|  |
| --- |
| **Recomendación UIT-R TF.538-4**  **(07/2017)** |
| **Mediciones de la inestabilidad  de frecuencia y en el tiempo (fase)** |
| **Serie TF**  **Emisiones de frecuencias patrón**  **y señales horarias** |

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

# Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT‑R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT‑T/UIT‑R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT‑R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT‑T/UIT‑R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT‑R sobre este asunto.

|  |  |
| --- | --- |
| Series de las Recomendaciones UIT-R  (También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>) | |
| **Series** | Título |
| **BO** | Distribución por satélite |
| **BR** | Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión |
| **BS** | Servicio de radiodifusión (sonora) |
| **BT** | Servicio de radiodifusión (televisión) |
| **F** | Servicio fijo |
| **M** | Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos |
| **P** | Propagación de las ondas radioeléctricas |
| **RA** | Radio astronomía |
| **RS** | Sistemas de detección a distancia |
| **S** | Servicio fijo por satélite |
| **SA** | Aplicaciones espaciales y meteorología |
| **SF** | Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo |
| **SM** | Gestión del espectro |
| **SNG** | Periodismo electrónico por satélite |
| **TF** | **Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias** |
| **V** | Vocabulario y cuestiones afines |

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| ***Nota****: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la  Resolución UIT-R 1.* |

*Publicación electrónica*

Ginebra, 2018

© UIT 2018

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R TF.538-4

Mediciones de la inestabilidad de frecuencia y en el tiempo (fase)

(1978-1990-1992-1994-2017)

Cometido

Las inestabilidades de frecuencia y de fase pueden caracterizarse con procesos aleatorios que pueden representarse estadísticamente en el dominio de la frecuencia de Fourier o en el dominio del tiempo. En esta Recomendación, se presentan varios métodos y técnicas para la caracterización de estas inestabilidades de frecuencia y de fase.

Palabras clave

Inestabilidades aleatorias, varianza de Allan, metrología del tiempo, medidas estadísticas, fase, frecuencia

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

*a)* que conviene utilizar un lenguaje apropiado para expresar las características de inestabilidad de los generadores de frecuencias patrón y señales horarias y los sistemas de medida;

*b)* que la medida de la varianza clásica no converge en algunos tipos de inestabilidades aleatorias de frecuencia y en el tiempo;

*c)* que los principales laboratorios, observatorios, industrias y usuarios han adoptado ya determinadas Recomendaciones del Comité Técnico sobre Frecuencia y Tiempo de la Sociedad de Instrumentación y Medición del IEEE y la existencia de la Norma N.° 1139-2008 del IEEE sobre «Definiciones fundamentales normalizadas por el IEEE de cantidades físicas para la metrología de la frecuencia y del tiempo – Inestabilidades aleatorias»;

*d)* que las mediciones de inestabilidad de frecuencia y en el tiempo deben basarse en principios teóricos sólidos, fáciles de aplicar y de interpretar;

*e)* que es conveniente disponer de medidas de inestabilidad de frecuencia y en el tiempo que puedan obtenerse con equipos sencillos,

recomienda

**1** que las inestabilidades aleatorias de las frecuencias patrón y señales horarias se caractericen por las medidas estadísticas *Sy*( *f* ), *S*( *f* ) o *Sx*( *f* ), en el dominio de la frecuencia, y por *y*(), Mod. *y*(,), *x*(*t*,) y TheoBR en el dominio del tiempo como se define a continuación:

**1.1** la medida de las inestabilidades de frecuencia normalizadas *y*(*t*) en el dominio de la frecuencia es *Sy*( *f* ), es decir, la densidad espectral unilateral (0 < *f* < ) de las inestabilidades de frecuencia normalizadas *y*(*t*) = (**(*t*) – **0)/**0; donde **(*t)* es la frecuencia portadora instantánea y **0 la frecuencia nominal;

**1.2** la medida de las inestabilidades de fase (*t*) en el dominio de la frecuencia es *S*( *f* ), es decir, la densidad espectral unilateral (0 < *f* < ) de las inestabilidades de fase (*t*) para una frecuencia de Fourier *f* ;

