

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 384 533**

51 Int. Cl.:
H04J 13/00 (2011.01)
G01S 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **07847596 .9**
- 96 Fecha de presentación: **30.11.2007**
- 97 Número de publicación de la solicitud: **2095551**
- 97 Fecha de publicación de la solicitud: **02.09.2009**

54 Título: **Códigos de ensanchamiento caóticos y generación de los mismos**

30 Prioridad:
01.12.2006 LU 91292

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
06.07.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
06.07.2012

73 Titular/es:
**The European Union, represented by the
European Commission
Rue de la Loi, 200
1049 Brussels, BE**

72 Inventor/es:
**HADEF, Mahmoud;
REISS, Josh y
CHEN, Xiaodong**

74 Agente/Representante:
Curell Aguilá, Mireia

ES 2 384 533 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

Códigos de ensanchamiento caóticos y generación de los mismos.

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a códigos de ensanchamiento caóticos, en particular a un procedimiento para generar un conjunto de códigos de ensanchamiento caóticos que presentan propiedades de autocorrelación y correlación cruzada adecuadas para los sistemas de navegación por satélite y los sistemas de comunicación CDMA.

10

Antecedentes de la técnica

La radionavegación por satélite ofrece servicios de posicionamiento de gran alcance y precisión y garantía de fiabilidad, gracias a las tecnologías de vanguardia adoptadas por el sistema GPS. Dentro de algunos años, dichas tecnologías se perfeccionarán mediante la introducción de la Constelación europea de navegación por satélite Galileo, una iniciativa lanzada por la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés). Se espera que la constelación Galileo junto con el venidero sistema GPS III de tercera generación aseguren una cobertura más amplia y unos servicios de información temporal y posicionamiento más precisos. Sin embargo, para asegurar el éxito de dichos servicios, es necesario reconsiderar cuidadosamente diferentes parámetros de las señales de navegación, tales como el sistema de modulación, la estructura del mensaje de navegación y el diseño de los códigos de ensanchamiento.

El uso de los códigos de ensanchamiento hace que las señales parezca que tengan características de banda ancha y de ruido. Es este hecho concreto el que determina que sea difícil interceptar e inhibir dichas señales, y que sea improbable que estas interfieran con señales de banda estrecha. Por consiguiente, los códigos de ensanchamiento desempeñan un papel importante para garantizar una transmisión fiable y segura, sin generar interferencias significativas con otras señales. En la transmisión de acceso múltiple de espectro ensanchado, tal como el acceso múltiple por división de código de secuencia directa (D-CDMA) y los sistemas de navegación por satélite, se asignan códigos diferentes a las señales diferentes y el receptor recupera la señal de usuario deseada utilizando la información del correspondiente código de ensanchamiento. Es deseable que estos códigos de ensanchamiento presenten autocorrelaciones de tipo pico delta para obtener una sincronización precisa y baja correlación cruzada a fin de reducir las interferencias cocanal. Las secuencias de registro de desplazamiento con retroalimentación lineal (LFSR, por sus siglas en inglés) son los códigos binarios pseudoaleatorios más conocidos y estudiados en la bibliografía especializada y son de uso generalizado en diversas aplicaciones, tales como los sistemas DS-CDMA y de navegación por satélite.

Con respecto al futuro sistema de navegación por satélite Galileo, se plantea la necesidad de generar nuevos códigos además de los códigos de referencia descritos en el documento SIS IDC [1] y analizados en el documento Phase C0 [2]. Para analizar los códigos de referencia, es necesario efectuar una comparación directa con otros códigos y conjuntos de códigos. La mayor parte de los códigos descritos previamente, tales como los códigos Galileo E5, experimentan problemas debido al truncamiento de su longitud máxima. Por lo tanto, deberían generarse códigos cuya longitud máxima no esté restringida al valor 2^{N-1} , para ciertos valores de N. Se han propuesto muchos códigos que, teóricamente, pueden ofrecer mejores resultados que los códigos basados en registros de desplazamiento con retroalimentación lineal estándar. Por consiguiente, merece la pena investigar estos códigos como potenciales alternativas a los códigos de referencia, y tomar en consideración el empleo de estos en una arquitectura Galileo flexible.

Los códigos de referencia Galileo son secuencias de memoria o secuencias de longitud máxima combinadas y truncadas (secuencias m). Sin lugar a dudas, las secuencias m son fáciles de generar y poseen un comportamiento de autocorrelación perfecto. No obstante, aparte del moderado rendimiento de correlación cruzada habitual en las secuencias m, el procedimiento de truncamiento, necesario para obtener la longitud de código deseada, anula el comportamiento de autocorrelación perfecto de dichas secuencias e incide negativamente en su rendimiento. Por el contrario, los códigos de memoria pueden optimizarse para mejorar el rendimiento, aunque son difíciles de integrar en un chip y de generar en tiempo real y, por este motivo, deben almacenarse en memoria. Por consiguiente, la investigación de sistemas alternativos, tales como los códigos caóticos, que podrían ofrecer mejor rendimiento y más facilidad de implementación, despertaría por supuesto el interés de la comunidad de tecnologías de espectro ensanchado.

Uno de los problemas de los códigos pseudoaleatorios es su generación. Los códigos de ruido pseudoaleatorio (PRN, por sus siglas en inglés) generados mediante procesadores de señales digitales tienden a ser periódicos debido a la naturaleza digital de los procesadores. En los últimos años, la utilización de generadores caóticos para crear códigos de ensanchamiento en los sistemas de espectro ensanchado [3-5] ha suscitado gran interés. La simplicidad de estos generadores, la aperiodicidad de las señales caóticas, su sensibilidad a las condiciones iniciales y su flexibilidad desde el punto de vista de la longitud hacen que la utilización de estos generadores, por ejemplo en la tecnología de comunicación por satélite o la tecnología de la comunicación, genere gran interés. Estos códigos caóticos brindan los beneficios de una implementación sencilla, apariencia de banda ancha y ruido, mayor privacidad

de la transmisión, especialmente con respecto a las secuencias m y las secuencias Gold estándar, y resistencia a las imperfecciones del canal, tales como la propagación por trayectorias múltiples y las interferencias intencionadas [3, 4]. Además, la inclusión de implementaciones de códigos caóticos que no se basan en registros de desplazamiento permite generar códigos de ensanchamiento de longitud arbitraria sin necesidad de truncar. En resultados recientes [5, 8-10], se ha demostrado que es posible crear, de manera sólida y eficaz, generadores de códigos de ensanchamiento adecuados basados en mapas caóticos, en hardware digital. El alto rendimiento de dichos mapas se ha investigado en el documento [11], donde se ha demostrado asimismo cómo se pueden modificar los mapas para obtener propiedades de correlación casi ideales. Además, en los documentos [8-10] se da a conocer el concepto de la utilización de secuencias caóticas con bits finitos por medio de un registro de desplazamiento con retroalimentación lineal, y en el documento [11] se describe un método algorítmico para diseñar una secuencia m decimal con una función de autocorrelación determinada.

No obstante, estos estudios solo son adecuados para secuencias de longitud máxima y no son adecuados para códigos de longitud arbitraria como los del sistema Galileo. En realidad, se han realizado exhaustivas simulaciones, en las que se han generado y evaluado numerosos conjuntos caóticos, basados en los estudios anteriores. A pesar del buen comportamiento de autocorrelación de dichos códigos caóticos, el proceso aleatorio utilizado en la selección de estos códigos da por resultado un rendimiento de correlación cruzada deficiente e inadmisibles. Además, aunque los procedimientos Gold y Kasami han podido vencer este inconveniente, no son capaces de ofrecer un rendimiento de correlación cruzada satisfactorio, puesto que ambos procedimientos fueron diseñados inicialmente para secuencias m en lugar de códigos caóticos. En el documento "Design of a new class of spreading sequence using chaotic dynamical systems for asynchronous DS-CDMA applications" de A. Mirzaee *et al.*, se presenta un procedimiento para generar códigos de ensanchamiento, en el que se aplican M valores semilla elegidos al azar como puntos iniciales de las funciones de mapas caóticos. Las secuencias obtenidas de esta forma se cuantifican según diferentes procedimientos. Entre las secuencias cuantificadas, se selecciona la que posee el mejor factor de calidad, y se repite el procedimiento.

Objetivo de la invención

El objetivo de la presente invención es proponer un procedimiento de generación de un conjunto de códigos de ensanchamiento que supere los problemas mencionados anteriormente. Este objetivo se alcanza mediante el procedimiento según la reivindicación 1.

