

APÉNDICE A

RUIDO EN MEDICIONES DE BAJA SEÑAL

A.1 Introducción

Todas las señales en ingeniería están normalmente contaminadas por algún tipo de ruido. En particular, dados los pequeños niveles de señal asociados a la aplicación que nos ocupa, el problema de separar el ruido se torna especialmente importante. Las mediciones de baja señal siempre involucran algún tipo de amplificación, y en consecuencia el ruido también se amplifica. Si no se toman precauciones especiales las señales débiles podrían perderse o enmascarse en el ruido; es decir, si la relación señal ruido fuera muy baja, el error sería tan grande que resultaría imposible realizar una medida confiable. Es por esta razón que es necesario conocer la naturaleza de las fuentes generadoras de ruido y encontrar la forma de aislarlas o minimizarlas.

Haremos un análisis de los problemas que suelen presentarse para conocer las posibles causas de interferencias que distorsionan el valor de una medida. En lo que sigue definiremos ruido y señal, plantearemos la importancia de elegir un transductor adecuado y estudiaremos los principales tipos de ruidos que nos interesa conocer para realizar esta medida. Aún cuando se reiteran conceptos introducidos en capítulos anteriores, aquí se ven esas ideas con mayor grado de profundidad.

A.2 Definiciones Generales

Ruido es cualquier variación temporal de alguno de los parámetros físicos observados, causada por la combinación de posibles procesos que puedan alterar el valor del parámetro, produciendo información no útil al observador acerca del evento a observar. En otras palabras, se llama ruido a cualquier señal que interfiera en la extracción de la señal a observar, distorsionando o modificando su naturaleza.

Señal es cualquier variación en el tiempo de alguno de los parámetros físicos que es causada por los procesos que pueden influenciar el valor del parámetro a observar; esa variación lleva la información que es útil para el observador.

Cuando a partir del cambio de algún parámetro de interés se desea generar una señal con el propósito de procesarla eléctricamente (amplificarla, filtrarla, registrarla, etc.) es necesario utilizar un transductor. Este dispositivo es capaz de captar de manera proporcional la perturbación física y de transformarla en una señal eléctrica, ‘traduciendo’ el fenómeno bajo observación a impulsos eléctricos. Estos dispositivos tienen resistencia, inductancia y capacitancia. Son sensores expuestos a variaciones de luz, temperatura, humedad, campos electromagnéticos, radiación, etc.. Los transductores tienen impedancia interna y todos aportan ruido a la medición.

Por lo tanto ruido es generalmente cualquier perturbación espuria o indeseable que tiende a enmascarar la señal que se pretende medir. Podemos distinguir varias clases de ruido: la de los ruidos “artificiales”, la de los “disturbios erráticos” que quedan fuera de nuestro control y ocurren irregularmente, y la del tipo debido a las “fluctuaciones espontáneas”. Los ruidos de origen artificial pueden ser debidos a la captación electromagnética de señales interferentes; pueden deberse a radiación originada en fuentes eléctricas (artefactos eléctricos, ignición, etc.); pueden ser captados a través de fuentes de alimentación, podrían ser señales espurias originadas por un modulador balanceado, perturbaciones mecánicas transformadas en disturbios eléctricos, (microfonismo), etc. Hay gran cantidad de ejemplos de tales disturbios espurios, pero todos ellos tienen en común la característica de poder ser eliminados o por lo menos reducidos al mínimo reubicando el sistema de comunicación, utilizando blindajes o circuitos de filtro, mejorando el diseño mecánico o eléctrico, etc.

En cuanto a los disturbios erráticos, a diferencia de los ruidos artificiales no tienen su origen en la actividad del hombre, ya que pueden deberse a tormentas atmosféricas eléctricas o a otras causas naturales. Los mismos pueden ser controlados mediante puestas a tierra y sistemas de protecciónn específicos para cada caso. Los disturbios erráticos pueden ser considerados también espontáneos, en cuanto a su origen, pero como no se hallan continuamente presentes, se les asigna una categoría aparte.

Aunque estos dos tipos de ruidos son muy importantes desde el punto de vista de la captación de una señal, los métodos de control de los mismos han sido ya ampliamente abordados por los estudios de ingeniería clásica, además de que la solución de los problemas en estos casos requiere la consideración de los factores externos involucrados en cada situación particular.

Por esta razón nos concentraremos especialmente en el estudio del tercer tipo, el de los ruidos debidos a las fluctuaciones espontáneas de tensión, o de corriente.