**1.3** la medida de las inestabilidades de fase expresadas en unidades de tiempo (fase-tiempo) *x*(*t*)) en el dominio de la frecuencia es *Sx*( *f* ); es decir, la densidad espectral unilateral (0  *f*  ) de las inestabilidades de fase-tiempo expresadas en unidades de tiempo *x*(*t*), donde *x*(*t*)  (*t*) / 2 **0; *x*(*t*) está relacionada con to *y*(*t*) mediante la expresión *y*(*t*)  d*x*(*t*)/d*t*;

**1.4** las relaciones entre estas densidades espectrales se dan a continuación:

(1)

Las dimensiones de *Sy*( *f* ), *S*( *f* ) y *Sx*( *f* ) son respectivamente: Hz–1, Rad2 Hz–1 y s2 Hz–1;

**1.5** la medida de las inestabilidades de frecuencia normalizadas *y*(*t*) en el dominio del tiempo es la desviación típica de dos muestras, *y*(), y la desviación típica modificada de dos muestras, Mod. *y*() y la varianza de TheoBR, como se define en el Anexo 1;

**1.6** la medida de las inestabilidades de las señales horarias en el dominio del tiempo es *x*() que se define en el anexo 1;

**1.7** la medida de las variaciones de las inestabilidades de frecuencia normalizadas *y*(*t*) en el dominio del tiempo es la desviación típica de dos muestras, σ*y*(*t*,τ) definida en el Anexo 1;

**2** que, al establecer las medidas estadísticas de inestabilidad de frecuencia y en el tiempo deben reconocerse los fenómenos no aleatorios, como por ejemplo:

**2.1** debe indicarse toda dependencia del tiempo observada en las mediciones estadísticas;

**2.2** debe especificarse el método de medición de los comportamientos sistemáticos (por ejemplo: se ha obtenido una evaluación de la deriva lineal de frecuencia a partir de los coeficientes de una regresión lineal según el método de mínimos cuadrados, con *M* mediciones de frecuencia, efectuándose cada una con una promediación especificada o un intervalo de muestra  y una anchura de banda *fh*);

**2.3** deben indicarse las sensibilidades frente a las condiciones ambientales (por ejemplo: la dependencia de la frecuencia y/o de la fase en función de la temperatura, del campo magnético, de la presión barométrica, etc.);

**3** que, al presentar una medida de inestabilidad de frecuencia y en el tiempo, deben especificarse todos los parámetros pertinentes de la medición:

**3.1** el método de medición;

**3.2** las características de la señal de referencia;

**3.3** la frecuencia nominal *v*0 de la señal;

**3.4** la anchura de banda *fh* del sistema de medición y la correspondiente respuesta del filtro de paso bajo;

**3.5** la duración total de la medición o el número de mediciones *M*;

**3.6** las técnicas de cálculo (por ejemplo, detalles sobre las ventanas de retardo para los cálculos de las densidades espectrales de potencia a partir de los datos en el dominio del tiempo, o la estimación del efecto del tiempo muerto en la evaluación de la desviación típica de dos muestras *y*());

**3.7** la confianza de las estimaciones;

**4** que se proporcione una ilustración gráfica o una expresión analítica de las medidas de las inestabilidades de frecuencia y en el tiempo, y que se incluyan los intervalos de confianza cuando proceda (es decir, *Sy*( *f* ), *S*( *f* ) y *Sx*( *f* ) en función de *f* , *y*(), Mod. *y*() y *x*() en función de , y/o σ*y*(*t*,τ) como función de *t* y ).

Anexo 1  
  
Caracterización del ruido de frecuencia y de fase

# 1 Definición de términos

Las inestabilidades de frecuencia y de fase pueden caracterizarse por procesos que pueden representarse estadísticamente en el dominio de la frecuencia de Fourier o en el dominio del tiempo. La desviación instantánea normalizada de frecuencia *y*(*t*) respecto de la frecuencia nominal **0 está relacionada con la fluctuación instantánea de fase (*t*) en torno a la fase nominal 2 **0 *t* por:

(2)

donde *x*(*t*) es la variación de fase expresada en unidades de tiempo.