Descripción general de la invención

El procedimiento de generación de un conjunto de códigos de ensanchamiento empieza con la determinación de un primer y un segundo códigos de ruido pseudoaleatorios caóticos (códigos semilla) de la longitud deseada, que presentan funciones de autocorrelación de tipo pico delta y una función de correlación cruzada baja. Aunque el significado de los últimos términos será evidente para los expertos en la materia, un código binario presenta una función de autocorrelación de tipo "pico delta" si su autocorrelación es 0 o por lo menos casi 0 para todos los retardos diferentes a 0; análogamente, se dice que dos códigos presentan una baja correlación cruzada si su correlación cruzada es 0 o casi 0 para todos los retardos. Se obtienen más códigos de ruido pseudoaleatorios realizando las etapas siguientes:

(a) generar un código de ruido pseudoaleatorio adicional calculando

$$D_k = F(C_1) + T^k C_2 + F(C_2),$$

en la que k representa un índice entero positivo, D_k representa el código de ruido pseudoaleatorio adicional que se genera, C_1 representa el primer código, C_2 representa el segundo código, F representa una función binaria basada en operaciones binarias básicas y T^k representa el operador que aplica al código un desplazamiento cíclico de k posiciones de chip ("chip" denota un "bit" de un código de ruido pseudoaleatorio; sin embargo, el término "bit" generalmente indica que se codifica información);

(b) añadir el código D_k al conjunto de códigos de ruido pseudoaleatorios ya determinados si el código presenta una autocorrelación tipo pico delta y funciones de baja autocorrelación con los códigos de ruido pseudoaleatorios ya determinados;

(c) rechazar el código D_k si no se cumplen las condiciones para su adición al conjunto de códigos de ruido pseudoaleatorios determinados de la etapa (b);

(d) modificar (incremento o decremento) el índice k y repetir las etapas (a)-(d) hasta que el número cardinal del conjunto de códigos de ruido pseudoaleatorios determinados alcance el número cardinal del conjunto de códigos de ensanchamiento que se va a generar.

Los expertos tendrán en cuenta que el presente procedimiento no está restringido a la generación de códigos que tienen una longitud particular, sino que puede utilizarse para códigos de longitud arbitraria. La longitud de código

puede fijarse inicialmente eligiendo los dos códigos iniciales.

5 Según una forma de realización preferida del procedimiento, el primer código de ruido pseudoaleatorios caótico se determina generando un conjunto preliminar de códigos de ruido pseudoaleatorio caóticos basados en un mapa caótico iterativo (por ejemplo, un mapa de tienda de campaña, un mapa de desplazamiento dividido o un mapa de Bernoulli de n vías) y eligiendo, como primer código de ruido pseudoaleatorio caótico, el código del conjunto preliminar que presenta la mejor función de autocorrelación de tipo pico delta de los códigos del conjunto preliminar.

10 El segundo código de ruido pseudoaleatorio caótico puede determinarse, entonces, seleccionando del conjunto preliminar un código que presenta una autocorrelación de tipo pico delta y cuya correlación cruzada con el primer código de ruido pseudoaleatorio caótico presenta solo un pico predominante para cierto retardo, en lo sucesivo denotado por L , correspondiendo el retardo preferentemente a alrededor de la mitad de la longitud del código, dando la vuelta a las posiciones de los primeros L chips del código seleccionado y manteniendo el resto de chips del código seleccionado.

15 Más preferentemente, la función binaria F mencionada en la etapa (a) se basa en desplazar (cíclicamente) y/o dar la vuelta (es decir, la inversión del orden de una secuencia de chips) y/o invertir. En caso de que solo se utilicen estas operaciones básicas en el procedimiento, es posible utilizar circuitos sencillos y de bajo coste si el procedimiento se implementa en hardware.

20 Como resultará obvio a los expertos en la materia, la generación del conjunto preliminar de códigos de ruido pseudoaleatorios caóticos puede comprender la emulación del mapa caótico mediante un registro de desplazamiento con retroalimentación lineal extendido.

25 Como se describe en mayor detalle más adelante, se ha demostrado que los conjuntos de códigos de ensanchamiento obtenidos con el presente procedimiento tienen un rendimiento de correlación cruzada mejor que los conjuntos de códigos de ensanchamiento obtenidos con los procedimientos convencionales. Dado que una correlación más baja significa una interferencia más baja y por lo tanto la posibilidad de utilizar con mayor eficacia el ancho de banda disponible, el presente procedimiento es de interés en todas las áreas relacionadas con la tecnología de espectro ensanchado.

30 **Breve descripción de los dibujos**

A continuación, se describirá en mayor detalle la presente invención con referencia a las figuras siguientes, en las cuales:

la figura 1 ilustra un generador de códigos basados en LFSR convencionales para códigos primarios Galileo E5 [1];

40 la figura 2 representa el equilibrio de los códigos E5a-I, E5a-Q, E5b-I y E5b-Q;

la figura 3 representa los histogramas de autocorrelación par de los códigos Galileo E5a-I para diferentes desplazamientos Doppler;

45 la figura 4 representa el histograma de autocorrelación par de los códigos de Galileo E5a-I (izquierda) y los nuevos códigos basados en la iteración de mapa de tienda de campaña (derecha);

50 la figura 5 representa el histograma de correlación cruzada par de los nuevos códigos basados en la iteración de mapa de tienda de campaña (izquierda) y la función de correlación cruzada entre dos códigos de mapa de tienda de campaña seleccionados aleatoriamente (derecha);

la figura 6a representa la frecuencia máxima de aparición (MRO) de la autocorrelación par de un conjunto de códigos de mapa de tienda de campaña basados en la estrategia de generación según el presente procedimiento comparada con la de los códigos Galileo E5a-I, a la frecuencia Doppler cero ($DF=0$ Hz);

55 la figura 6b representa la frecuencia máxima de aparición (MRO) de la correlación cruzada par de un conjunto de códigos de mapa de tienda de campaña basados en la estrategia de generación según el presente procedimiento comparada con la de los códigos Galileo E5a-I, a la frecuencia Doppler cero ($DF=0$ Hz);

60 la figura 7 representa histogramas de correlación cruzada par e impar de los códigos de mapa de tienda de campaña basados en la estrategia de generación según el presente procedimiento;

la figura 8 es un diagrama de flujo de una forma de realización preferida de un procedimiento según la presente invención.

Descripción detallada

La figura 8 ilustra el funcionamiento de una forma de realización preferida de un procedimiento según la presente invención. En primer lugar, los códigos semilla se determinan generando varios códigos caóticos preliminares de una longitud N deseada basados en un mapa caótico iterativo, tal como el mapa de tienda de campaña u otro de los mapas mencionados anteriormente. Los códigos caóticos preliminares se generan en unas condiciones iniciales seleccionadas al azar y no se utiliza ninguna restricción particular en esta etapa. A partir de los códigos caóticos preliminares obtenidos basándose en el mapa de tienda de campaña, se elige, como primer código semilla, el mejor código C₁ por lo que a autocorrelación respecta. El segundo código semilla se obtiene después seleccionando de los códigos preliminares otro código ("código intermedio") que presenta una autocorrelación de tipo pico delta y cuya correlación cruzada con el primer código semilla presenta solo un pico predominante para cierto retardo L correspondiente a alrededor de la mitad de la longitud del código (L≈N/2). Como se ilustra en el recuadro denominado "procedimiento de selección de semilla" de la figura 8, el segundo código semilla C₂ se obtiene entonces a partir del código intermedio dando la vuelta a la posición de los L primeros chips del mismo y manteniendo el resto de chips N-L.

Una vez que los dos códigos semilla C₁ y C₂ se han fijado, se obtiene un código de ruido pseudoaleatorio adicional D₁ efectuando el siguiente cálculo para k=1:

$$D_k = F(C_1) + T^k C_2 + F(C_2),$$

en la que F designa, en este caso, el operador que da la vuelta a las posiciones de todo el código. En una forma de realización más elaborada, el hecho de dar la vuelta a las posiciones de todo el código podría complementarse mediante otros operadores básicos basados en desplazar y/o invertir (inversión del valor de algunos chips). T^k denota el operador que aplica al código un desplazamiento cíclico de k posiciones de chip hacia la izquierda o la derecha.

El código D_k obtenido de esa forma se añade al conjunto de códigos de ruido pseudoaleatorios:

si el código presenta una autocorrelación de tipo pico delta, es decir, AC(D_k)<AC_{max}, donde AC_{max} es el valor de autocorrelación máxima permitida predeterminado para todos los retardos distintos de 0,

y si el código tiene funciones de correlación cruzada bajas con los códigos de ruido pseudoaleatorios que ya se han determinado, es decir, si para cada código C ya determinado y para todos los retardos: CC(D_k,C)<CC_{max}, designando CC_{max} el valor de correlación cruzada máxima permitida predeterminado.