Las mismas ocurren de una manera general en el mundo físico y se deben, en última instancia, a la naturaleza discontinua o granular de la materia. Hay básicamente tres tipos de fluctuaciones espontáneas que afectan una medida, y que estudiaremos a continuación:

Ruido Térmico o Johnson: Es el ruido resultante del movimiento aleatorio de electrones debido a su agitación térmica.

Shot: Está causado por la variación aleatoria en la velocidad de los portadores discretos de carga en un camino conductor.

Ruido de Contacto o Flicker: Es inversamente proporcional a la frecuencia ($1/f$). Está asociado a sistemas que tienen portadores de carga limitados (huecos o electrones).

A.3 Ruido Térmico o Johnson

Los electrones libres en cualquier conductor poseen distintos valores de energía debido a la temperatura del conductor y están en continuo movimiento. Este movimiento es aleatorio y es causado por la agitación térmica. Esta agitación provoca pequeñas diferencias de tensión desarrolladas a lo largo del conductor. Son ligeras fluctuaciones de energía en torno a los valores más probables de la distribución, pero son suficientes para producir dicho potencial de ruido dentro del conductor.

El primero en estudiar experimentalmente el ruido térmico fue J. B. Johnson [1]-[2] en los Bell Laboratories, en 1928. En honor a ese trabajo es que también se conoce al

ruido térmico como ruido de Johnson. Al mismo tiempo, H. Nyquist, en base a termodinámica estadística clásica, demostró que la media cuadrática del ruido térmico de voltaje generado en una impedancia puede expresarse como:

$$\bar{v}_n^2 = 4kT \int_{f_1}^{f_2} R(f) df \quad (1)$$

donde:

\bar{v}_n^2 = valor medio cuadrático (rms) del ruido térmico comprendido en la banda de frec. de (f_1-f_2) , [v²]

k = constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23}$ (Joule/Kelvin))

T = temperatura absoluta de R [K]

$R(f)$ = componente resistiva de la impedancia a frec. "f" [Ω]

f = frecuencia [Hz]

Si la componente resistiva de la impedancia es independiente de la frecuencia, la ecuación anterior se reduce a:

$$\bar{v}_n^2 = 4kT \Delta f R \quad (2)$$

Donde el ancho de banda Δf está dado en Hertz.

Las dos ecuaciones anteriores indican que el voltaje medio cuadrático es infinito en el rango de frecuencia que va desde $f = 0$ hasta $f = \infty$. Sin embargo, esto no es correcto. A frecuencias extremadamente altas la mecánica estadística clásica deja de ser válida y las ecuaciones deben ser revisadas en base a la teoría cuántica. Sin embargo, estas ecuaciones sí son válidas para frecuencias menores que 6 THz [3].

Por tratarse de un valor elevado, no tiene sentido práctico analizar la existencia de frecuencias de corte. Para nuestro propósito puede suponerse que el espectro es plano e ilimitado, aunque por razones prácticas nos interesa trabajar con valores de frecuencias que están en el orden de los MHz. En analogía con la óptica donde el color 'blanco' está constituido por la suma de todos los colores, se denomina ruido blanco cuando la distribución en frecuencia del mismo abarca todo el espectro.

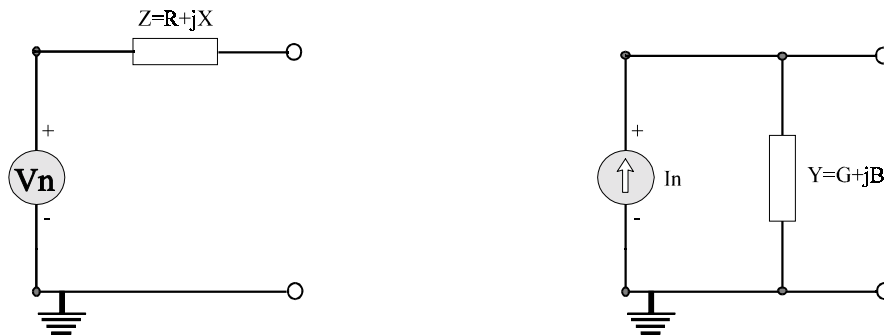
Nyquist [2] hizo la deducción original de la ecuación (2) basado en la termodinámica y suponiendo la temperatura en equilibrio, sin considerar la interacción

aleatoria entre los iones metálicos y los electrones de conducción. Aunque esta observación parece a primera vista injustificada, se trata en realidad de algo muy afortunado, pues usando los mismos razonamientos termodinámicos, puede demostrarse que cualquier dispositivo pasivo y lineal, sea eléctrico, electromecánico, etc. tiene asociado con él un ruido térmico de una u otra forma. En algunos casos esto puede ser debido a la agitación térmica de las moléculas del aire, en otros, a efectos eléctricos aleatorios en la ionosfera y la atmósfera, etc. Esto es así porque el término $\frac{1}{2}kT$ se presenta con carácter general en la termodinámica como la energía asociada con cada grado de libertad (cuando la temperatura aumenta, las moléculas de un sistema gaseoso se agitan más rápidamente, en el caso de las estructuras cristalinas es la vibración de los iones la que aumenta). Esa fue la base de la que partió Nyquist para deducir la ecuación.