# 2 Dominio de la frecuencia de Fourier

En dominio de la frecuencia de Fourier, la inestabilidad de frecuencia puede definirse por varias densidades espectrales unilaterales (la frecuencia de Fourier varía de 0 a ) tales como:

Estas densidades espectrales se relacionan entre sí mediante las ecuaciones:

(3)

(4)

(5)

Como modelos razonables de las fluctuaciones aleatorias en osciladores de precisión suelen emplearse densidades espectrales con una ley de potencias. En la práctica se ha observado que en el caso de muchos osciladores estas fluctuaciones están constituidas por la suma de cinco procesos de ruido independientes y, con algunas limitaciones, la siguiente ecuación es válida:

(6)

donde los *h* son constantes, los  son enteros, y *fh* es la frecuencia de corte de un filtro de paso bajo. Las ecuaciones (3), (4) y (5) son correctas y consecuentes en caso de ruidos estacionarios, incluido el ruido de fase. La divergencia en alta frecuencia se suprime por los límites introducidos en la ecuación (6). Los cinco procesos de ruido están caracterizados en el cuadro 1 y se representan en la fig. 1. En la práctica, solamente dos o tres procesos de ruido suelen ser suficientes para describir las fluctuaciones aleatorias de frecuencia de un oscilador determinado, los otros pueden despreciarse.

# 3 Dominio del tiempo

La inestabilidad aleatoria de frecuencia en el dominio del tiempo puede definirse a través de la varianza de varias muestras. La raíz cuadrada de la varianza de una muestra se denomina desviación, y es la estadística generalmente utilizada.

A Desviación de Allan *y*()

Una medida de la inestabilidad aleatoria de frecuencia es la desviación típica de dos muestras que es la raíz cuadrada de la varianza de dos muestras cuando el tiempo entre mediciones sucesivas es cero definida por:

(7)

donde:

y *tk*  1  *tk*   (muestras adyacentes)

< > denota un promedio en un intervalo infinito. La medición escrita en la ecuación (7) se denomina a menudo la varianza de Allan (AVAR). *xk* y *xk* + 1 son los valores de mediciones residuales de tiempo realizadas en los tiempos *tk* y *tk*  1  *tk*  , con *k*  1, 2, ..., y 1/ es la frecuencia de muestreo fijada que asegura un tiempo muerto nulo entre las mediciones de frecuencia. Por «residuales» se entiende que se han eliminado los efectos sistemáticos conocidos.

Si la frecuencia de muestreo inicial se especifica como 1/0, entonces se ha demostrado que en general se puede obtener una estimación más eficaz de *y*() utilizando lo que se denomina «estimaciones con solape». Esta estimación se obtiene utilizando la ecuación (8).

(8)

donde *N* es el número de mediciones de los comienzos de las señales de tiempo originales espaciadas 0 (*N*    *M* + 1, donde *M* es el número de mediciones de frecuencia originales correspondientes al tiempo de muestreo 0) y   *n* 0.

Si existe un tiempo muerto entre las mediciones de comienzo de las frecuencias y éste se ignora al calcular la ecuación (7) se ha demostrado que los valores de estabilidad resultante (que ya no serán las varianzas de Allan), presentarán una desviación sistemática (excepto para el ruido blanco de frecuencia) puesto que las mediciones de la frecuencia se reagrupan para calcular la estabilidad para *n* 0 (*n*  1). Esta desviación se ha estudiado y se han publicado algunas tablas para su corrección.

Si no existe un tiempo muerto, entonces los  originales pueden combinarse para crear un conjunto de *k*:

CUADRO 1

Características funcionales de cinco procesos de ruido independientes  
para inestabilidad de frecuencia de los osciladores