Si no se cumple una o ambas de las condiciones anteriores, el código D_k se rechaza, el índice k se incrementa en una unidad y las etapas anteriores se realizan con el valor incrementado de k. Una vez que se ha añadido el código D_k al conjunto de códigos, se comprueba si se ha alcanzado el número de códigos M deseado. De no ser así, el valor de k también se incrementa en una unidad y se vuelven a realizar las etapas anteriores.

En lo sucesivo, se destacarán algunos problemas relacionados con los códigos de ensanchamiento Galileo E5, debidos al truncamiento de su longitud máxima, y se presentarán algunos resultados de un conjunto de códigos de ensanchamiento obtenidos basándose en el mapa de tienda de campaña.

Códigos de ensanchamiento Galileo E5

La señal Galileo E5 consiste en las señales E5a y E5b y se transmite en la banda de frecuencia de 1164 a 1215 MHz asignada al servicio SNRS con un estatus coprimario mundial [2]. Tanto las señales E5a como E5b consisten en un canal de datos y las señales E5a-I y E5b-I, transmitidos en el componente en fase, y un canal piloto y las señales E5a-Q y E5b-Q, transmitidos en el componente en cuadratura. Los parámetros principales asignados a los diversos códigos de ensanchamiento Galileo E5 para cada componente de señal se indican en la tabla 1. Estos parámetros comprenden los periodos de código en milisegundos y las longitudes de código en chips para las denominadas secuencias primaria y secundaria.

Tabla 1: parámetros de los componentes de las señales Galileo E5 [2]

Componentes de señal	Período de código (ms)	Longitud de código (chips)	
		Primario	Secundario
E5a-I	20	10230	20
E5a-Q	100	10230	100
E5b-I	4	10230	4
E5b-Q	100	10230	100

Los códigos de ensanchamiento E5 se generan mediante una estructura de código de varios niveles, conforme a la

cual se utiliza una secuencia de código secundario para modificar las repeticiones consecutivas de un código primario [1]. Los códigos primarios son secuencias M truncadas y combinadas generadas mediante registros de desplazamiento con retroalimentación lineal (LFSR).

5 Códigos primarios E5

Los códigos primarios E5a-I, E5a-Q, E5b-I y E5b-Q son básicamente secuencias M truncadas y combinadas generadas mediante una técnica sencilla basada en dos LFSR [1]. En esta técnica se utilizan dos registros de desplazamiento paralelos, el registro base 1 y el registro base 2, representados en la figura 1. El código primario es simplemente la O exclusiva de las salidas de los registros base 1 y 2. En la presente memoria, cada registro de desplazamiento j (j=1 o 2) de longitud R recibe como retroalimentación un conjunto particular de tomas de retroalimentación $a_j = [a_{j,1}, a_{j,2}, \dots, a_{j,R}]$ y su contenido está representado por un vector $c_j = [c_j^1, c_j^2, \dots, c_j^R]$, tal como se ilustra en la figura 1.

15 En cada ciclo se genera un nuevo chip de código primario, y el nuevo contenido de la celda del registro de desplazamiento $c_j(k+1)$ para el ciclo k+1 se obtiene a partir del contenido $c_j(k)$ para el ciclo k, de la manera siguiente:

$$c_j^i(k+1) = \begin{cases} c_j^{i-1}(k) & \text{Para } i = 2, \dots, R \\ \text{mod} \left(\left(\sum_{j=1}^R c_j^i(k) a_{j,j} \right), 2 \right) & \text{Para } i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

20 El contenido de los dos registros de desplazamiento se reinicializa con los valores iniciales $s_j = [s_j^1, s_j^2, \dots, s_j^R]$ después de 10.230 ciclos. La duración de 10.230 ciclos también se denomina "época del código primario". Los valores iniciales correspondientes al contenido de los registros base iniciales 1 y 2 utilizados para generar los 200 códigos primarios Galileo E5 pueden hallarse en el documento [1].

25 En la teoría de información, la aleatoriedad es un criterio esencial y un indicador anticipado del rendimiento de los códigos. En la práctica, ningún algoritmo que utilice un mecanismo de estados finitos puede generar secuencias verdaderamente aleatorias, puesto que el carácter finito obliga a las secuencias a ser periódicas. Sin embargo, pueden obtenerse secuencias, denominadas secuencias pseudoaleatorias, que emulan fielmente la aleatoriedad. En la bibliografía especializada, se citan muchas propiedades para medir la aleatoriedad de dichas secuencias pseudoaleatorias. El criterio más utilizado y reconocido es la propiedad del equilibrio. La propiedad del equilibrio establece simplemente que el número de ceros y unos de cada período debe ser tan igual como sea posible.

35 Como se puede observar en la figura 2, los códigos de ensanchamiento para la banda E5 están desequilibrados. Por ejemplo, algunos códigos presentan una diferencia relativamente significativa de alrededor de 100 ceros más que unos, o viceversa. La principal razón de esta deficiencia es el procedimiento de truncamiento realizado en las dos secuencias m (longitud $16.383=2^{14} - 1$) con $N=10.230$. Aunque algunos códigos presentan un buen equilibrio, casi ninguno de ellos presenta un equilibrio perfecto.

40 Cálculo de la correlación

En términos generales, la correlación cruzada entre dos códigos de ensanchamiento diferentes (p y q) debe ser tan pequeña como sea posible a fin de obtener un buen rendimiento de adquisición y seguimiento. Esta propiedad debe mantenerse si se tiene en cuenta el efecto Doppler.

45 Se va a suponer ahora que los dos códigos anteriores están definidos por $\{a_{i,p}\}_{i=1}^N$ y $\{a_{i,q}\}_{i=1}^N$ de longitud N, donde $a_{i,p}$ y $a_{i,q} \in \{-1, 1\}$. En el receptor, la correlación cruzada entre los dos códigos anteriores, teniendo en cuenta el efecto Doppler, puede calcularse mediante la ecuación siguiente:

$$CC_{p,q}(d, f) = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} a_{k,p} a_{k-d,q} e^{2\pi j \frac{f}{f_s} (k-1)} \quad (2)$$

50 en la que f es el desplazamiento de la frecuencia Doppler, d es el retardo y f_s es la frecuencia de muestreo.

Los códigos secundarios utilizados para generar las largas secuencias Galileo E5 son la razón por la cual el procedimiento del cálculo de la correlación cruzada es poco realista y laborioso. Para vencer este problema, el cálculo de la correlación cruzada puede dividirse en el cálculo de una correlación cruzada par CC^e y una correlación cruzada impar CC^o [2]. Por consiguiente, la correlación cruzada total puede expresarse como una combinación lineal de correlaciones cruzadas pares e impares:

$$CC_{p,q} = \alpha CC_{p,q}^e + \beta CC_{p,q}^o \quad (3)$$

5 Los coeficientes α y β , que representan las cantidades de contribución a la correlación total de las correlaciones pares e impares, respectivamente, pueden determinarse con precisión realizando un cuidadoso análisis de las propiedades de aleatoriedad de los códigos secundarios. No obstante, habitualmente se supone que los códigos secundarios son suficientemente aleatorios como para considerar que $\alpha = \beta$. El último supuesto puede no resultar convincente en todos los casos, en particular en los códigos secundarios con longitudes pequeñas. Esta cuestión no se considera en la presente memoria, aunque tal vez sea considerada en futuros trabajos.

10 La figura 2 representa los histogramas de autocorrelación de los 50 códigos primarios E5a-I a diferentes frecuencias Doppler de 0 Hz, 100 Hz y 6000 Hz. En estos histogramas, la frecuencia relativa o la frecuencia de aparición de cierto valor de correlación representan el cociente del número de veces que este valor aparece y el número total de la correlación. Por ejemplo, si se supone que el valor de correlación -35 dB aparece 15 veces entre dos códigos específicos con $N=10.230$, la frecuencia relativa será simplemente $15/10.230 \approx 0,01466$. Las marcas "▽" and "△" representan, respectivamente, la frecuencia relativa máxima y mínima. Las líneas verticales observadas para algunas correlaciones altas significan que por lo menos uno de los códigos no presenta este valor de correlación. Dicho de otro modo, el valor mínimo para dicha correlación respecto del conjunto de códigos es cero y no puede representarse en la escala logarítmica. El límite Welch es el límite teórico hacia el cual se pretende desplazar todas las correlaciones desfasadas y aumentar al máximo la distancia entre estas, y el pico de autocorrelación corresponde al retardo cero.

