

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 593 623**

51 Int. Cl.:

**H03F 3/189** (2006.01)  
**H03F 3/20** (2006.01)  
**H03F 3/68** (2006.01)  
**H03F 3/60** (2006.01)  
**H04B 1/04** (2006.01)  
**H03F 3/21** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.04.2014** E 14166625 (5)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.06.2016** EP 2800271

54 Título: **Procedimiento de calibración de un amplificador multipuerto, amplificador multipuerto que permite la implementación de un procedimiento de ese tipo y satélite que comprende un amplificador de ese tipo**

30 Prioridad:

**03.05.2013 FR 1301031**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**12.12.2016**

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)**  
**45, rue de Villiers**  
**92200 Neuilly Sur Seine, FR**

72 Inventor/es:

**MOREAU, PIERRE-HENRY**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 593 623 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

Procedimiento de calibración de un amplificador multipuerto, amplificador multipuerto que permite la implementación de un procedimiento de ese tipo y satélite que comprende un amplificador de ese tipo

5 La invención se refiere a un procedimiento de calibración de un amplificador multipuerto, que permita maximizar el aislamiento entre sus salidas. La invención se refiere igualmente a un amplificador multipuerto que comprende unos medios de implementación de un procedimiento de ese tipo, así como a un satélite, principalmente para telecomunicaciones, cuya carga útil comprende un amplificador de ese tipo.

La invención se aplica principalmente al campo de las telecomunicaciones, y particularmente a unas telecomunicaciones espaciales.

10 Los amplificadores multipuerto (MPA del inglés "MultiPort Amplifiers") son unos sistemas utilizados principalmente en las cargas útiles de los satélites de telecomunicaciones para amplificar una pluralidad de señales de radiofrecuencias o de microondas, por ejemplo para realizar unos transpondedores de banda ancha. El principio de funcionamiento de un MPA consiste en utilizar varios amplificadores para amplificar simultáneamente todas las señales. Todos los amplificadores, o al menos varios de entre ellos, contribuyen a la amplificación de todas las  
15 señales; esto permite una asignación flexible de la potencia y de la banda, mientras se asegura una utilización óptima de los amplificadores. Este principio de funcionamiento, conocido en sí mismo, se ilustra en la figura 1 que representa esquemáticamente un amplificador multipuerto que presenta cuatro puertos de entrada PE1 - PE4, por los cuales entran cuatro señales de radiofrecuencias  $s_1 - s_4$ , y cuatro puertos de salida PS1 - PS4, por los que salen las señales amplificadas  $S_1 - S_4$ . Los puertos de entrada están unidos a las entradas  $i_{i1} - i_{i4}$  de una matriz de distribución, o matriz de entrada IBM, que presenta un mismo número de salidas  $o_{i1} - o_{i4}$ . Esta matriz se configura de tal manera que la señal  $s_i$  (por ejemplo  $s_1$ , representada mediante un vector de orientación vertical) presente en una entrada (en este caso,  $i_{i1}$ ) se reparta en todas sus salidas con un desfase diferente (indicado por el cambio de orientación de los vectores). De ese modo, por ejemplo, la señal  $s_1$  se encuentra sin desfase en la salida  $o_{i1}$ , con un desfase de  $90^\circ$  en las salidas  $o_{i2}$  y  $o_{i3}$  y un desfase de  $180^\circ$  en la salida  $o_{i4}$ . Esto es de aplicación igualmente, con unos desfases diferentes, para las señales  $s_2 - s_4$  (no representadas). Este modo de funcionamiento corresponde a una matriz "de Butler", conocida en sí misma.

Las señales procedentes de las salidas  $o_{i1} - o_{i4}$ , que son por tanto unas combinaciones lineales de las señales de entrada  $s_1 - s_4$ , se amplifican mediante unos amplificadores de potencia idénticos PA1 - PA4, que pueden ser, por ejemplo, del tipo de tubo de onda progresiva (TWTA, del inglés "Travelling Wave Tube Amplifier") o de semiconductores. Las señales amplificadas se aplican a las entradas  $i_{o1} - i_{o4}$  de una matriz de combinación, o de salida OBM, que realiza una operación análoga a la de la matriz de distribución; en el caso de la figura 1, OBM es igualmente una matriz de Butler.

Se puede ver en la figura 1 que, si los desfases introducidos por las dos matrices se eligen de manera oportuna, los vectores representativos de la señal  $s_1$  amplificada se anulan en las salidas  $o_{o2} - o_{o4}$ , y se combinan en la única salida  $o_{o1}$ . Igualmente, los vectores representativos de la señal  $s_2$  amplificada se anulan en las salidas  $o_{o1}$ ,  $o_{o3}$  y  $o_{o4}$ , y se combinan de manera constructiva en la única salida  $o_{o2}$ , y así sucesivamente. De ese modo, la señal amplificada  $S_i$ , procedente del puerto de salida  $P_i$ , corresponde a la señal de entrada  $s_i$  amplificada, sin ninguna contribución de las otras señales de entrada  $s_j$  siendo  $j \neq i$  ( $i, j = 1 - 4$ ).

Este funcionamiento presupone unas matrices de entrada y de salida ideales y unos amplificadores de potencia con unas propiedades rigurosamente idénticas. En realidad, este no es el caso: los desfases introducidos por las matrices pueden ser diferentes a los nominales, la potencia de las señales de entrada pueden estar desigualmente repartidas entre las salidas, los amplificadores pueden presentar unas ganancias y unas fases diferentes, etc. Además, las propiedades de diferentes elementos pueden derivar a lo largo del tiempo. A causa de estas diferencias con relación a una situación ideal, el aislamiento entre las diferentes salidas del amplificador multipuerto no es perfecto; esto significa que en cada puerto de salida  $P_{Si}$  se encontrarán unos términos de interferencia correspondientes a las señales de entrada  $s_j$ , siendo  $j \neq i$ .

La figura 2A muestra los espectros de las señales de salida en el caso de un MPA perfectamente equilibrado (los modelos de las matrices de Butler son perfectos); las densidades espectrales de potencia se expresan en dBm y las frecuencias ( $f$ ) en GHz. Se puede remarcar que cada señal de salida  $S_i$  —que es una versión amplificada de una señal de entrada  $s_i$  correspondiente— presenta una banda de aproximadamente 50 MHz de ancho y una frecuencia central (frecuencia de la portadora) diferente, de tal manera que las bandas de las diferentes señales no se solapan: se habla entonces de "plan de frecuencias disjuntas". Se puede ver que el aislamiento es prácticamente perfecto (nivel de interferencia inferior a -43 dB), porque las interferencias entre las señales son invisibles al ojo desnudo. El aislamiento se define como la diferencia (en decibelios) de las potencias integradas en la banda de la señal de referencia (en el caso presente, 50 MHz).

La figura 2B muestra los espectros obtenidos introduciendo unos desequilibrios aleatorios definidos por unas distribuciones gaussianas de los errores de amplitud y de fase con  $\sigma_A$  (diferencia tipo del error de amplitud) = 0,8 dB y  $\sigma_\phi$  (diferencia tipo del error de fase) =  $3^\circ$ ; los modelos de las matrices de Butler son "reales" (procedentes de

medidas). Las interferencias entre las señales son claramente visibles, y un cálculo permite determinar que el nivel de interferencia es del orden de -22 dB.

La gráfica de la figura 2C muestra cómo los desequilibrios en fase ( $\Delta\Phi$ , en grados "°") y en amplitud ( $\Delta A$ , en dB) afectan al aislamiento IS (en dB) entre dos salidas de un amplificador multipuerto.

5 Para solucionar estos desequilibrios, el amplificador de la figura 1 comprende unos elementos de ponderación EP1 - EP4, constituidos cada uno por un atenuador (más raramente un preamplificador) y desfasador ajustables conectados en cascada, asociados a unos amplificadores respectivos y generalmente conectados aguas arriba de estos últimos. Como solo importan las atenuaciones y desfase relativos entre las salidas, uno de los elementos de ponderación puede opcionalmente omitirse.