Debido a este razonamiento, los resistores en la analogía eléctrica de cualquier dispositivo físico lineal y pasivo pueden ser considerados como fuentes de tensión de ruido, de acuerdo con la ecuación (2).

En la siguiente figura puede verse el circuito que representa una impedancia como fuente de ruido. La tensión de ruido térmico depende solamente del componente resistivo de la impedancia y es independiente del componente reactivo.

La ecuación (2) muestra que \bar{v}_n^2 por hertz es independiente de la banda de frec. particular en la cual se mide el ruido.



Aplicando el teorema de Norton, se puede hacer la representación equivalente de un generador de tensión de ruido térmico y puede reemplazarse por su circuito equivalente de corriente. La siguiente ecuación representa la magnitud del valor medio cuadrático de ruido.

$$\bar{I}_n^2 = 4kT \int_{f_1}^{f_2} G(f) df \quad (3)$$

Si la conductancia G de la impedancia Y es independiente de la frecuencia, entonces.

$$\bar{I}_n^2 = 4kT\Delta fG \quad (4)$$

La condición de máxima potencia de ruido transferida es cuando la impedancia de carga es el conjugado de la impedancia de fuente.

Con respecto a la potencia, la máxima que puede ser transferida desde un resistor en esas condiciones es:

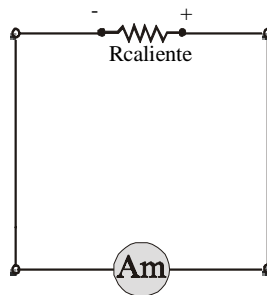
$$P_n = kT\Delta f \quad (5)$$

Esta potencia es el ruido de potencia disponible.

Para una temperatura dada, cualquier resistor tiene la misma potencia de ruido.

El siguiente ejemplo puede servir como ilustración:

Si tenemos dos resistores iguales, uno a temperatura ambiente y otro cerca del cero absoluto y están conectados en paralelo con cables de resistencia cero, la energía será transferida desde el resistor caliente al frío. Un amperímetro de resistencia cero, conectado entre los terminales del resistor caliente leerá una corriente de:

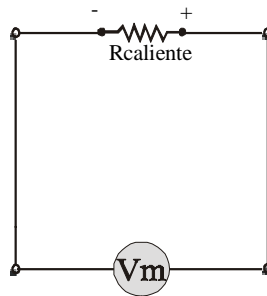


$$I_{Ncc} = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}} \quad (6)$$

en esta ecuación y en las que siguen *ca* y *cc* significan respectivamente *circuito abierto* y *cortocircuito*.

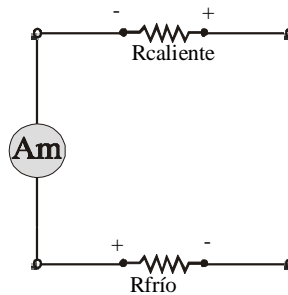
La corriente I_{Ncc} es la corriente de corto circuito dada por el movimiento de electrones en el resistor caliente causada por su energía térmica.

Si abrimos el circuito, hallamos el valor de la tensión.



$$E_{Nca} = I_{Ncc} \cdot R = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (7)$$

Conectando en serie el resistor frío con el caliente, la corriente de ruido que fluye entre los dos es:



$$I_N = \frac{E_{Nca}}{2R} = \sqrt{\frac{kT\Delta f}{R}} \quad (8)$$

El promedio de ruido transferido al resistor frío es:

$$W_N = I_N^2 R = kT\Delta f \quad (9)$$

la máxima potencia de ruido que puede ser transferida desde el resistor caliente al frío.

La potencia por ancho de banda puede ser escrita como:

$$\frac{\Delta W_N}{\Delta f} = kT \quad (10)$$

y si Δf se aproxima a cero entonces:

$$\frac{\partial W_N}{\partial f} = kT = w_N(f) \quad (11)$$

Esta función es la Densidad Espectral de Potencia. En este caso, es claramente independiente de la frecuencia. Estamos justificando aquí la razón de por qué el ruido térmico es *blanco* por analogía con la luz.