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Descripción del proceso  de ruido | Características de pendiente de la curva log log | | | | |
| En el dominio de la frecuencia | | En el dominio del tiempo | | |
| *Sy*( *f* ) | *S*( *f* ) o *Sx*( *f* ) | () | Mod. () | () |
|  |    – 2 |  |  |  |
| Ruido de frecuencia de marcha aleatoria | –2 | – 4 | 1 | 1 | 3 |
| Ruido de centelleo de frecuencia | –1 | –3 | 0 | 0 | 2 |
| Ruido blanco de frecuencia | 0 | –2 | –1 | –1 | 1 |
| Ruido de centelleo de fase | 1 | –1 | –2 | –2 | 0 |
| Ruido blanco de fase | 2 | 0 | –2 | –3 | –1 |
| *Sy*( *f* )  *h* *f*  = –  – 1, –2    2 ()   *S*( *f* )  *h* *f* – 2  *h* *f*    – 2;      Mod. ()   *Sx*( *f* )    –  – 1 ()  | | | | | |



FIGURE 1/TF.538...[D01] = 18 CM

Así puede obtenerse una «estimación con solape» de *y*():

(9)

Así pues, es muy simple determinar la dependencia de *y*() como función de  a partir de un solo conjunto de datos.

Una curva de *y*() en función de  para un patrón de frecuencia, típicamente presentaría la forma indicada en la fig. 1. La primera parte, en donde *y*()  –1/2 (ruido de frecuencia «blanco») y/o *y*()  –1 (ruido de fase «blanco» o de «parpadeo») reflejan las características de ruido fundamentales del patrón de frecuencia. En el caso en que *y*()  –1, no resulta práctico decidir si el oscilador es perturbado por el ruido de fase blanco o por el ruido de parpadeo.

Se sugieren algunas técnicas alternativas más abajo. Esto impone una limitación en la utilidad de *y*() para el estudio de la naturaleza de las fuentes de ruido existentes en el oscilador. Un análisis en el dominio de la frecuencia es más adecuado cuando se trata de frecuencias de Fourier mayores que 1 Hz aproximadamente. Esta ley –1 y/o –1/2 continúa, a medida que se aumenta el tiempo de promediación, hasta que se alcanza el denominado «nivel de parpadeo» (flicker «floor»), donde *y*() es independiente del tiempo de promediación . Este comportamiento se observa en casi todos los patrones de frecuencia; dicho comportamiento depende del patrón de frecuencia de que se trate, y no se entiende plenamente su significado físico. Ejemplos de causas probables para el «nivel» de parpadeo son las fluctuaciones de la fuente de alimentación, las fluctuaciones del campo magnético, los cambios en los componentes del patrón y variaciones en la potencia de microondas. Por último, la curva muestra una degradación de la estabilidad con el aumento del tiempo de promediación. Esto ocurre típicamente para tiempos de horas o días, según la clase particular del patrón de frecuencia.

B Desviación de Allan modificada Mod. y()

Se ha desarrollado una «varianza de Allan modificada, (MVAR)», Mod. , que tiene la propiedad de establecer dependencias diferentes de  para el ruido blanco de fase y para el ruido de centelleo de fase. Estas dependencias para la «desviación de Allan modificada (MDEV)», Mod. *y*(), son –3/2 y –1 respectivamente. El valor de Mod. *y*( se estima tomando el valor de la raíz cuadrada de la siguiente ecuación:

(10)

donde:

*N*: número original de mediciones de variación de tiempo separadas por 0, y

  *n* 0, tiempo de muestreo elegido.

En otros textos técnicos se analizan las propiedades y la confianza de la estimación. Se han desarrollado métodos de máxima verosimilitud para la estimación de *y*() para los modelos específicos del ruido blanco de frecuencia y el ruido aleatorio de frecuencia. Se ha demostrado que ambos modelos son útiles para tiempos de muestreo superiores a algunos segundos para los patrones de frecuencia de haz de cesio.

C Desviación del tiempo *x*()

La inestabilidad del tiempo en el dominio temporal para los cinco procesos de ruido independientes de la Fig. 1 puede medirse utilizando la segunda diferencia de los promedios de los tiempos adyacentes. Esta medida se relaciona también con Mod. .

(11)

(12)

siendo (d*x*/d*t*)  *y*, y   *n* 0. Por tanto, *x*() es la desviación del tiempo (TDEV); los corchetes «» indican un promedio de tiempo infinito y la barra «–» sobre la *x* indica un promedio a lo largo de un intervalo . Los tres promedios utilizados en la ecuación de la segunda diferencia son adyacentes. Por tanto, para un valor determinado de *k* en la segunda diferencia, estos promedios ocupan un espacio de 3.