10 Ajustando de manera oportuna los pesos complejos introducidos por estos elementos de ponderación es posible restaurar un aislamiento casi ideal —y en cualquier caso superior a 20 dB o más— entre las salidas. La operación de calibrado que consiste en ajustar estos pesos complejos puede realizarse de manera manual por un técnico o, preferentemente, de manera automática.

15 El documento WO 2008/135753 describe un procedimiento automático de calibración de un amplificador multipuerto que se dirige a maximizar el aislamiento entre las salidas, utilizando una señal de medida o de ensayo inyectada en una entrada. El principal inconveniente de este procedimiento es que la señal inyectada se amplifica y, en un sistema de telecomunicaciones, deteriora la relación señal sobre interferencia C/I.

20 El artículo de Mario Caron y Xiping Huang "Estimation and compensation of amplifier gain and phase mismatches in a multiple port amplifier subsystem", ESA Workshop on Advanced Flexible Telecom Payloads 18 - 20 de noviembre de 2008, Noordwijk (Holanda), divulga un procedimiento automático de calibración de un amplificador multipuerto que no necesita la inyección de una señal de medida. Este procedimiento se basa en el estudio de las funciones de densidad de probabilidad de las señales de salida para identificar, y minimizar, las interferencias entre salidas. Esto no es posible más que si se conoce con precisión el tipo de modulación utilizado, lo que limita la flexibilidad de la solución.

25 El documento US 2012/0319772 divulga un proceso de calibración de un amplificador multipuerto que se dirige a minimizar la intercorrelación entre las señales de salida. La implementación de un procedimiento de ese tipo parece compleja y sensible a las fluctuaciones temporales de las señales.

30 La invención se dirige a procurar un procedimiento automático de calibración de un amplificador multipuerto que se dirige a maximizar el aislamiento entre las salidas, que no presente, o presente en una forma atenuada, los inconvenientes de la técnica anterior. Más particularmente, la invención se dirige a evitar la inyección de una señal de medida o de calibración que se encontraría superpuesta a las señales de tráfico, y a no introducir limitación relativa al tipo de modulación empleado.

35 Un objeto de la invención que permite alcanzar este objetivo es un procedimiento de calibración de un amplificador multipuerto que incluye una pluralidad de puertos de entrada, una pluralidad de amplificadores de potencia unidos a dichos puertos de entrada por medio de una matriz de distribución de señales y una pluralidad de puertos de salida unidos a dichos amplificadores de potencia por medio de una matriz de recombinación de señales, estando adaptadas dichas matrices de distribución y de recombinación de señales para repartir una señal presente en un denominado puerto de entrada entre una pluralidad de dichos amplificadores de potencia y para recombinar dicha señal, amplificada, a la altura de un denominado puerto de salida, estando asociado un elemento de ponderación de las señales a cada denominado amplificador de potencia; estando el procedimiento caracterizado porque incluye las etapas que consisten en:

45 a) determinar una intercorrelación media normalizada entre una señal de salida presente en un denominado puerto de salida, tomado como referencia, y las señales presentes en los otros denominados puertos de salida; y  
b) ajustar iterativamente unos pesos de dichos elementos de ponderación de manera que se minimice dicha intercorrelación media normalizada o se la convierta en inferior a un umbral predeterminado.

Según unos modos de realización particulares de un procedimiento de ese tipo:

- Dicha intercorrelación media normalizada puede normalizarse con relación a una autocorrelación media de la señal presente en dicho puerto de salida tomado como referencia.
- El puerto de salida tomado como referencia puede ser el que presenta la señal que tiene el nivel de potencia más elevado.
- Dichos pesos pueden ser unos pesos complejos, incluyendo cada uno un módulo y una fase, comprendiendo dicha etapa b) las subetapas que consisten en:

- b1) ajustar iterativamente las fases de dichos pesos; y
- b2) ajustar iterativamente los módulos de dichos pesos.

Más particularmente, dichas subetapas b1) y b2) pueden implementarse sucesivamente, en un orden arbitrario; dicha subetapa b1) puede incluir el ajuste sucesivo de las fases de los pesos de los elementos de ponderación asociados a los diferentes amplificadores de potencia, y dicha subetapa b2) puede incluir el ajuste sucesivo de los módulos de los pesos de los elementos de ponderación asociados a los diferentes amplificadores de potencia.

- 5 - Dicha etapa b) puede incluir las operaciones siguientes:
- i. determinar dicha intercorrelación media normalizada;
  - ii. aplicar un incremento predefinido al módulo y/o a la fase de un denominado peso a ajustar;
  - iii. determinar de nuevo dicha intercorrelación media normalizada y, si su valor ha aumentado, cambiar el signo de dicho incremento; y
  - 10 iv. aplicar dicho incremento predefinido a la fase y/o al módulo de dicho peso a ajustar, con el signo determinado durante la operación iii;
  - v. determinar de nuevo dicha intercorrelación media normalizada y, si su valor ha disminuido en tanto que permanece superior a un umbral predefinido, repetir las operaciones iv. y v.
- 15 - Dichas correlaciones medias normalizadas pueden determinarse en el interior de una banda de frecuencia sustancialmente coincidente con la de la señal presente en dicho puerto de referencia.
- Las señales presentes en dichos puertos de salida pueden presentar un plan de frecuencia disjunto.
- Preferentemente, no se inyecta ninguna señal de medida en dicho amplificador con el fin de realizar la calibración.

20 Otro objeto de la invención es un amplificador multipuerto que incluye una pluralidad de puertos de entrada, una pluralidad de amplificadores de potencia unidos a dichos puertos de entrada por medio de una matriz de distribución de señales y una pluralidad de puertos de salida unidos a dichos amplificadores de potencia por medio de una matriz de recombinación de señales, estando adaptadas dichas matrices de distribución y de recombinación de señales para repartir una señal presente en un denominado puerto de entrada entre una pluralidad de dichos amplificadores de potencia y para recombinar dicha señal, amplificada, a la altura de un denominado puerto de salida, estando

25 asociado un elemento de ponderación de las señales a cada denominado amplificador de potencia; caracterizado porque comprende igualmente un módulo de calibración configurado o programado para implementar un procedimiento de calibración tal como se ha expuesto en el presente documento anteriormente.

Según uno de los modos de realización particulares de un amplificador multipuerto de ese tipo:

- 30 - Dicho módulo de calibración puede comprender: un primer y un segundo selectores para seleccionar un primer y un segundo puertos de salida; una primera y una segunda cadenas de adquisición de las señales presentes en dichos primer y segundo puertos de salida, para seleccionar, convertir a una frecuencia intermedia, filtrar y digitalizar dichas señales; y un procesador programado o configurado para: controlar dichos primer y segundo selectores y dichas primera y segunda cadenas de adquisición; adquirir las señales digitalizadas procedentes de dichas cadenas de adquisición; a partir de las señales digitalizadas adquiridas, calcular una intercorrelación
- 35 media normalizada entre una señal de salida adquirida desde un puerto de salida, tomado como referencia, y las señales adquiridas desde los otros puertos de salida; ajustar iterativamente los pesos de dichos elementos de ponderación para minimizar dicha intercorrelación media normalizada o hacerla inferior a un umbral predeterminado.
- Dicho procesador puede ser derivado en su totalidad o en parte.
- 40 - Cada uno de dichos elementos de ponderación puede comprender un atenuador variable y un desfaseador variable conectados en cascada.
- El amplificador puede, preferentemente, operar en al menos una banda elegida entre la banda Ku, la banda K y la banda Ka. De hecho, la invención es tanto más útil cuanto más elevada sea la frecuencia de las portadoras, así como cuando los amplificadores de potencia son unos tubos de onda progresiva. De ese modo, la banda Ka
- 45 constituye un campo privilegiado de aplicación de la invención.

Otro objeto más de la invención es un satélite para telecomunicaciones cuya carga útil comprende un amplificador multipuerto tal como se ha expuesto en el presente documento anteriormente.

Surgirán otras características, detalles y ventajas de la invención con la lectura de la descripción realizada en referencia a los dibujos adjuntos dados a título de ejemplo y que representan, respectivamente:

- 50 - la figura 3, un esquema de principio de un amplificador multipuerto según un modo de realización de la invención;
- la figura 4, un organigrama del procedimiento de ajuste de los pesos complejos de los elementos de ponderación que permiten maximizar el aislamiento entre las salidas del amplificador de la figura 3;
- las figuras 5A y 5B unos espectros de las salidas del amplificador de la figura 3 que ilustran el resultado técnico de la invención; y
- 55 - la figura 6, esquemáticamente, la integración de un amplificador multipuerto según un modo de realización de la invención en un satélite de telecomunicaciones.

