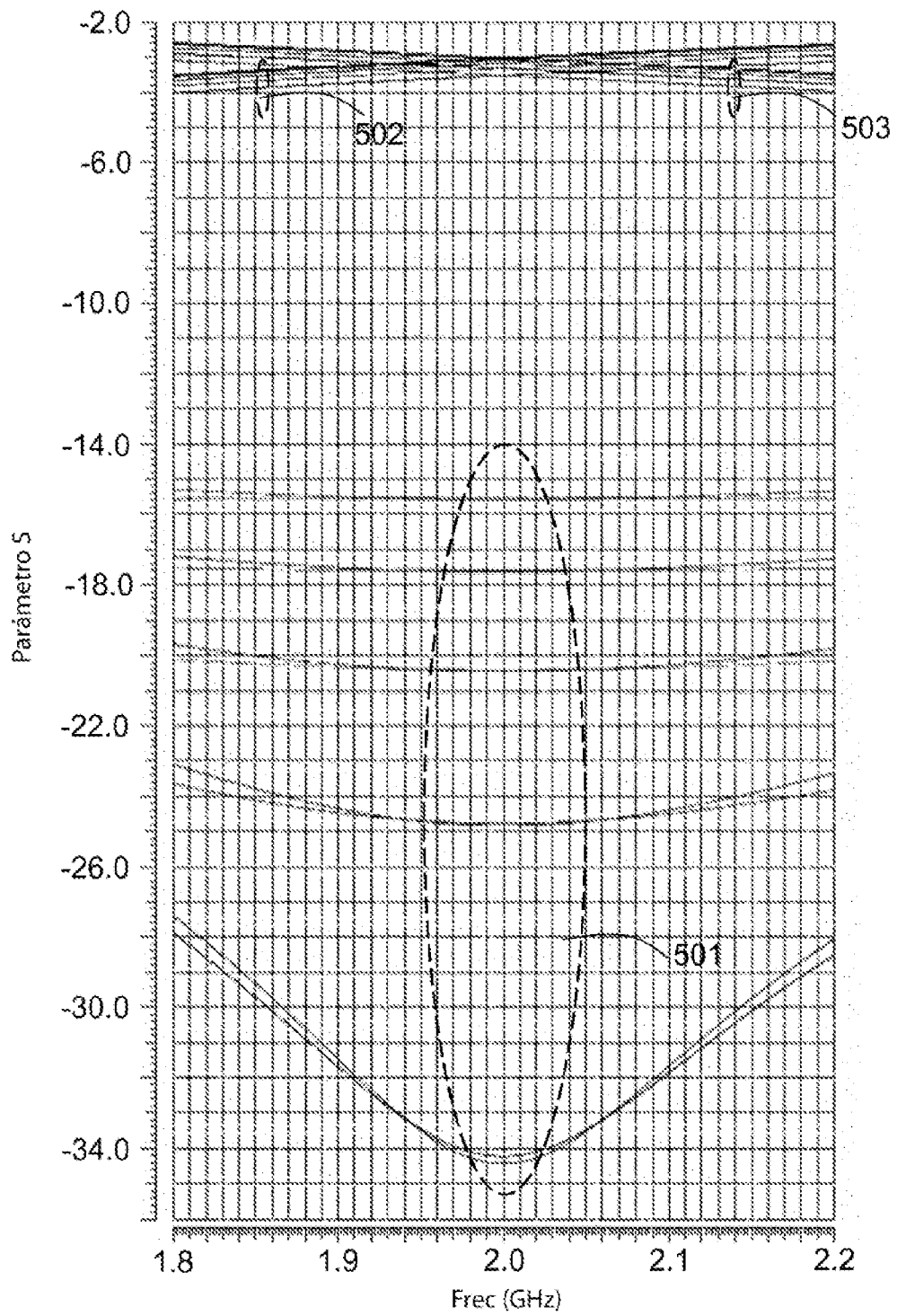


Fig. 5