La distribución de frecuencia de la potencia de ruido térmico es uniforme. Para un ancho de banda especificado, cualquiera en el espectro, la potencia de ruido disponible es constante e independiente del valor de la resistencia. El valor rms para ruido térmico está bien definido, mientras que el valor instantáneo puede ser definido solamente en términos de probabilidad. La amplitud instantánea del ruido térmico tiene una distribución Gaussiana.

A.4 Ruido Shot

La corriente continua de un transistor o de un FET no es constante en todo instante. La corriente de emisor a colector, por ejemplo, está constituida por un flujo de electrones individuales o huecos y lo que es constante es el flujo medio. La fluctuación en el número de portadores es lo que se denomina efecto *shot* o *schottky*, en honor a W. Schottky [4], quien descubrió y mostró en 1918 la validez de la ecuación (12). Está

caracterizado por su distribución espectral uniforme con un amplio rango de frecuencias, similar al ruido térmico de las resistencias.

Se representa por las mismas ecuaciones:

$$\bar{v}_n^2 = 4kT \int_{f_1}^{f_2} R(f)df \quad (1)$$

$$\bar{v}_n^2 = 4kT\Delta fR \quad (2)$$

Haciendo un análisis similar al ruido térmico, la corriente de ruido de un elemento será:

$$I_N = \sqrt{2qI_0\Delta f} \quad (12)$$

donde q = es la carga del electrón.

I_0 = Promedio de corriente DC y Δf es el ancho de banda.

$$W_N = I_N^2 R = 2qI_0R\Delta f \quad (13)$$

$$\frac{\Delta W_N}{\Delta f} = 2qI_0R \quad (14)$$

$$\frac{\partial W_N}{\partial f} = W_N (f) = 2qI_0R \quad (15)$$

A.4.1 Ruido de Transporte

Los materiales semiconductores utilizados en transistores y diodos dan origen a distintos tipos de ruido debido a la naturaleza de los portadores discretos de carga. Los términos ruido shot y flicker son de la época de la tecnología de las válvulas o tubos de vacío.

Actualmente se intenta utilizar una terminología que distinga las diferentes causas de ruido en los dispositivos activos, los nombres son ruido de transporte, ruido de transición, ruido de modulación y ruido popcorn. Por lo tanto analizaremos con un enfoque actualizado estos tipos de ruido.

Cuando se transporta carga eléctrica, el carácter atómico de la electricidad se pone en evidencia porque la transferencia de los portadores de carga individual se manifiesta como pulsos definidos de corriente los cuales se distribuyen aleatoriamente en el tiempo. Esto es lo que causa la emisión catódica termoiónica (emisión de cátodo caliente) o el flujo de corriente a través de la unión de un semiconductor para mostrar pequeñas fluctuaciones, también es llamado *ruido shot*.

En tubos de vacío este fenómeno se conoce como *ánodo shot*, y *ruido shot* inducido de grilla, y más aún como ruido de partición si el cátodo emisor de corriente se divide en corrientes que fluyan hacia diferentes electrodos. En dispositivos semiconductores, la difusión de portadores a través de la unión se traduce en pulsos de corriente con una distribución aleatoria la cual tiene un efecto similar.

A.4.2 Ruido de Contacto

Este ruido se genera debido al contacto imperfecto entre dos materiales, lo que causa que el flujo de corriente no sea constante. Siempre que se unan dos conductores aparece este tipo de ruidos, como por ejemplo en interruptores y contactos de relays. Ocurre también en transistores y diodos debido a las imperfecciones del contacto o bien debido a las impurezas de la masa y superficie del cristal. En las resistencias de composición y dispositivos de naturaleza similar a los micrófonos de carbón los cuales están compuestos de pequeñas partículas moldeadas en una pieza.

Este tipo de ruido se conoce también por otros nombres, como ser *ruido de exceso* cuando se encuentra en resistencias. Cuando se observa en tubos o válvulas de vacío es referido como *ruido flicker*. Como tiene una única frecuencia característica se le llama también ruido $1/f$ o *ruido de baja frecuencia*. El ruido de contacto es directamente proporcional al valor de la corriente continua. La densidad de potencia varía con la inversa de la frecuencia $1/f$ y la distribución es Gaussiana. La expresión de la corriente de ruido I_f por raíz cuadrada de ancho de banda B puede ser enunciada aproximadamente por la siguiente ecuación [5].

$$\frac{I_f}{\sqrt{B}} \approx \frac{KI_{dc}}{\sqrt{f}}, \quad (16)$$

I_{dc} = Es el valor promedio de la corriente [A] .

f = frecuencia [Hz].