Como se ha ilustrado en la figura 3, un MPA según un modo de realización de la invención se diferencia del de la figura 1 en que comprende un módulo de calibración MC que recibe en la entrada una fracción de las señales S1 -

S4 presentes en los puertos de salida —extraídas mediante unos acopladores de señales CS1 a CS4— y genera unas señales de control de los elementos de ponderación EP1 - EP4. Más precisamente, en el modo de realización considerado en este caso, cada elemento de ponderación comprende un atenuador variable AV<sub>i</sub> que recibe una señal de control A<sub>i</sub> y un desfasador variable ΦV<sub>i</sub> que recibe una señal de control Φ<sub>i</sub> (i = 1 - 4).

5 Dos selectores SP1, SP2 seleccionan independientemente un puerto de salida cada uno (más precisamente: selecciona cada uno una señal extraída mediante un acoplador de señal en un puerto de salida). Las señales seleccionadas se tratan mediante unas cadenas de adquisición respectivas, CAS1, CAS2 que comprenden, clásicamente, un filtro imagen H<sub>i</sub>, un mezclador para convertir las señales a una frecuencia intermedia, un filtro de Nyquist H<sub>n</sub> y un convertidor analógico/digital ADC. Las señales digitales así obtenidas se tratan mediante un  
10 procesador DSP para generar las señales de control A1 - A4, Φ1 - Φ4. El procesador DSP controla igualmente los selectores SP1, SP2 y el sintetizador de frecuencia local SFL, utilizado para la conversión de frecuencia.

El procesador DSP es preferentemente un procesador digital —y principalmente un procesador para tratamiento digital de señales— programado de manera oportuna, pero se pueden contemplar otras posibilidades (por ejemplo, la realización de un circuito digital dedicado).

15 Según un modo de realización particular de la invención, la calibración del amplificador multipuerto se realiza de la manera siguiente.

Primeramente, el procesador DSP identifica al puerto de salida correspondiente a la señal que presenta la potencia más elevada. Esta selección se efectúa barriendo las salidas por medio de uno de los selectores e integrando la potencia de las señales adquiridas en la banda de Nyquist (o en una banda más estrecha, seleccionada mediante un  
20 filtro preferentemente digital). Esto precisa de conocer el plan de frecuencias con el fin de regular el sintetizador de frecuencia local SFL a la frecuencia central de cada salida. El puerto de salida así identificado —en lo que sigue, PS1— es tomado como referencia.

A continuación, el primer selector SP1 es controlado para seleccionar, en una ventana temporal predefinida, dicho puerto de referencia, mientras que el segundo selector SP2 es controlado para seleccionar, en una misma ventana  
25 temporal, otro puerto de salida. Esta operación se repite para todos los puertos de salida. Se obtienen así tres pares de señales adquiridas y digitalizadas (S1<sub>(2)</sub>, S2); (S1<sub>(3)</sub>, S3), (S1<sub>(4)</sub>, S4), en la que S1<sub>(i)</sub> identifica la señal S1 adquirida simultáneamente con S<sub>i</sub>, siendo i = 2 - 4. Esto permite el cálculo, mediante el procesador DSP, de las correlaciones cruzadas, o intercorrelaciones, entre las señales S1<sub>(i)</sub> y S<sub>i</sub> siendo i = 2 - 4, cuyos máximos están indicados por R<sub>11</sub>, R<sub>12</sub>, R<sub>13</sub> y R<sub>14</sub>. Se calculan igualmente las potencias de las señales S1<sub>(i)</sub>, que se indican por P<sub>1(Ta11)</sub>; de ese modo  
30 P<sub>1(Ta12)</sub> es la potencia de la señal S1<sub>(2)</sub> extraída por el puerto PS1 durante la adquisición sincrónica de las señales S1 y S2; P<sub>1(Ta13)</sub> es la potencia de la señal S1<sub>(2)</sub> extraída por el puerto PS1 durante la adquisición sincrónica de las señales S1 y S3 y P<sub>1(Ta14)</sub> es la potencia de la señal S1<sub>(2)</sub> extraída por el puerto PS1 durante la adquisición sincrónica de las señales S1 y S4.

Esto permite el cálculo de una intercorrelación media normalizada:

$$35 \quad C_{(0)} = \frac{R_{12}}{P_{1(Ta12)}} + \frac{R_{13}}{P_{1(Ta13)}} + \frac{R_{14}}{P_{1(Ta14)}}$$

La generalización al caso de N puertos, siendo N un entero superior 1 —y generalmente par— es inmediata.

El índice (0) significa que se trata de la intercorrelación media normalizada determinada antes de la primera iteración del proceso de ajuste de los coeficientes de ponderación, como se explicará más adelante.

40 Preferentemente, las intercorrelaciones se calculan teniendo en cuenta solamente la banda de la señal presente en el puerto de referencia. De ese modo, el procesador DSP controla el sintetizador de frecuencia local SFL de manera que seleccione la portadora de la señal s1; el filtrado de esta señal se asegura mediante el muestreo: sin embargo, si la banda es más estrecha que la banda de Nyquist, puede preverse un filtrado adicional —preferentemente digital, mediante el procesador DSP—.

Un principio en la base de la invención consiste en ajustar iterativamente los pesos complejos de los elementos de ponderación EP1 - EP4 de manera que se minimice la intercorrelación media normalizada, o al menos se asegure que es inferior a un umbral predefinido. En efecto, cuanto más elevada sea la intercorrelación media normalizada, menos aisladas entre sí estarán las salidas del amplificador multipuerto.

Pueden utilizarse varios algoritmos de optimización para realizar este ajuste iterativo.

50 Uno de entre ellos se describirá en el presente documento a continuación con la ayuda de la figura 4. El principio de este algoritmo consiste en incrementar la fase del peso de un elemento de ponderación en un paso predefinido (positivo o negativo), determinar si esto conduce a una disminución de la intercorrelación media normalizada y: en caso afirmativo, aplicar un nuevo incremento; en caso contrario, cambiar su signo antes de aplicarle de nuevo. Después de haber ajustado de esta manera las fases de todos los elementos de ponderación, se procede de la

misma manera para las amplitudes. A continuación, se puede iterar el proceso. Como variante se pueden ajustar inicialmente las amplitudes, o ajustar la amplitud y la fase de un elemento antes de pasar al siguiente.

5 Como se muestra en la figura 4, las primeras operaciones del algoritmo son: la determinación de la salida de mayor potencia  $S_r$ , la medición de su potencia y la medición de la intercorrelación (normalizada) media  $C_{(0)}$  —o más propiamente su cálculo a partir de las señales adquiridas—. A continuación se verifica si esta intercorrelación normalizada media es superior a un umbral predeterminado  $C_{min}$ , porque en caso contrario se puede considerar que el aislamiento ya es suficiente y que no es necesaria ninguna calibración.

10 A continuación se incrementa la fase ( $\phi$ ) del peso complejo de un primer elemento de ponderación con un paso  $\Delta\phi$  de valor predefinido, y se recalcula la intercorrelación (normalizada) media,  $C_{(1)}$ . Se determina entonces si la intercorrelación nuevamente calculada  $C_{(1)}$  es mayor o menor que  $C_{(0)}$ ; si es mayor, esto significa que el incremento de fase ha aumentado los desequilibrios en lugar de reducirlos; se cambia por tanto el signo del paso del incremento:  $\Delta\phi \rightarrow -\Delta\phi$ ; en caso contrario, se deja este paso sin cambiar. A continuación, se procede con unos incrementos sucesivos —siempre de un mismo paso, cuyo signo se ha determinado de una vez para todas a partir de la primera iteración que se acaba de describir— hasta que no se verifique una de las condiciones siguientes:

- 15 - o bien la intercorrelación media desciende por debajo del umbral  $C_{min}$ , en cuyo caso se considera que el aislamiento es suficiente y el proceso se detiene;
- 20 - o bien la intercorrelación media comienza a aumentar ( $C_{(n+1)} > C_{(n)}$ ), lo que significa que se ha sobrepasado el punto de regulación óptima; en ese caso, se resta  $\Delta\phi$  a la fase del peso complejo para volver al mejor reglaje identificado, y se pasa al ajuste del elemento de ponderación sucesivo (por razones de simplicidad, el organigrama de la figura 1 está limitado al caso de un único elemento de ponderación).