Las relaciones de la varianza del tiempo y la densidad espectral son las siguientes:

(13)

Como los tipos habituales de ruido medido están centrados alrededor de   0, TVAR obtiene una dependencia casi nula de  (un hecho deseable para una buena medida). Otras características útiles de esta medida son:

– es igual a la clásica desviación típica de las mediciones de diferencia de tiempo para  = 0, para una modulación de fase blanca (WPM, *white phase modulation*);

– es igual a la desviación típica de la media de las mediciones de diferencia de tiempo para  = *N* 0 (la longitud de los datos), una modulación WPM;

– es convergente y muestra un buen comportamiento para los procesos aleatorios que se producen generalmente en la metrología del tiempo y la frecuencia;

– la dependencia de indica que el modelo de densidad espectral de la ley de potencia es adecuado para los datos;

– la amplitud de *x*() a un valor particular de , junto con la hipótesis de uno de los cinco modelos de densidad espectral de la ley de potencia (  – 4, –3, –2, –1, 0), ofrece información suficiente para estimar el nivel correspondiente en el dominio de frecuencias para cualquiera de las mediciones de densidad espectral normales.

Se ha estudiado el problema de la estimación de la estabilidad de distintos relojes independientes, basándose en mediciones comparativas, y se ha propuesto un modelo general y coherente para tratar las mediciones de la diferencia entre señales, sin necesidad de suponer a priori una ausencia de correlación entre los relojes.

D Desviación de Allan dinámica *y*(*t*,τ)

La desviación de Allan dinámica (DADEV) es una medida de las variaciones de la inestabilidad aleatoria de la frecuencia en el dominio del tiempo, y es la raíz cuadrada de la varianza de Allan dinámica (DAVAR); definida por:

(14)

donde indica el valor esperado que se obtiene como media de un conjunto en un número infinito de experimentos, y *Tw* es la longitud de la ventana de análisis. Una estimación de DAVAR puede calcularse con:

(15)

donde , , , y se asume que es par.

La evidencia experimental muestra que la inestabilidad de los relojes y los osciladores, cuya medida normal es la varianza de Allan, puede cambiar con el tiempo debido a diferentes factores, como la temperatura, la humedad, las vibraciones, los efectos gravitacionales y las radiaciones. La varianza de Allan dinámica (DAVAR) mide estas variaciones de la inestabilidad del reloj en el tiempo.

La Figura 2 muestra la desviación media de frecuencia de un ruido blanco de frecuencia cuya varianza se incrementa de repente. La DAVAR, cuya raíz cuadrada se muestra en la superficie de trama del gráfico, representa el cambio de la varianza en el ruido, mientras que la varianza de Allan, cuya raíz cuadrada se muestra en la curva lateral, promedia el cambio de varianza.

FigurA 2

Varianza de Allan dinámica (DAVAR) de un cambio de varianza (superficie de trama)



E Estimador a largo plazo TheoBR

Un estimador a largo plazo de la varianza de Allan (AVAR) es la varianza teórica #1 (Theory variance #1), también conocida como Theo1 y que, con la desviación eliminada, se conoce como la varianza TheoBR, que es una Theo1 donde se ha eliminado la ligera desviación relativa a la AVAR de la muestra. Theo1 promedia el cuadrado de todas las segundas diferencias admisibles de los errores de tiempo *xi* de una serie de datos concretos *Nx* e indica la estabilidad de frecuencia un 50% más larga que la τ más larga posible de la AVAR. Por lo tanto, Theo1 y TheoBR representan un nuevo tipo de estadísticas descriptivas con substancialmente más grados de libertad equivalentes que la versión solapada de la AVAR de la muestra.

Definición de Theo1

(16)

La desviación de Theo1, denominada Theo1-dev, no tiene desviación respecto de la desviación de Allan para ruido blanco de MF. Theo1 tiene una ligera desviación para otro tipo de ruidos. Esta desviación puede eliminarse automáticamente utilizando un algoritmo que calcula la desviación media entre Theo1 y la varianza de Allan en una zona de solapamiento de τ de las dos y lo utiliza para corregir Theo1. Por lo tanto, se tiene:

(17)

donde \*AVAR y \*Theo1 se calculan para un rango de donde Theo1 y la AVAR de muestra se solapan y se eligen de manera a representar la desviación con τ grande para la AVAR y no para τ pequeños. La corrección de la desviación es una constante que no depende de τ.