Analizando los resultados representados en la figura 3, se puede observar lo siguiente:

- 25 • El número de autocorrelaciones posibles se incrementa considerablemente con el desplazamiento de la frecuencia Doppler y el histograma se hace más denso para los desplazamientos Doppler más altos en comparación con el histograma aproximado para la desviación cero.
- 30 • La frecuencia relativa de cualquier autocorrelación determinada disminuye al aumentar el desplazamiento Doppler.
- A valores altos de correlación, la anchura de las líneas verticales aumenta, indicando que algunas de las altas correlaciones desaparecen de algunos códigos al aumentar el desplazamiento Doppler.
- 35 • El valor máximo de correlación avanza hacia el límite Welch a desplazamientos altos.

Por consiguiente, la introducción de los desplazamientos Doppler confiere un aspecto más aleatorio a los códigos y desplaza el valor de correlación máxima hacia el límite Welch. En otro término, el desplazamiento Doppler conduce a algunas características de código deseables.

40 Nuevos códigos de ensanchamiento caóticos

La mayor parte de los códigos descritos anteriormente presentan un rendimiento de correlación subóptimo y experimentan problemas debido al truncamiento de su longitud máxima. En la bibliografía especializada, se encuentran muchas propuestas de códigos que, teóricamente, pueden ofrecer mejores resultados que los códigos basados en registros de desplazamiento con retroalimentación lineal estándar, tales como los códigos caóticos. Este apartado trata sobre las implementaciones prácticas de los códigos caóticos como posibles futuras opciones para los códigos de ensanchamiento Galileo. Los códigos caóticos generalmente se generan basándose en mapas diferentes, tales como los mapas de tienda de campaña, mapas de desplazamiento dividido y mapas de Bernoulli de n vías. En la presente memoria, se trata solo acerca de la implementación de la generación de códigos de ensanchamiento caóticos basados en el mapa de tienda de campaña.

Códigos de mapa de tienda de campaña

55 El mapa de tienda de campaña es un mapa caótico muy conocido. Se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$x_{n+1} = \begin{cases} ax_n & 0 \leq x_n \leq 0,5 \\ a(1 - x_n) & 0,5 \leq x_n \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

60 donde $1 < a < 2$. Por ejemplo, si se parte de la condición inicial $x_0=0,1$ y $a=1,5$, se obtiene la secuencia 0,1, 0,15, 0,225, 0,3375, 0,50625, 0,740625.... Esta secuencia es una secuencia infinita no repetitiva con excelentes propiedades de

correlación. Si a se establece en el valor 2, muchas condiciones iniciales generarán una salida periódica, aunque centrada en torno a 0,5. Por lo tanto, para una condición inicial determinada $0 < x_1 < 1$, la secuencia x_1, x_2, \dots , generada a partir de la ecuación (4) puede utilizarse para generar un código de ensanchamiento de longitud finita X_1, X_2, \dots mediante la ecuación siguiente:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j > 0,5 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (5)$$

Sin embargo, lo que se pretende es generar una secuencia caótica basada en el mapa de tienda de campaña, pero implementada mediante álgebra binaria (semejante a las implementaciones de registro de desplazamiento con retroalimentación lineal estándar). La presente propuesta de generación del mapa de tienda de campaña consiste en diseñar un generador de códigos de ensanchamiento basado en LFSR, transformarlo en una aproximación del mapa de tienda de campaña (o LFSR extendido, es decir, e-LFSR) [5] y finalmente verificarlo trazando un gráfico del resultado de la representación decimal, de manera similar al procedimiento descrito en el documento [5]. Basándose en el último procedimiento, se ha generado y simulado un conjunto preliminar de secuencias caóticas de longitud 10.230 mediante un algoritmo que toma como entrada el grado de registro de desplazamiento de un e-LFSR y un estado inicial aleatorio del registro de desplazamiento.

La figura 4 (derecha) ilustra el histograma de autocorrelación par de un conjunto preliminar de 50 códigos de mapa de tienda de campaña de una longitud 10.230, generado al azar basándose en el procedimiento anterior, a la frecuencia Doppler cero. El histograma del lado izquierdo de la figura 4 representa la autocorrelación par de los códigos E5a-I. Como se puede observar, los códigos de mapa de tienda de campaña presentan un rendimiento de autocorrelación mejor por una ganancia de alrededor de 4,5 dB. Este resultado refleja el hecho de que los nuevos códigos son buenos de manera individual, pero no conjunta. Para evaluar el rendimiento mutuo entre los códigos, a continuación se analiza el histograma de correlación cruzada.

La figura 5 (izquierda) representa el histograma de correlación cruzada par del conjunto basado en el mapa de tienda de campaña generado previamente. La figura derecha representa la función de correlación cruzada entre dos códigos seleccionados al azar de este conjunto. Como puede observarse, aparecen valores de correlación cruzada elevados e inadmisibles que reflejan la elección arbitraria de códigos realizada en primer lugar. Más particularmente, la correlación cruzada entre estos códigos presenta un patrón aproximadamente similar con un valor dominante de correlación cruzada.

Este problema se supera mediante el procedimiento que se ha descrito anteriormente. En lo sucesivo, se presenta y describe una valoración de un nuevo conjunto de códigos de ensanchamiento diseñados para la banda E5, obtenido mediante el procedimiento y basado en dos códigos semilla generados con el conjunto de mapa de tienda de campaña. Se ha generado un conjunto de 50 códigos caóticos utilizando el procedimiento de la presente invención, basado en el mapa de tienda de campaña con una longitud de código de 10.230 chips. Los nuevos códigos ofrecen mejores resultados que los códigos Galileo E5a-I en numerosas pruebas, incluidos diversos cálculos de autocorrelación con respecto a un amplio rango de frecuencias Doppler y diversos criterios de selección que evalúan el rendimiento de seguimiento, adquisición y resistencia. La figura 6a representa la frecuencia máxima de aparición (MRO) de la autocorrelación par, y la figura 6b representa la correlación cruzada par de los nuevos códigos caóticos generados y las secuencias Galileo E5a-I, a la frecuencia Doppler cero (DF=0 Hz). El resultado deseado es desplazar todas las correlaciones desfasadas hacia el límite Welch tanto como sea posible y aumentar al máximo la distancia entre ellas y el pico de autocorrelación correspondiente al retardo cero. Como puede observarse, los nuevos códigos presentan curvas par/impar más cercanas al límite Welch que las curvas de los códigos E5a-I y presentan valores de correlación más bajos.

Para una comparación más completa, a continuación se trata acerca del procedimiento de selección completo descrito en el documento Phase C0 [2] y utilizado inicialmente para seleccionar los conjuntos de ensanchamiento para el sistema Galileo. Este proceso comprende cinco métricas diferentes y el factor de ponderación final de la banda E5 para el grupo de usuarios A2 descrito en el documento [12].

Tabla 2: valores de métrica de códigos E5a-I y el nuevo conjunto de códigos caóticos

Criterio	Factores de ponderación	Valor de métrica		Valor normalizado	
		Antiguo	Nuevo	Antiguo	Nuevo
AMEWSD _{MP}	9%	0,70986	0,68676	-1,65%	+1,65%
AMEWSD _{CT}	36%	0,71044	0,70796	-0,17%	+0,17%
AMF _{MP}	4,5%	4,102e-4	4,034e-4	-0,83%	+0,83%
AMF _{CT}	40,5%	1,00007	0,99998	-0,005%	+0,005%
AELW	10%	-2,83410	-2,77975	-0,97%	+0,97%

La tabla 2 representa los valores de métrica de los códigos de referencia Galileo E5a-I y el nuevo conjunto de

códigos caóticos, donde los factores de ponderación se determinan multiplicando los factores de ponderación del grupo de usuarios A2 por los correspondientes factores de ponderación de diafonía o de trayectorias múltiples. Como se puede observar en la tabla, el nuevo conjunto caótico ofrece mejores resultados que el anterior con respecto a las cinco métricas. El mejor resultado de los nuevos códigos se obtiene con los criterios AMEWSDmp con un incremento del 3,3 % respecto de los anteriores. El incremento más pequeño se obtiene con el factor AMF con un incremento absoluto del 0,01 %. Se calcula la métrica ponderada y los resultados se indican en la tabla 3. Dicha métrica se toma como última valoración para decidir qué conjunto de códigos se prefiere. Como puede observarse globalmente, basándose en el procedimiento de selección utilizado en el documento Phase C0, el nuevo conjunto ofrece mejores resultados que el anterior por un margen del 0,7 %.