Cuando se han ajustado todas las fases, y si la intercorrelación media no es inferior al umbral  $C_{min}$ , se pasa al ajuste de las amplitudes según el mismo método (parte derecha del organigrama).

Posteriormente, si el aislamiento no es todavía satisfactorio, se itera de nuevo (no representado).

25 Por supuesto, es posible imponer un número máximo de iteraciones a no sobrepasar, sea para el ajuste de la fase y/o de la amplitud de cada elemento o sea para el procedimiento en su conjunto.

Las figuras 5A - 5C permiten ilustrar el resultado técnico de la invención. Muestran los espectros de las señales de salida del amplificador multipuerto de la figura 3 obtenidos mediante simulaciones digitales en las condiciones siguientes:

- 30 • Los desequilibrios de las amplitudes y de las fases siguen unas distribuciones gaussianas con  $\sigma_A = 0,8$  dB y  $\sigma_\phi = 3^\circ$ ;
- Dinámica en potencia de las portadoras = 3 dB;
- Adquisición de las señales sobre  $2^{13}$  puntos;
- Limitación de la banda a 50 MHz (muestreo a 100 MHz);
- 35 • Una portadora modulada en QPSK con ancho de banda de 20 MHz en cada entrada;
- Portadoras igualmente repartidas entre 50 MHz y 200 MHz;
- Modelos de las matrices de Butler procedentes de las medidas sobre los dispositivos reales;
- Ninguna modelización de los efectos AM/AM (variaciones de la ganancia con el punto de funcionamiento en potencia) y AM/PM (variación de la fase de la función de transferencia con el punto de funcionamiento en potencia) de los amplificadores de potencia.

40 La figura 5A muestra los espectros antes de la compensación; se puede ver que las interferencias son grandes, y en efecto el aislamiento en el peor de los casos vale -16,8 dB, lo que es generalmente insatisfactorio. Después de 5 iteraciones (figura 5B) las interferencias entre portadoras han desaparecido prácticamente y el aislamiento en el peor de los casos vale -31,9 dB. De hecho, ya una única iteración permite llevar el aislamiento mínimo a un valor de -22,6 dB, lo que se considera generalmente suficiente para la mayor parte de las aplicaciones.

45 La figura 6 ilustra muy esquemáticamente la integración de un amplificador multipuerto MPA según la invención en la carga útil CU de un satélite de telecomunicaciones SAT. La carga útil CU es un transpondedor que incluye un emisor y un receptor que comparten una misma antena ANT; el amplificador multipuerto constituye la fase de potencia del emisor.

50 La invención se ha descrito en referencia a modo de realización particular, pero pueden contemplarse un gran número de variantes:

- el amplificador multipuerto puede utilizarse en unas aplicaciones distintas que las telecomunicaciones espaciales, y operar en una banda espectral diferente a las consideradas aquí (bandas Ku - K - Ka), por ejemplo las bandas L, S, C y X;
- 55 - las matrices de entrada y de salida pueden no ser de Butler; en particular si se desea utilizar un número de puertos, y por tanto de amplificadores de potencia, que no sea una potencia de dos;
- el número de amplificadores puede ser diferente, y en particular superior, al número de señales a amplificar;

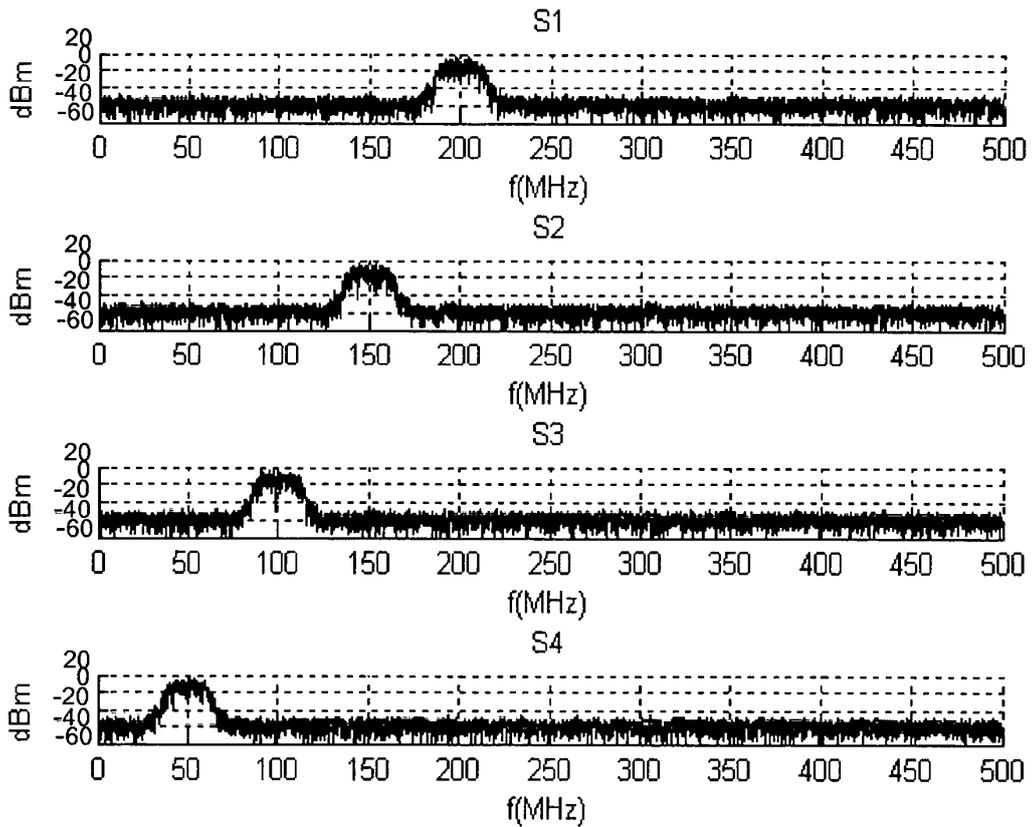
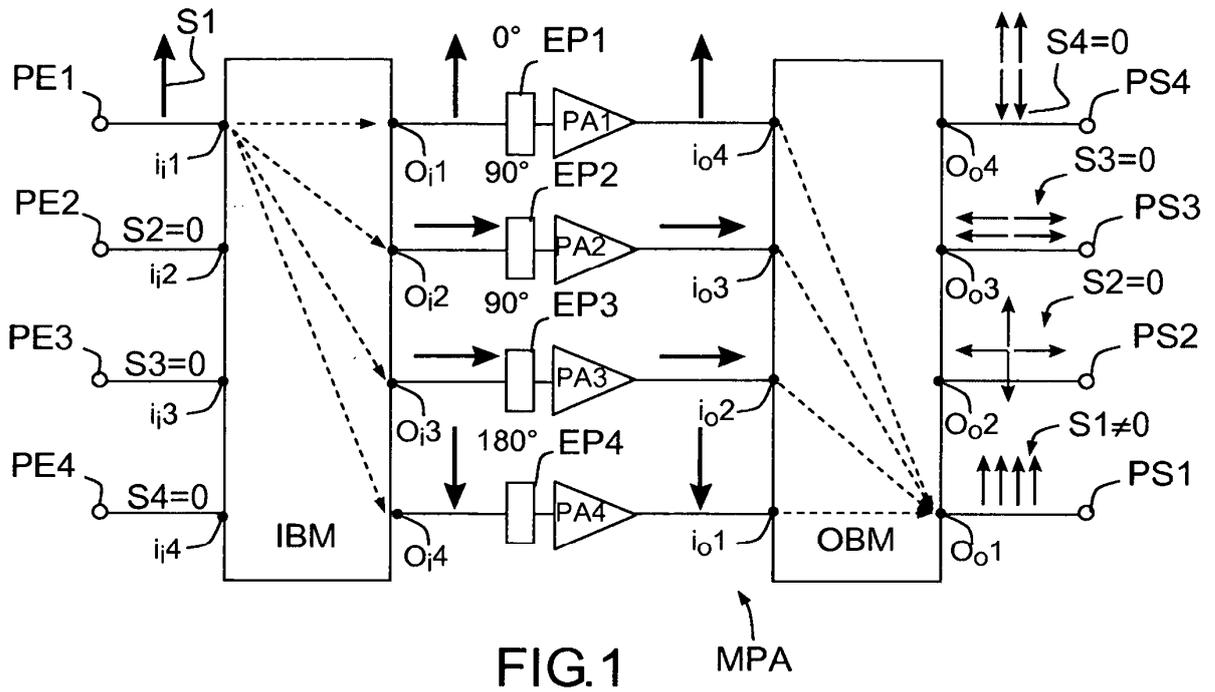
## ES 2 593 623 T3