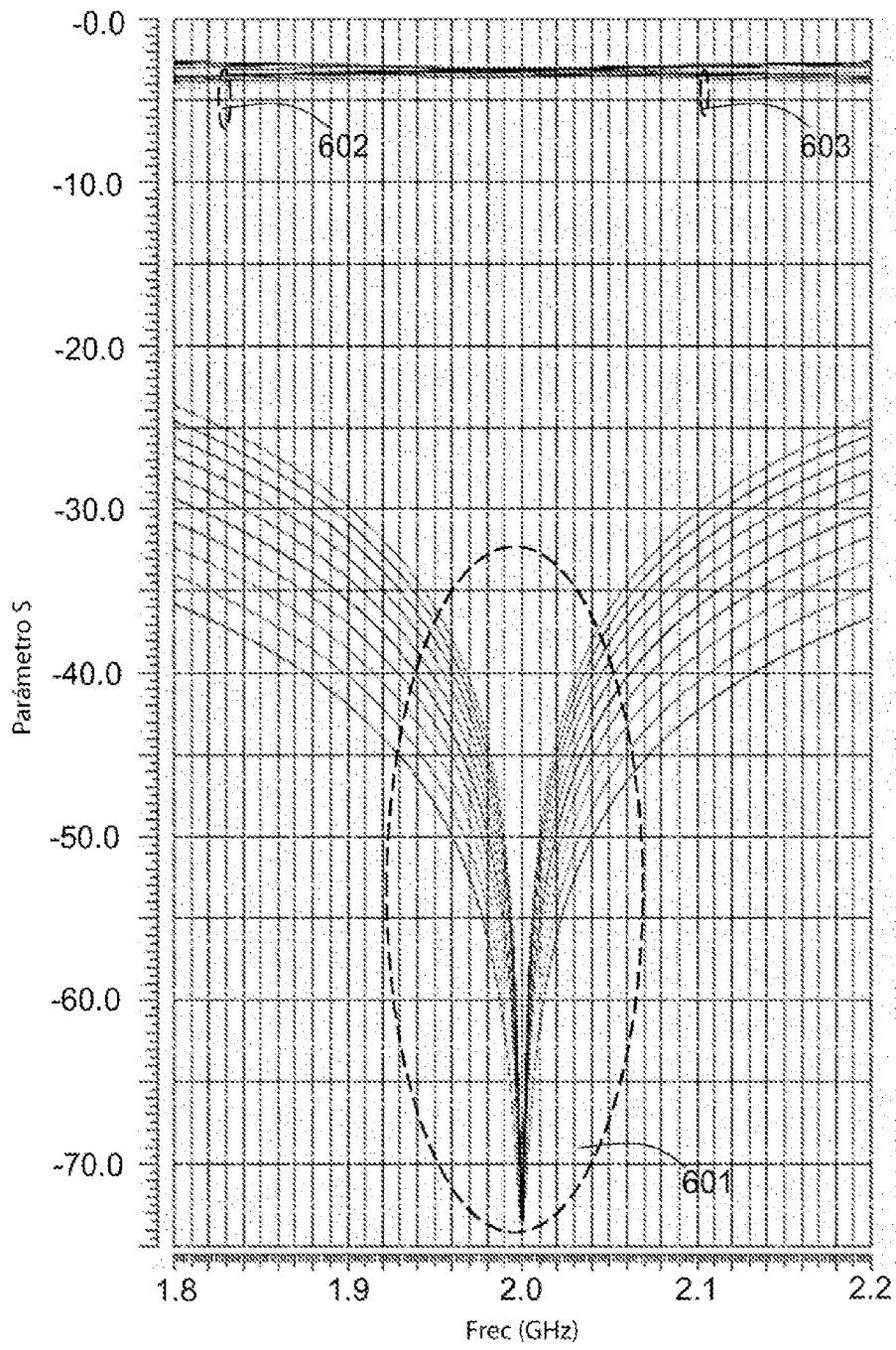


Fig. 6