Tabla 3: Comparación de resultados entre el conjunto E5a-I y el nuevo conjunto

Conjunto de códigos	Rendimiento
Conjunto Galileo E5a-I	-0,35 %
Nuevo conjunto de tienda de campaña	+0,35 %

Referencias

[1] D. Flachs, V. Oehler, S. Bouchired, E. E. Canalis, P. P. Muller-Remmers, M. Marinelli, H. De Gaujac, U. Gageur, y M. Falcone, "Galileo Signal In Space Interface Control Document (SIS-ICD), Ver. 10.1," Galileo Industries septiembre 28 2005.

[2] S. Wallner, "Consolidated Code Design (TN ID31)," Galileo Phase C0/CN001, 10 noviembre de 2004.

[3] V. Varadan y H. Leung, "Design of Piecewise Maps for Chaotic Spread-Spectrum Communications Using Genetic Programming," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 49, pp. 1543-1553, 2002.

[4] G. Mazzini, G. Setti, y R. Rovatti, "Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA - Part I: System modeling and results," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 44, pp. 937-947, 1997.

[5] D. Yoshioka, A. Tsuneda, y T. Inoue, "On Transformation between Discretized Bernoulli and Tent Maps," IEICE TRANS, Fundamentals, vol. E88-A, 2005.

[6] R. Rovatti, G. Setti, y G. Mazzini, "Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA - Part II: Some theoretical performance bounds," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 45, pp. 496-506, 1998.

[7] T. Kohda y A. Tsuneda, "Statistics of chaotic binary sequences," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 43, pp. 104-112, 1997.

[8] A. L. Baranovski, F. Dachsel, y W. R. "Nonlinear dynamics of PN-sequences," Proceedings of the 1ST Mobile & Wireless Communications Summit 2005, 2005.

[9] A. L. Baranovski, "On Generation of Chaotic M-Sequences," Proceedings of the International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), Bruges, Belgium, 2005.

[10] D. Yoshioka, A. Tsuneda, y T. Inoue, "An algorithm for the generation of maximal-period sequences based on one-dimensional chaos maps with finite bits," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E87-A, n° 6, pp. 1371-1376, junio de 2004.

[11] A. L. Baranovski y A. J. Lawrance, "Sensitive parameter dependence of autocorrelation function in piecewise linear maps," International Journal of Bifurcations and Chaos, 2006.

[12] F. Soualle, M. Soellner, S. Wallner, J.-A. Avila-Rodriguez, G. W. Hein, B. Barnes, T. Pratt, L. Ries, J. Winkel, C. Lemenager, y P. Erhard, "Spreading Code Selection Criteria for the future GNSS Galileo," Proceedings of the GNSS 2005, Munich, 2005.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de generación de un conjunto de códigos de ensanchamiento, que comprende las etapas siguientes:

determinar un primer y segundo códigos de ruido pseudoaleatorios caóticos, presentando dicho primer y segundo códigos funciones de autocorrelación de tipo pico delta, es decir, funciones de autocorrelación que adoptan un valor de 0 o próximo a 0 para todos los retardos diferentes de 0, y una función de correlación cruzada baja, es decir, una función de correlación cruzada que adopta un valor de 0 o próximo a 0 para todos los retardos;

estando caracterizado dicho procedimiento porque además unos códigos de ruido pseudoaleatorios adicionales son determinados realizando las etapas siguientes:

(a) generar un código de ruido pseudoaleatorio adicional calculando

$$D_k = F(C_1) + T^k C_2 + F(C_2),$$

en la que k representa un índice entero positivo, D_k representa el código de ruido pseudoaleatorio adicional que se genera, C_1 representa el primer código, C_2 representa el segundo código, F representa una función binaria basada en operaciones binarias básicas y T^k representa el operador que aplica un desplazamiento cíclico de k posiciones de chip al código;

(b) añadir el código D_k al conjunto de códigos de ruido pseudoaleatorios ya determinados si dicho código presenta una autocorrelación de tipo pico delta y funciones de baja correlación cruzada con los códigos de ruido pseudoaleatorios ya determinados;

(c) rechazar el código D_k si no se cumplen las condiciones para su adición al conjunto de códigos de ruido pseudoaleatorios determinados de la etapa (b);

(d) modificar el índice k y repetir las etapas (a)-(d) hasta que el número cardinal del conjunto de códigos de ruido pseudoaleatorios determinados alcance el número cardinal del conjunto de códigos de ensanchamiento que debe ser generado.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho primer código de ruido pseudoaleatorio caótico es determinado generando un conjunto preliminar de códigos de ruido pseudoaleatorios caóticos basados en un mapa caótico iterativo y seleccionando, como dicho primer código de ruido pseudoaleatorio caótico, el código de dicho conjunto preliminar que presenta la mejor función de autocorrelación de tipo pico delta de entre los códigos de dicho conjunto preliminar.

3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que dicho segundo código de ruido pseudoaleatorio caótico se determina seleccionando de dicho conjunto preliminar un código que presenta una autocorrelación de tipo pico delta y cuya correlación cruzada con dicho primer código de ruido pseudoaleatorio caótico presenta solo un pico predominante para un cierto retardo, en lo sucesivo designado con L, correspondiendo dicho retardo preferentemente a aproximadamente la mitad de la longitud del código, dando la vuelta a la posición de los primeros L chips del código seleccionado y manteniendo el resto de chips del código seleccionado.

4. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que dicho mapa caótico iterativo es un mapa de tienda de campaña o un mapa de desplazamiento dividido o un mapa de Bernoulli de n vías.

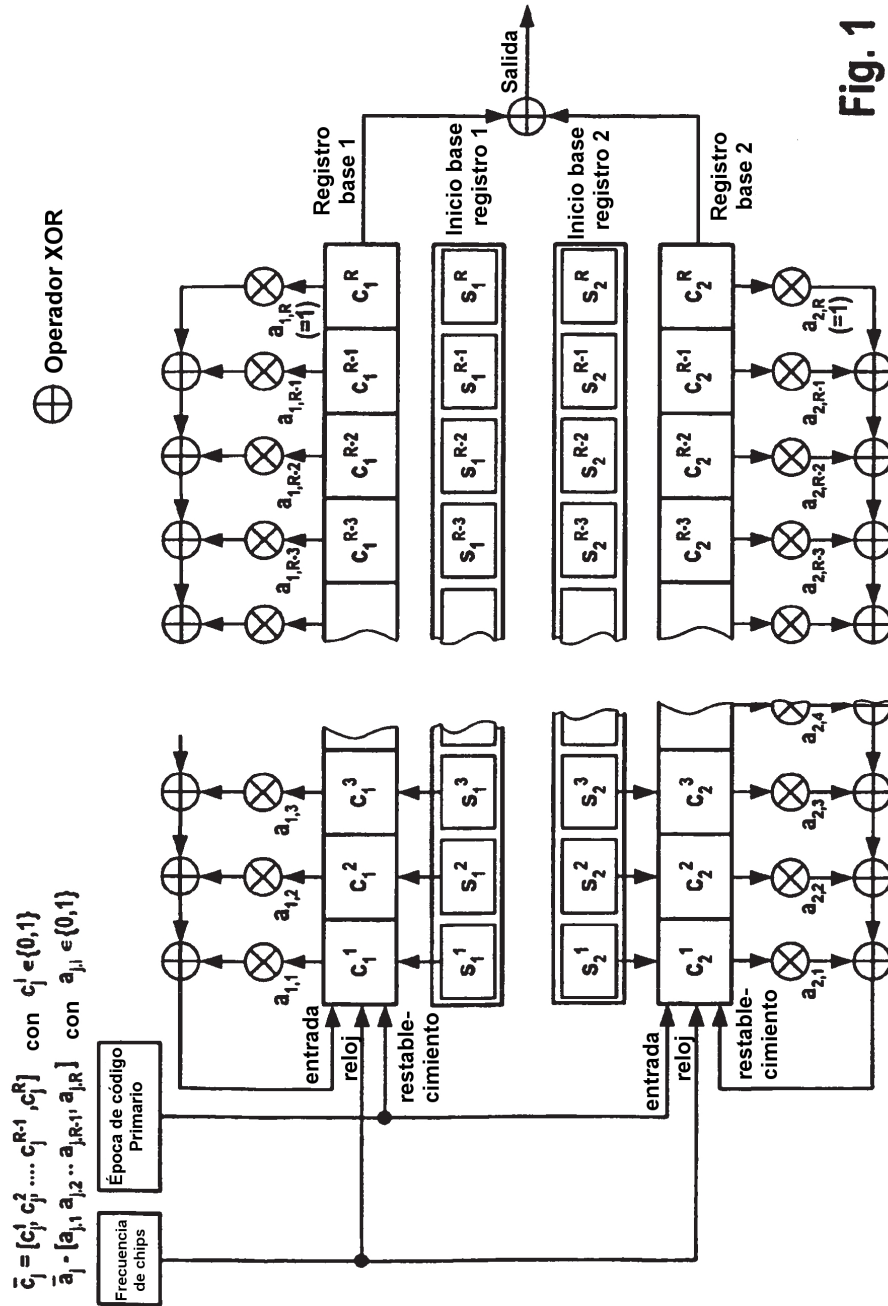
5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicha función binaria se basa en desplazar y/o dar la vuelta y/o invertir.

6. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la generación de dicho conjunto preliminar de códigos de ruido pseudoaleatorios caóticos comprende la emulación de dicho mapa caótico mediante un registro de desplazamiento con retroalimentación lineal extendido.

7. Soporte de almacenamiento que tiene almacenados un conjunto de códigos de ensanchamiento obtenidos a partir del procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.

8. Soporte de almacenamiento que tiene almacenadas instrucciones ejecutables por un ordenador para la implementación del procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.

9. Uso del conjunto de códigos de ensanchamiento obtenidos con el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 en un sistema CDMA o un sistema de navegación por satélite.



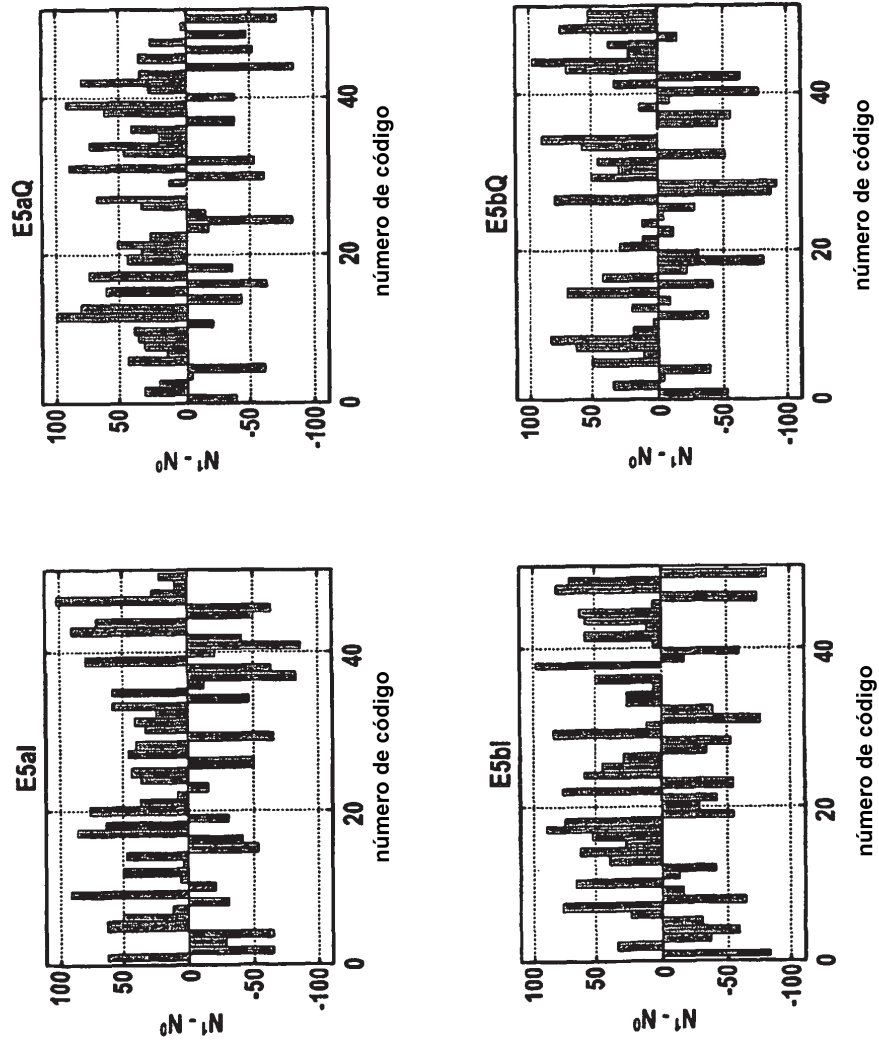
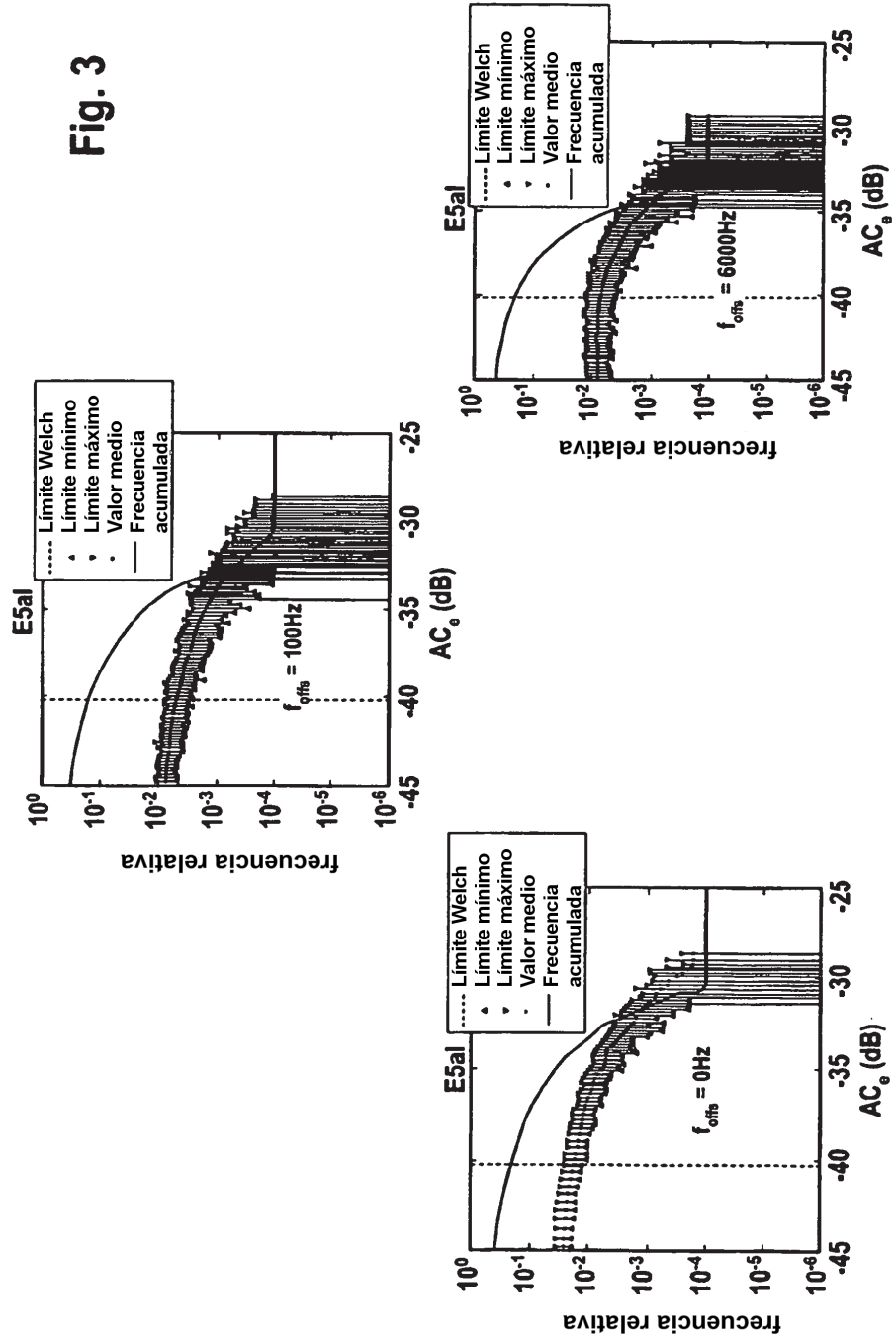