- excepcionalmente, la calibración se puede efectuar actuando únicamente sobre la fase, o únicamente sobre el módulo, de los pesos de los elementos de ponderación;
- el procedimiento de calibración se puede implementar utilizando las señales de tráfico que son tratadas por el amplificador multipuerto durante su funcionamiento normal; como variante, en ausencia de tráfico, se podrán utilizar unas portadoras moduladas por una señal de ensayo (incluso no moduladas) o simplemente con ruido;
- 5 - las señales tratadas por el amplificador multipuerto pueden no presentar un plan de frecuencias disjunto sino, por ejemplo, utilizar una misma portadora; sin embargo, en este caso, el aislamiento entre la salida se puede convertir en menos bueno que en el caso de un plan de frecuencias disjunto;
- el puerto de salida de referencia puede no ser el que presente la señal más potente, aunque sea preferido ese modo de realización;
- 10 - pueden utilizarse varios algoritmos de optimización diferentes para ajustar los pesos de los elementos de ponderación;
- el tratamiento de las señales se puede derivar al menos en parte; por ejemplo, las señales adquiridas y digitalizadas por las cadenas de adquisición pueden almacenarse en una memoria y transmitirse a una estación en tierra que efectuar los cálculos y reenviar unas señales de control que realizan los ajustes de los elementos de ponderación.
- 15

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de calibración de un amplificador multipuerto que incluye una pluralidad de puertos de entrada (PE1 - PE4), una pluralidad de amplificadores de potencia (PA1 - PA4) unidos a dichos puertos de entrada por medio de una matriz de distribución de señales (IBM) y una pluralidad de puertos de salida (PS1 - PS4) unidos a dichos amplificadores de potencia por medio de una matriz de recombinación de señales (OBM), estando adaptadas dichas matrices de distribución y de recombinación de señales para repartir una señal presente en un denominado puerto de entrada entre una pluralidad de dichos amplificadores de potencia y para recombinar dicha señal, amplificada, al nivel de un denominado puerto de salida, estando asociado un elemento de ponderación de las señales (EP1 - EP4) a cada denominado amplificador de potencia;
- 5 estando el procedimiento **caracterizado porque** incluye las etapas que consisten en:
- 10 a) determinar una intercorrelación media normalizada entre una señal de salida presente en un denominado puerto de salida, tomado como referencia, y las señales presentes en los otros denominados puertos de salida; y  
 b) ajustar iterativamente unos pesos de dichos elementos de ponderación, de manera que se minimice dicha intercorrelación media normalizada o se la convierta en inferior a un umbral predeterminado.
- 15 2. Procedimiento según la reivindicación 1 en el que dicha intercorrelación media normalizada se normaliza con relación a una autocorrelación media de la señal presente en dicho puerto de salida tomado como referencia.
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores en el que el puerto de salida tomado como referencia es aquel que presenta la señal que tiene el nivel de potencia más elevado.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores en el que dichos pesos son unos pesos complejos, incluyendo cada uno un módulo y una fase, comprendiendo dicha etapa b) las subetapas que consisten en:
- 20 b1) ajustar iterativamente las fases de dichos pesos; y  
 b2) ajustar iterativamente los módulos de dichos pesos.
5. Procedimiento según la reivindicación 4 en el que dichas subetapas b1) y b2) se implementan sucesivamente, en un orden arbitrario, y en el que: dicha subetapa b1) incluye el ajuste sucesivo de las fases de los pesos de los elementos de ponderación asociados a los diferentes amplificadores de potencia; y dicha subetapa b2) incluye el ajuste sucesivo de los módulos de los pesos de los elementos de ponderación asociados a los diferentes amplificadores de potencia.
- 25 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores en el que dicha etapa b) incluye las operaciones siguientes:
- 30 i. determinar dicha intercorrelación media normalizada;  
 ii. aplicar un incremento predefinido al módulo y/o a la fase de un denominado peso a ajustar;  
 iii. determinar de nuevo dicha intercorrelación media normalizada y, si su valor ha aumentado, cambiar el signo de dicho incremento; y  
 35 iv. aplicar dicho incremento predefinido a la fase y/o al módulo de dicho peso a ajustar, con el signo determinado durante la operación iii;  
 v. determinar de nuevo dicha intercorrelación media normalizada y, si su valor ha disminuido en tanto que permanece superior a un umbral predefinido, repetir las operaciones iv. y v.
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores en el que dichas correlaciones medias normalizadas se determinan en el interior de una banda de frecuencia sustancialmente coincidente con la de la señal presente en dicho puerto de referencia.
- 40 8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores en el que las señales presentes en dichos puertos de salida presentan un plan de frecuencia disjunto.
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que no se inyecta ninguna señal de medida en dicho amplificador con el fin de realizar la calibración.
- 45 10. Amplificador multipuerto que incluye una pluralidad de puertos de entrada (PE1 - PE4), una pluralidad de amplificadores de potencia (PA1 - PA4) unidos a dichos puertos de entradas por medio de una matriz de distribución de señales (IBM) y una pluralidad de puertos de salida (PS1 - PS4) unidos a dichos amplificadores de potencia por medio de una matriz de recombinación de señales (OBM), estando adaptadas dichas matrices de distribución y de recombinación de señales para repartir una señal presente en un denominado puerto de entrada entre una pluralidad de dichos amplificadores de potencia y para recombinar dicha señal, amplificada, al nivel de un denominado puerto de salida, estando asociado un elemento de ponderación de las señales (EP1 - EP4) a cada denominado amplificador de potencia;
- 50 **caracterizado porque** comprende igualmente un módulo de calibración (MC) configurado o programado para implementar un procedimiento de calibración según una de las reivindicaciones anteriores.

11. Amplificador multipuerto según la reivindicación 10 en el que dicho módulo de calibración comprende:
- un primer (SP1) y un segundo (SP2) selectores para seleccionar un primer y un segundo puerto de salida;
  - una primera (CAS1) y una segunda (CAS2) cadena de adquisición de las señales presentes en dichos primer y segundo puertos de salida, para seleccionar, convertir a una frecuencia intermedia, filtrar y digitalizar dichas señales; y
  - un procesador (DSP) programado o configurado para: controlar dichos primer y segundo selectores y dichas primera y segunda cadenas de adquisición; adquirir las señales digitalizadas procedentes de dichas cadenas de adquisición; a partir de las señales digitalizadas adquiridas, calcular una intercorrelación media normalizada entre una señal de salida adquirida desde un puerto de salida, tomado como referencia, y las señales adquiridas desde los otros puertos de salida; ajustar iterativamente los pesos de dichos elementos de ponderación para minimizar dicha intercorrelación media normalizada o hacerla inferior a un umbral predeterminado.
12. Amplificador multipuerto según la reivindicación 11 en el que dicho procesador se deriva en su totalidad o en parte.
13. Amplificador multipuerto según una de las reivindicaciones 10 a 12 en el que cada denominado elemento de ponderación comprende un atenuador (AV1 - AV4) variable y un desfasador ( $\Phi V1$  -  $\Phi V4$ ) variable conectados en cascada.
14. Amplificador multipuerto según una de las reivindicaciones 10 a 13, que opera en al menos una banda elegida entre la banda Ku, la banda K y la banda Ka.
15. Satélite para telecomunicaciones (SAT) cuya carga útil comprende una amplificador multipuerto según una de las reivindicaciones 10 a 14.