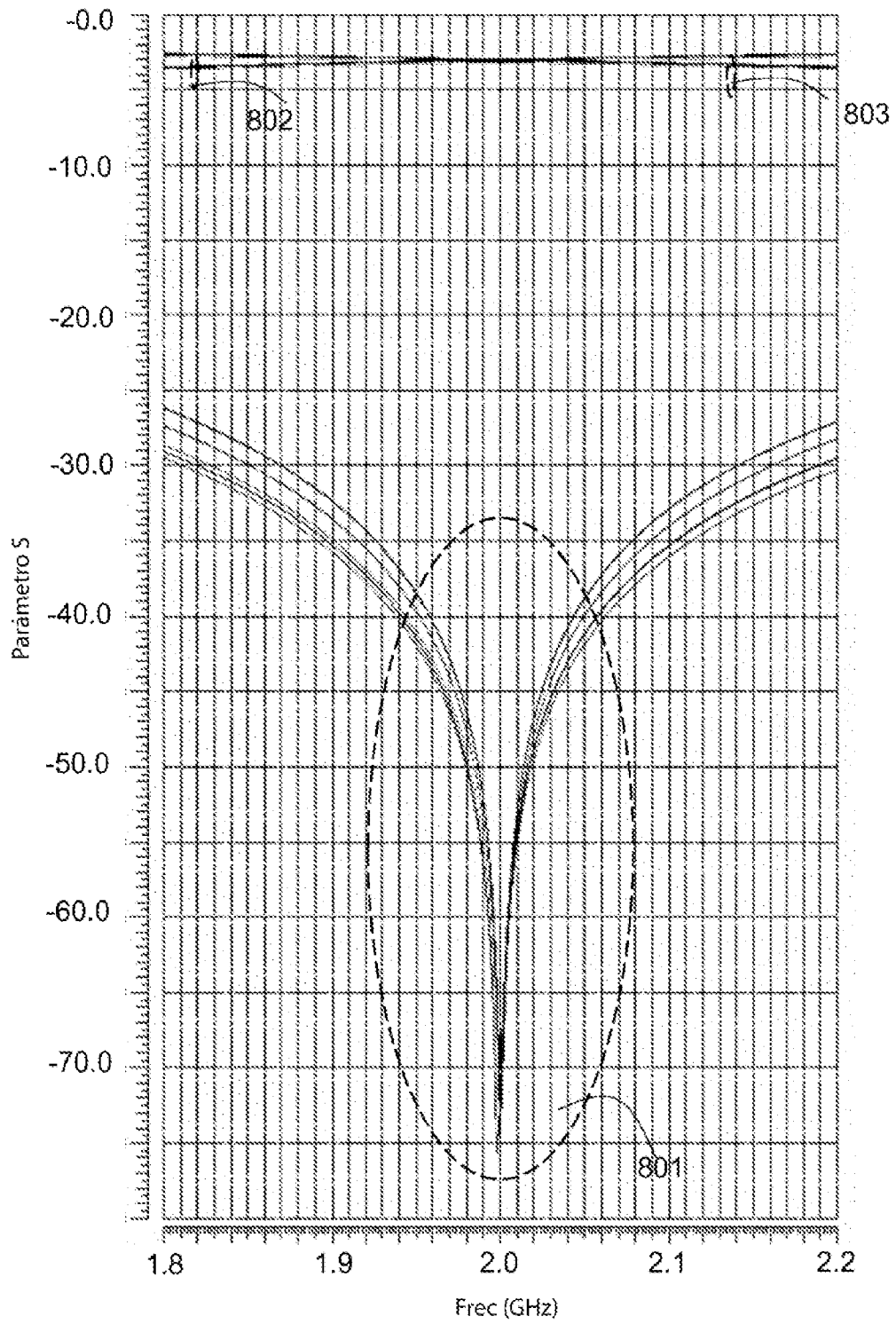


Fig. 8

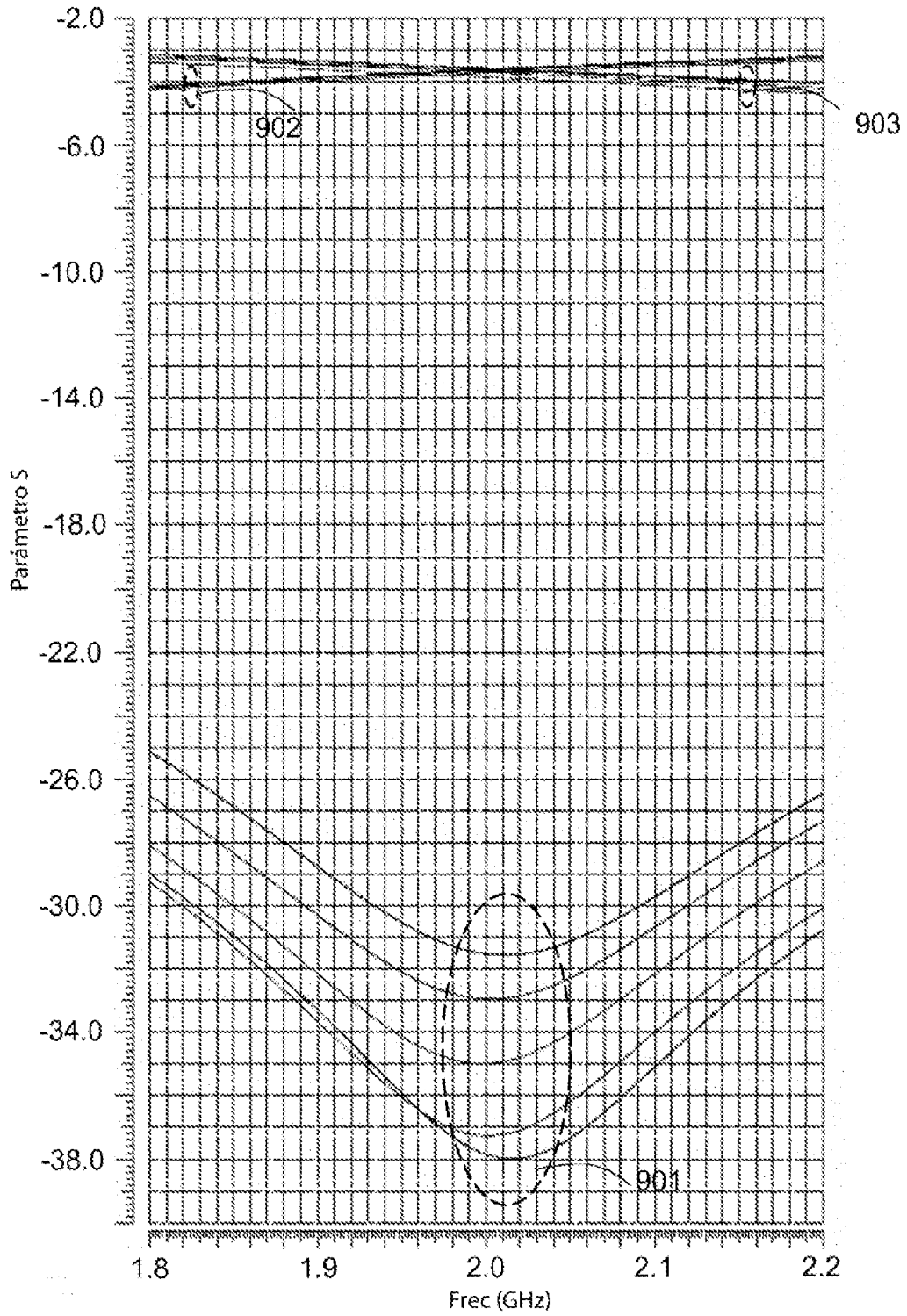