Definición de TheoBR

(18)

Definición de TheoH

La varianza teórica híbrida, conocida como varianza TheoH, es una estadística híbrida (de ahí la «H») que combina valores de la versión solapada de la AVAR a corto plazo y la varianza TheoBR para estimar la estabilidad de la frecuencia a largo plazo, a partir de 3/4 de la longitud de la serie de datos *Nx*, que, como se ha indicado, es un 50% más larga que la longitud de datos utilizables por la AVAR.

(19)

donde es , y la tiene suficiente fiabilidad.

El límite superior habitual de τ de la AVAR es un 20% del tiempo *T* de la serie de datos. Como TheoBR requiere más capacidad de computación que la AVAR, solo se incluyen valores altos de *m* en la definición anterior, no todos los valores de *m*. Normalmente, no es necesario calcular todos los valores de *m*; son suficientes amplitudes de octavas o décadas de *m* para caracterizar el ruido aleatorio. Para definir la AVAR a partir de valores de TheoBR, se inserta intencionalmente un pequeño intervalo para pero puede rellenarse si uno quiere calcular más valores de *m*, o todos sus valores.

La raíz cuadrada de la varianza de TheoH es la desviación de TheoH, denominada TheoH-dev.

# 4 Conversión entre los dominios de la frecuencia y del tiempo

En general, si se conoce la densidad espectral de las fluctuaciones de la frecuencia normalizada *Sy*( *f* ) puede calcularse la varianza de dos muestras como sigue:

(20)

(21)

y:

(22)

Concretamente, para el modelo de ley de potencia dado para la ecuación (6), la medida en el dominio del tiempo sigue también esta ley de potencia derivada de las ecuaciones (6) y (11).

(23)

Los valores de *h* son característicos de la inestabilidad de frecuencia del oscilador. Se puede señalar que, para valores enteros (como parece, suele ser el caso),

  –  – 1 para – 3    1

  – 2 para – 3    1

donde:

Se han verificado esas conversiones experimentalmente y por cálculo. En el cuadro 2 figuran los coeficientes de conversión de las medidas de inestabilidad de la frecuencia, del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia e inversamente.

CUADRO 2

Conversión de las medidas de inestabilidad de la frecuencia de las densidades espectrales   
en el dominio de la frecuencia, a su varianza en el dominio del tiempo, y viceversa   
(para 2 *fh*  1)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Descripción del  proceso de ruido | ()  | | *Sy* ( *f* )  | | *S* ( *f* )  | *Sx* ( *f* )  |
| Ruido de frecuencia de marcha aleatoria | *A*[ *f*  *Sy*( *f* )]  | | [  ()] *f* | | [  ()] *f* | [  ()] *f* |
| Ruido de centelleo de frecuencia | *B*[ *f* *Sy*( *f* )]  | | [ ()] *f* | | [ ()] *f* | [  ()] *f* –3 |
| Ruido blanco de frecuencia | *C*[ *f*  *Sy*( *f* )]  | | [ ()] *f* | | [ ()] *f* | [  ()] *f* –2 |
| Ruido de centelleo de fase | *D*[ *f*  *Sy*( *f* )]  | | [ ()] *f* | | [ ()] *f* | 0,89 [0 ()] *f* |
| Ruido blanco de fase | *E*[ *f*  *Sy*( *f* )]  | | [ ()] *f* | | [ (] *f* | [ ()] *f* |
|  | |  | |
| *B*  2 loge 2 | |  | |
| *C*  1/2 | |  | |

En la Fig. 1 (escalas logarítmicas para ambas coordenadas) se indican las características de pendiente de los cinco procesos de ruido independientes.