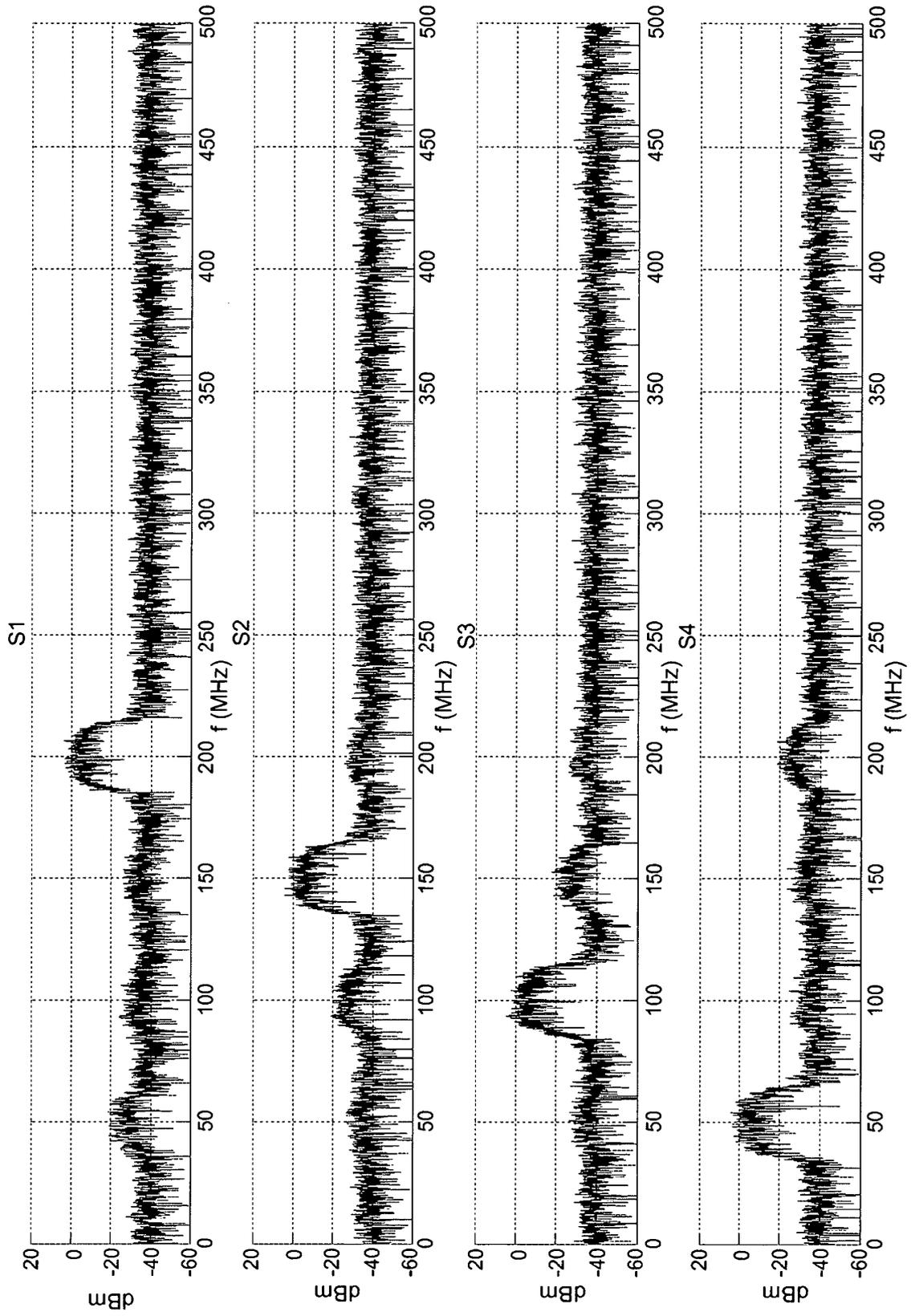


FIG.2B

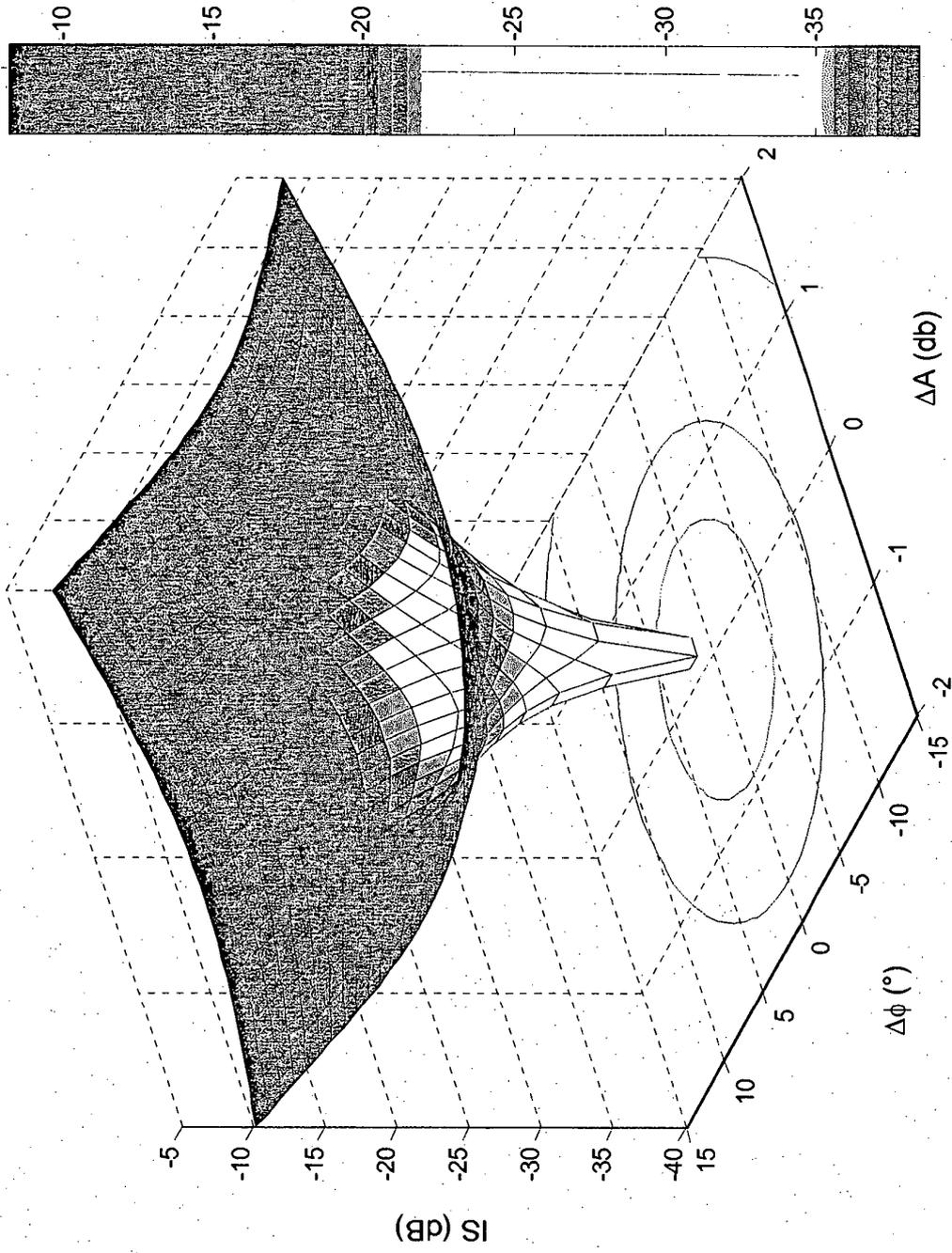


FIG.2C