Fig. 9

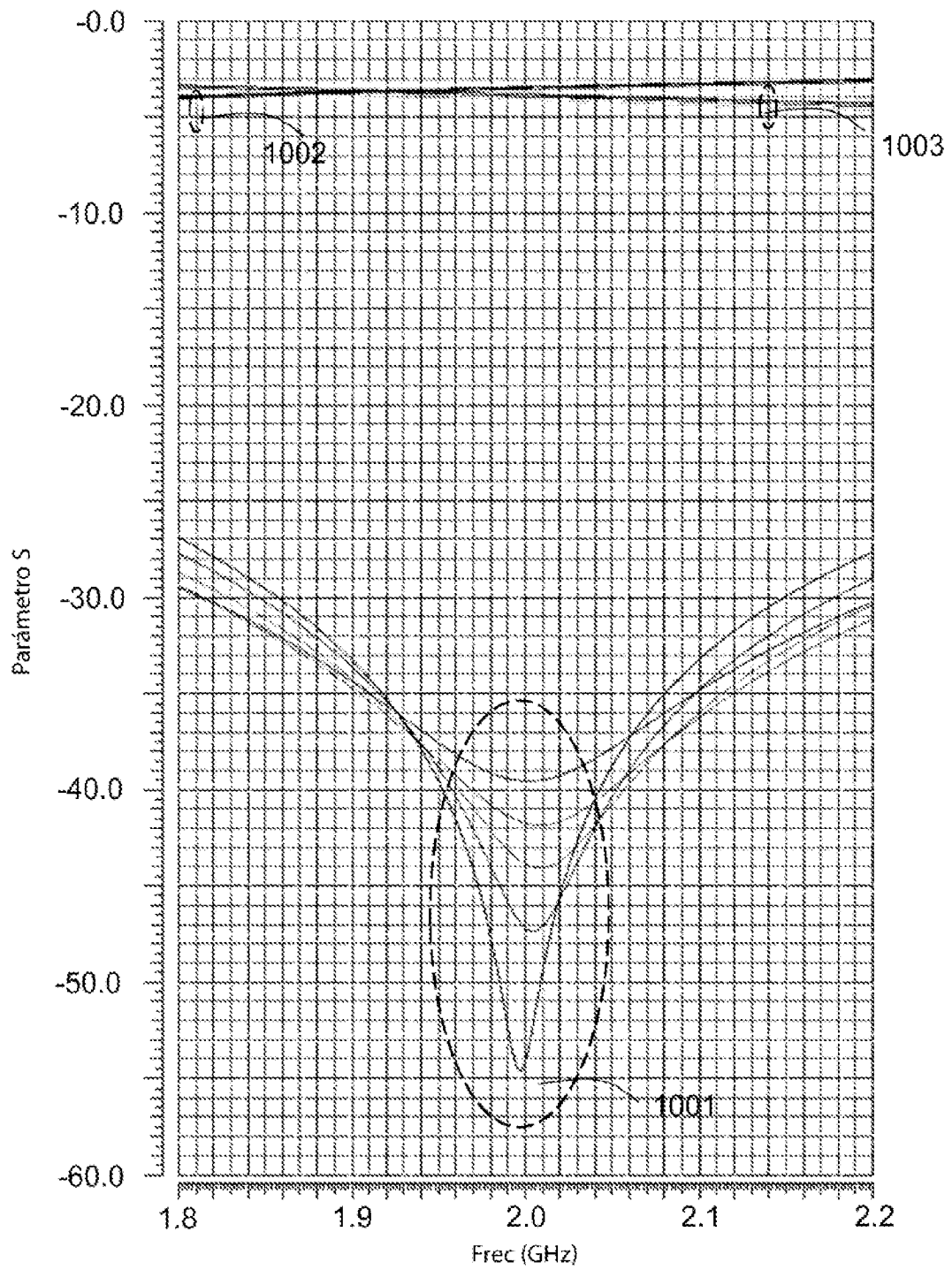