# 5 Límites de confianza de mediciones en el dominio del tiempo

Para un ruido de tipo gaussiano, el intervalo de confianza (o límite de error) de un valor determinado de *y*() obtenido a partir de un número finito de muestras, puede estimarse mediante la ecuación siguiente:

(24)

donde:

*M* : número total de mediciones utilizadas en el cálculo

 : definida en el punto anterior

2  1  0,99

0  0,87

–1  0,77

–2  0,75.

Como ejemplo, para un modelo gaussiano con *M*  100,  –1 (ruido de frecuencia de centelleo) y *y*( = 1 s)  10–12, puede expresarse:

(25)

que da:

(26)

Se ha definido también otro procedimiento modificado de estimación que incluye el establecimiento de un tiempo muerto entre pares de mediciones y que muestra la influencia de la autocorrelación de las fluctuaciones de frecuencias.

Los intervalos de confianza mencionados se aplican a las estimaciones sin solape. En el caso de las estimaciones con solape el intervalo de confianza es menor y puede calcularse.

La desviación que resulta de la aplicación de la varianza a dos muestras en intervalos de tiempo obtenidos por concatenación de varias mediciones sucesivas con tiempo muerto, se ha determinado en función del tipo de ruido. Este desvío puede ser significativo.

Se ha determinado el efecto de la naturaleza del filtrado analógico que limita la potencia de ruido de la señal considerada en torno a su frecuencia nominal, en particular en relación con el empleo de un filtro paso bajo en lugar de un filtro paso banda centrado en la frecuencia nominal.

Se han calculado los grados de libertad (d.f.) para «estimaciones con solape», derivados teóricamente y representados en espectros de ley de potencia para la estimación del intervalo de confianza de la desviación típica de dos muestras. El intervalo de confianza para la desviación típica de dos muestras *y*() es:

(27)

donde:

y : valores de percentiles para la distribución de  2

el signo «^» : varianza de dos muestras estimada o medida de un conjunto finito.

Para   2, la mejora de d.f. es aproximadamente *n* veces superior que la obtenida en la estimación sin solape. También se obtiene una mejora significativa para   1. Para   0, la relación de los grados de libertad es 2; para   –1 es 1,3 y para   –2 es 1,04.

# 6 Posibles aplicaciones erróneas de las medidas estadísticas

Las diferentes medidas estadísticas especificadas en este documento han sido creadas cada una para un objetivo concreto, y pueden no ser adecuadas para otros.

La desviación de Allan, la desviación de Allan modificada y la desviación del tiempo están basadas en segundas diferencias de *x*(*t*) y no son por lo tanto sensibles a un polinomio de primer grado. Sin embargo, la eliminación de un polinomio de segundo orden, o un orden mayor, puede reducir los valores para grandes .

Por lo tanto, si es necesario eliminar un polinomio de este tipo antes del cálculo de la estadística, se recomienda fuertemente utilizar medidas estadísticas que no son sensibles a la eliminación de la curva, como las que están basadas en diferencias de mayor orden de *x*(*t*). La clase de medidas estadísticas que utilizan diferencias de segundo orden, o de orden mayor, no son sensibles a la variación lineal de los datos.

Tanto las medidas en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo pueden dar resultados erróneos en presencia de datos con espaciados irregulares. En general, los huecos en los datos suponen información faltante. Algunos métodos para tratar estos datos utilizan la interpolación, otros asumen que los datos faltantes son cero y todos pueden provocar efectos de distorsión. Debe entenderse la manera en que el software trata los datos con espaciados irregulares.

# 7 Conclusión

Los métodos estadísticos para describir la inestabilidad de frecuencia y de fase y el correspondiente modelo de densidad espectral de ley de potencia son generalmente suficientes para describir la inestabilidad de los osciladores. La versión actual introduce métodos adicionales para tratar las inestabilidades que varían con el tiempo en el dominio del tiempo, y extiende el cálculo de la inestabilidad en el dominio del tiempo a una fracción mayor de la longitud de datos.

Las variaciones no aleatorias (determinísticas o sistemáticas) no están cubiertas por los métodos descritos. Estas pueden ser periódicas o monótonas. Las variaciones periódicas deberán analizarse mediante métodos conocidos de análisis armónico. Las variaciones monótonas se describen en términos de derivas lineales o de orden superior.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_