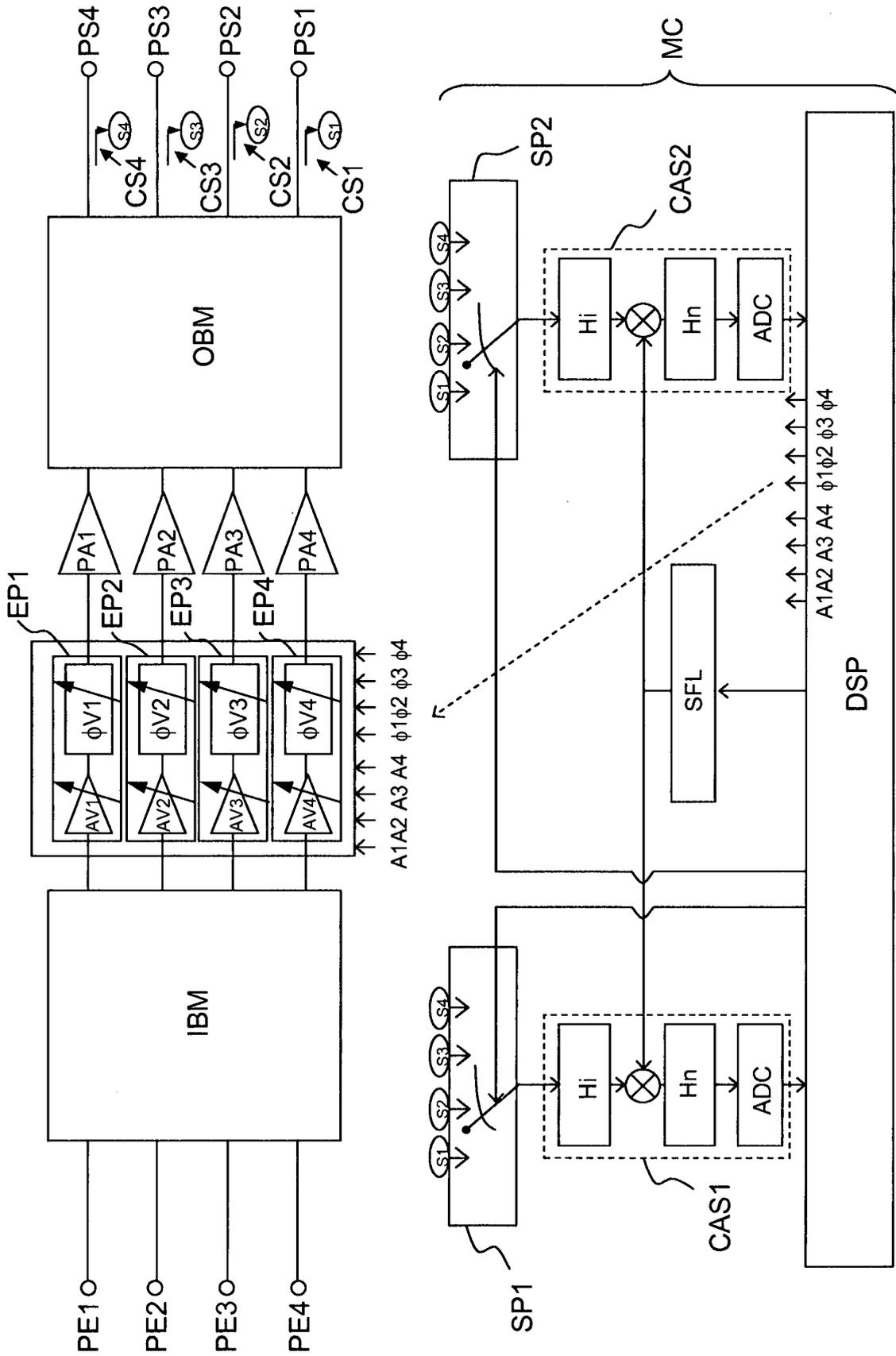


FIG.3

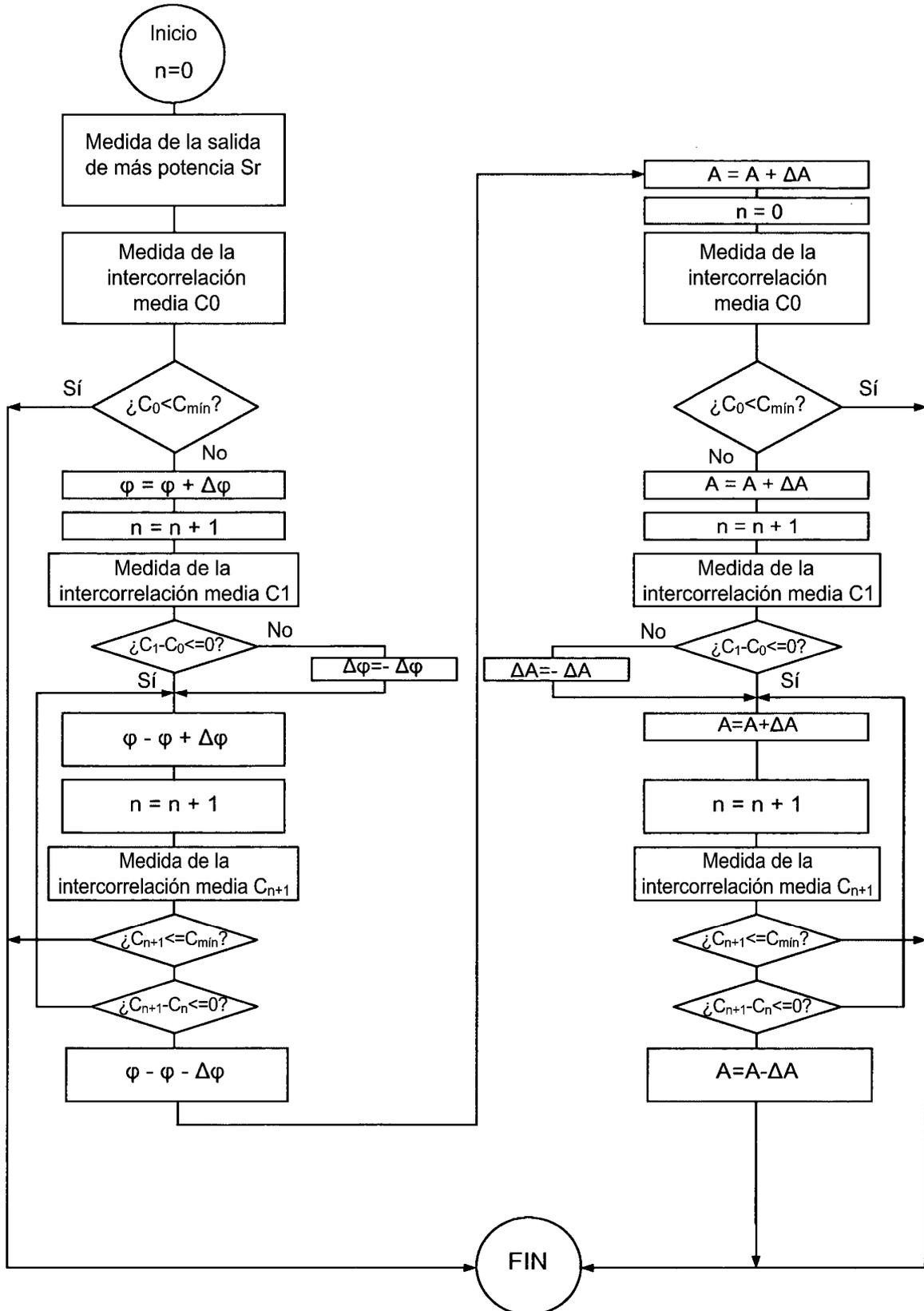


FIG.4

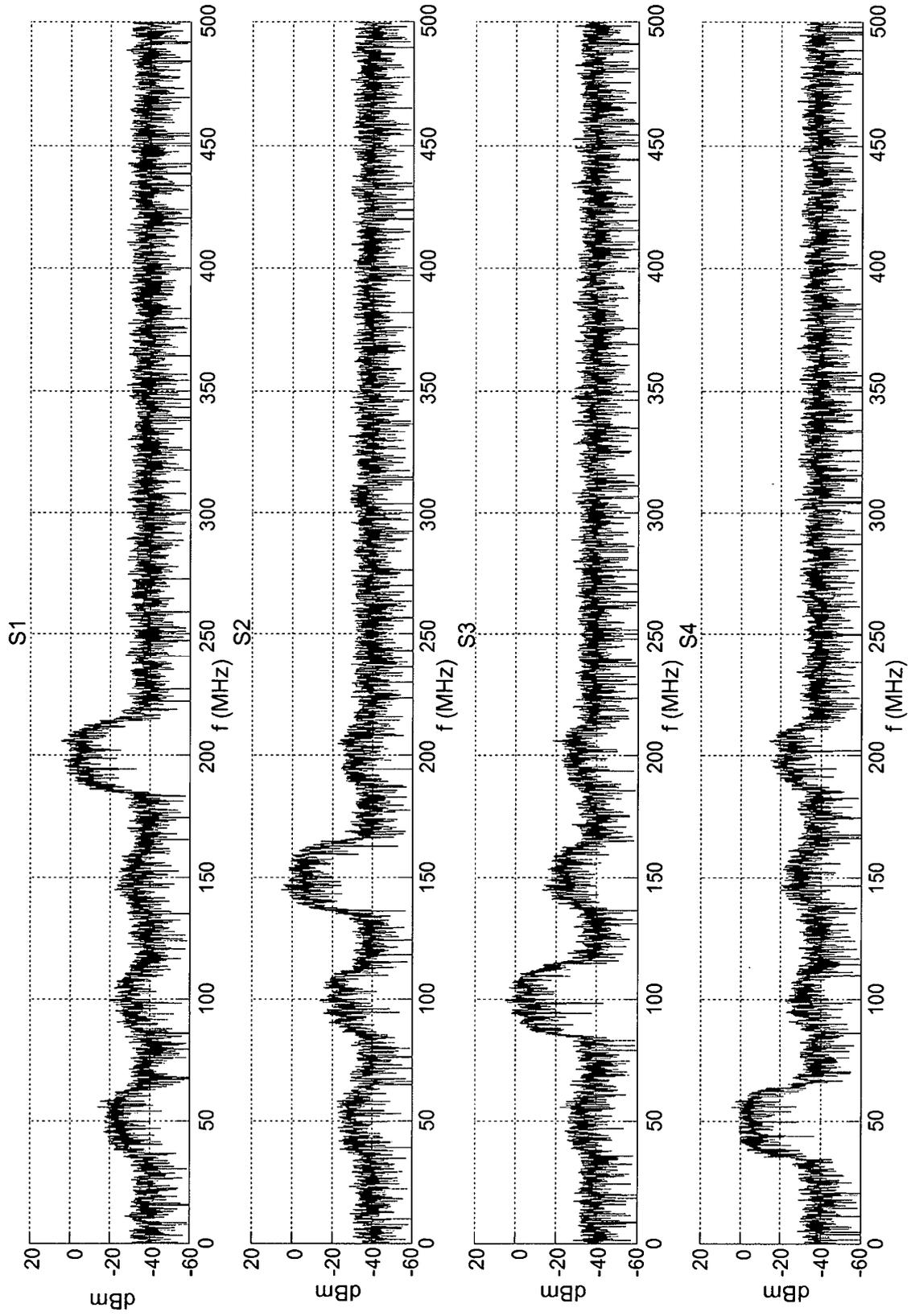