Fig. 2

Fig. 3



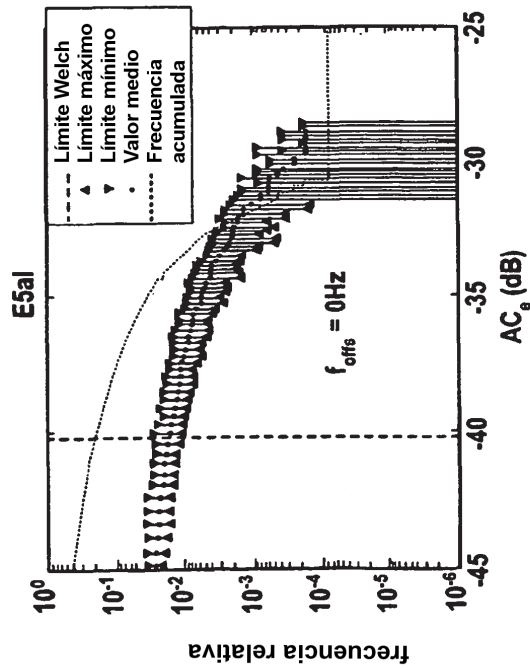
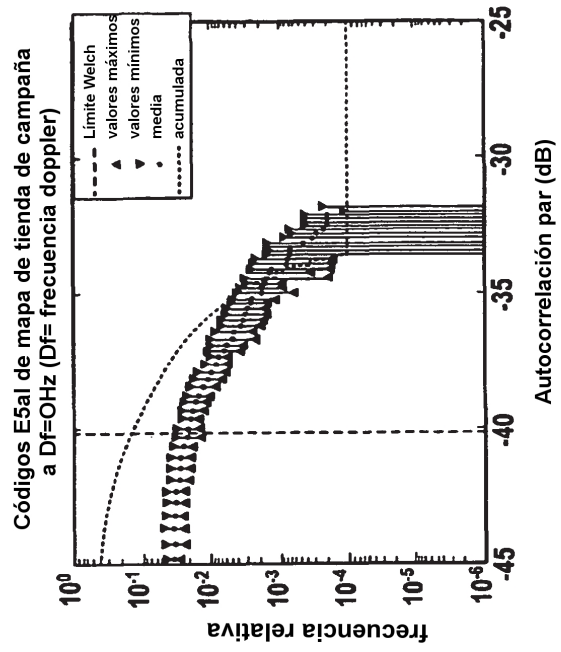