Fig. 10

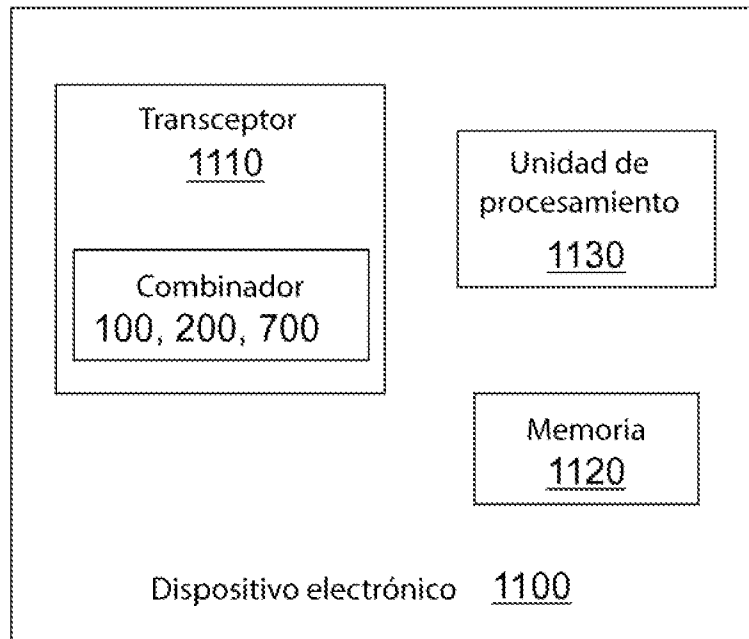


Fig. 11