FIG.5A

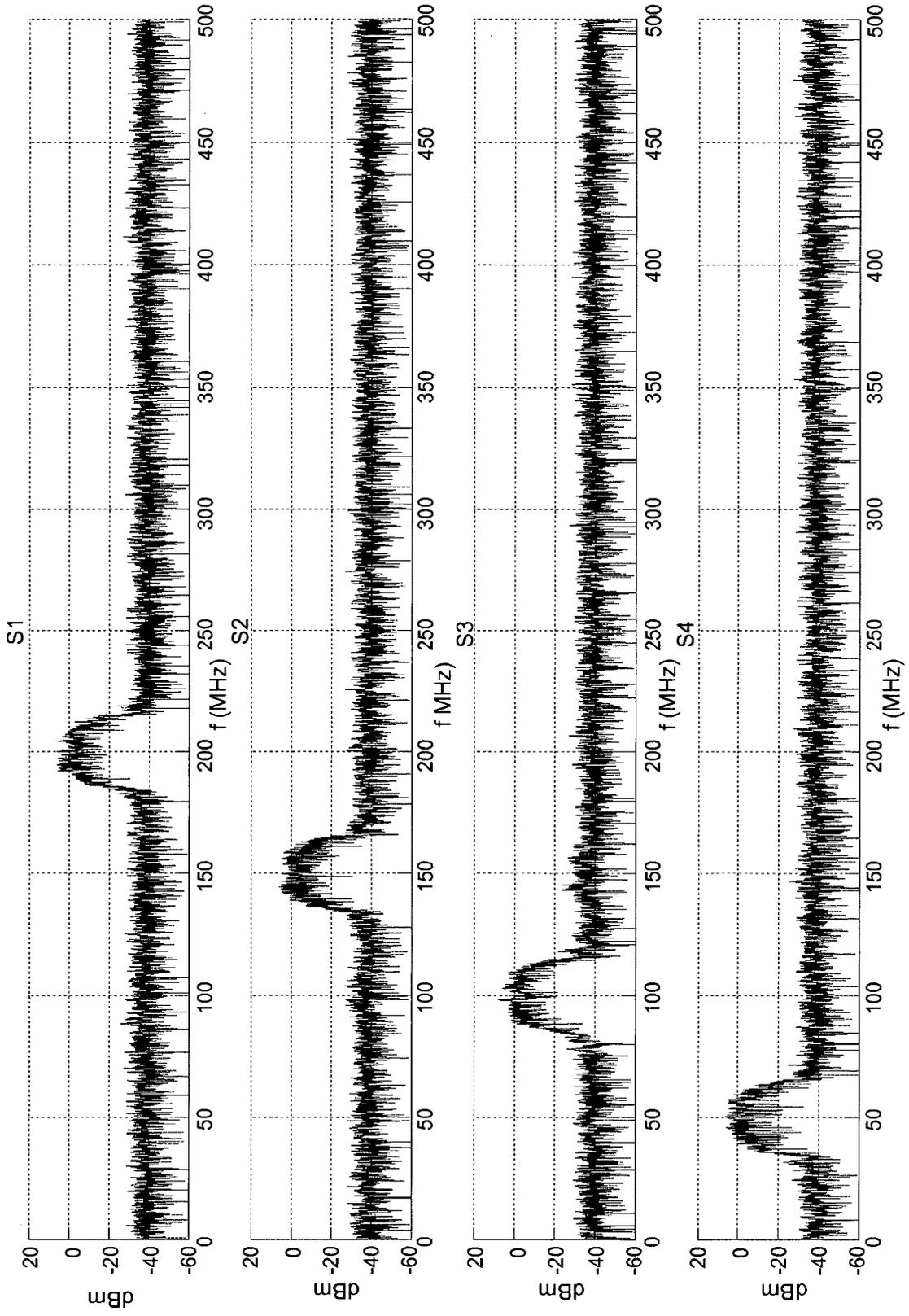


FIG.5B

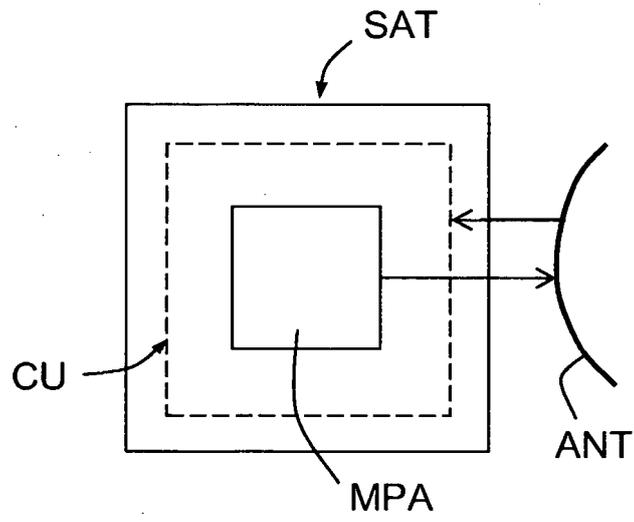


FIG.6