Fig. 4

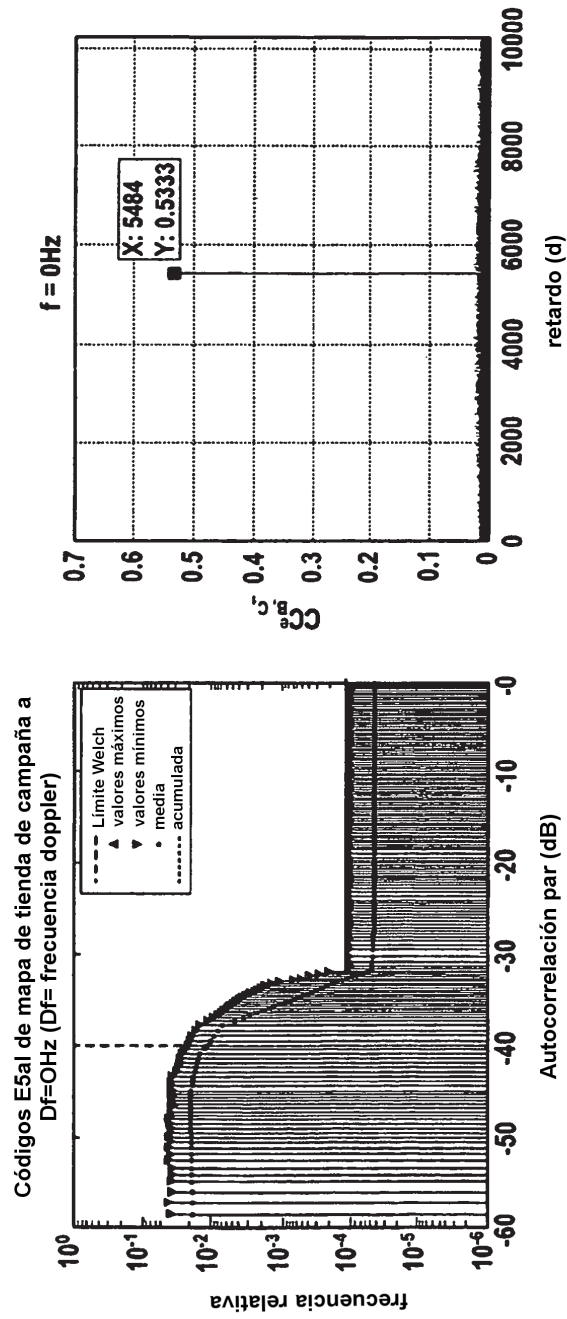


Fig. 5

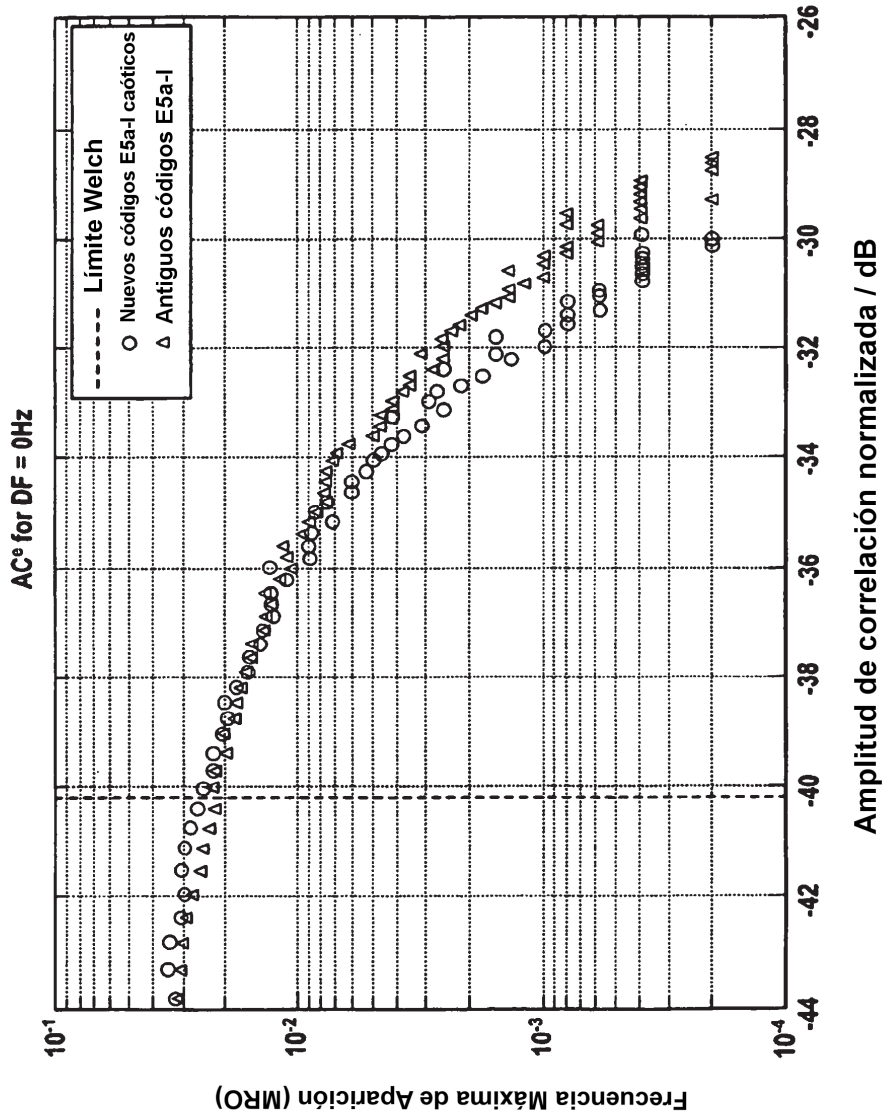


Fig. 6a

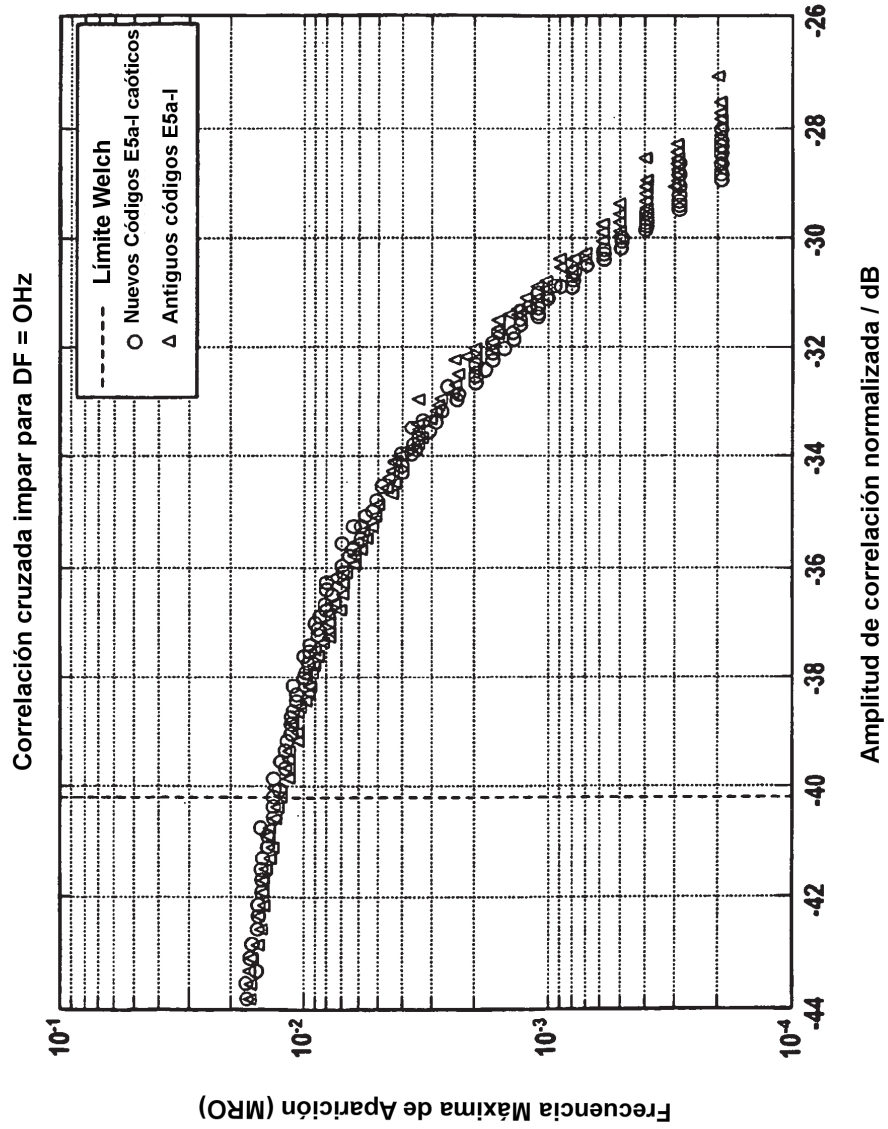


Fig. 6b

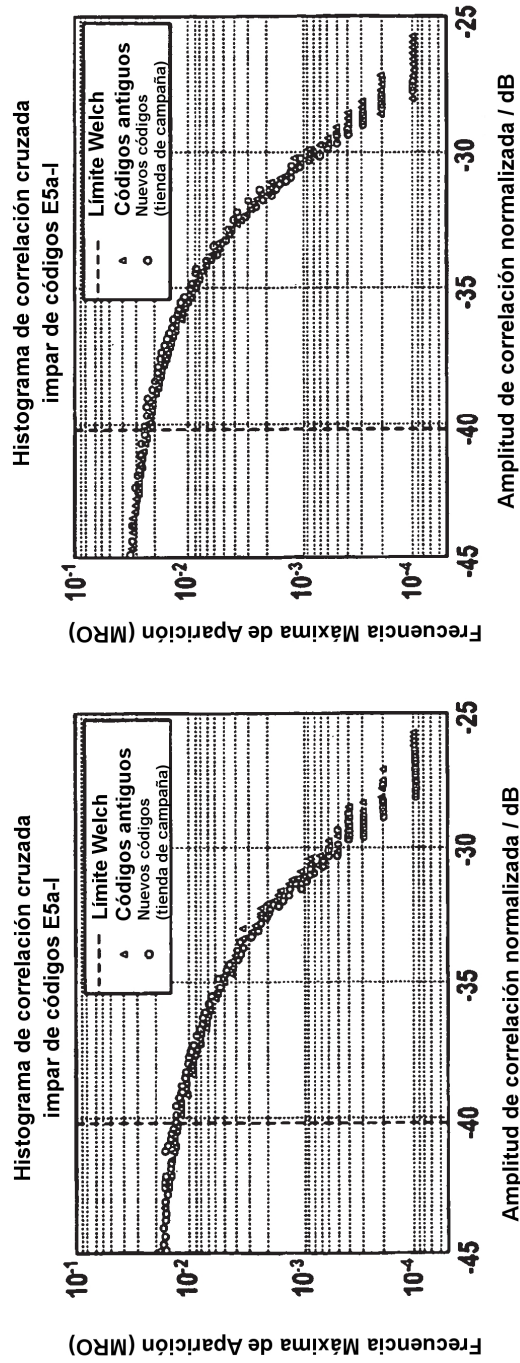


Fig. 7

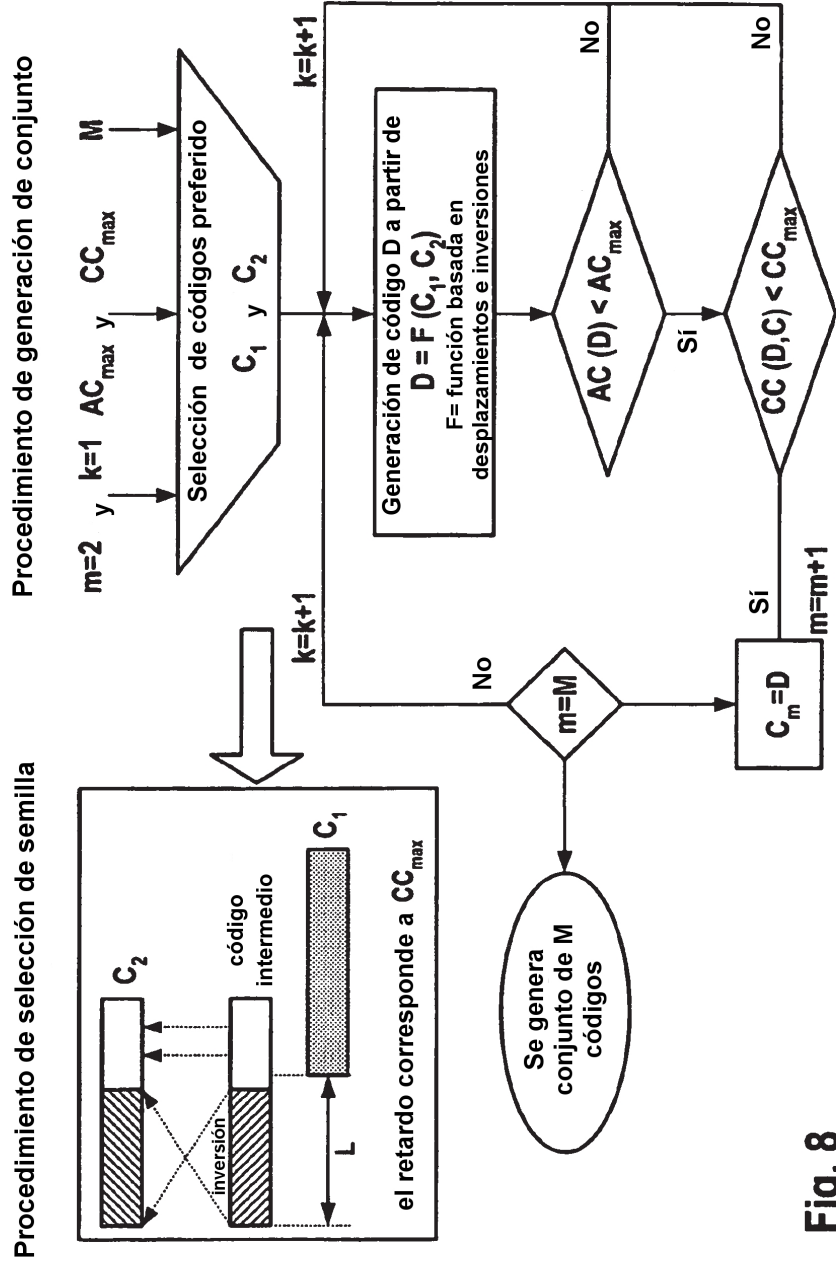


Fig. 8