K = Constante que depende del tipo de material y de su geometría.

B = Ancho de banda [Hz], centrado en la frecuencia f .

Debe notarse que la magnitud del ruido de contacto puede hacerse muy grande a bajas frecuencias debido a su característica $1/f$. La mayoría de las teorías avanzadas que toman en cuenta la resistencia de contacto predicen que para algunos valores de baja frecuencia la amplitud del ruido se mantendría constante. Sin embargo se han realizado medidas de resistencia de contacto con frecuencias tan bajas como de unos pocos ciclos por día y aún siguió mostrando sus características $1/f$. Debido a su frecuencia característica, este tipo de ruido es usualmente la fuente más importante de ruido en circuitos de baja frecuencia.

A.4.3 Ruido de Transición

En un semiconductor, ocurren fluctuaciones de carga, estas son atribuidas a fluctuaciones espontáneas en la generación, recombinación y captura de portadores y por último, al ruido térmico de portadores en la banda de conducción. La influencia de estos efectos en el ruido de transistores y diodos en altas frecuencias puede ser analizada de una manera similar al ruido térmico en resistencias. A bajas frecuencias, las fluctuaciones de carga contribuyen al ruido *flicker* con una dependencia de la frecuencia que está relacionada con el promedio de vida de los portadores en el material semiconductor.

A.4.4 Ruido de Modulación

Las fluctuaciones en el flujo de corriente se deben a que la distribución de la densidad de los portadores de carga no es uniforme en todo un dispositivo semiconductor. Este fenómeno se produce en la superficie del cristal semiconductor y en la parte activa de la base, cercano a la juntura de emisor, relativamente lentas fluctuaciones crecen con el ruido $1/f$. Esto se da por el hecho de que cerca de la unión de

emisor la impedancia de la base depende de la corriente. Esta impedancia es real a frecuencias donde el ruido *flicker* domina. La resistencia de base puede ser considerada como si se dividiera en una parte modulada y otra no modulada. En la superficie, desaparecen los portadores que contribuyen a la conducción de corriente y las fluctuaciones en este proceso resultan en una corriente de ruido cuya dependencia es idéntica con aquella del *ruido shot* pero el espectro de frecuencia en esta es diferente.

A pesar de haber eliminado las fuentes externas que pudieran acoplar ruido a un circuito, hay un límite teórico de ruido que va a permanecer debido a las fuentes intrínsecas de ruido. Es posible medir y definir bien los valores rms de estas fuentes de ruido, pero los valores instantáneos solo puede predecirse en términos de probabilidad.

A.4.5 Ruido Popcorn

Podría traducirse como ruido de *rosetas de maíz*, se lo conoce también como *burst noise*, fue descubierto en la época de los primeros trabajos con diodos semiconductores. Debe su nombre al hecho de que si se amplificara este ruido y se colocara un parlante, el sonido que escucharíamos sería como el del estallido que producen las rosetas de maíz al cocinarse, con *ruido térmico* de fondo dando la idea de sonido de fritura, es por eso que se llama *popcorn noise* [6].

Este tipo de ruido, a diferencia de los anteriores se debe a defectos de fabricación, usualmente impurezas metálicas y la única manera de eliminarlo es mejorando las condiciones de fabricación. Este ruido es causado principalmente por impurezas en la unión de los dispositivos semiconductores. Si observamos en un osciloscopio la salida de un amplificador cuyos defectos de fabricación sean tales que se genere este tipo de ruido veremos lo siguiente: una línea base de ruido térmico, (ruido blanco) y sobre ella saltos discretos de una figura no periódica, varía entre unos cientos de pulsos por segundo a menos de un pulso por minuto. Generalmente el ancho varía entre los microsegundos y los segundos, pero para una muestra en particular, esto es un componente defectuoso, la amplitud del ruido es fija y es función de las características de la unión defectuosa. Un valor típico es una amplitud de 2 a 100 veces el ruido térmico.

La densidad de potencia del *burst noise* tiene una característica espectral de $1/f^n$, donde n es típicamente 2. Debido a que éste ruido es un fenómeno que está relacionado con la corriente, la tensión de ruido será mayor cuanto mayor sea la impedancia del circuito, por ejemplo la entrada de un FET.

A.5 Suma de fuentes de tensión de ruido

Supongamos que tenemos más de una fuente de ruido y queremos ver el efecto que causa la resultante de esas fuentes. En este punto es necesario poder discernir si las fuentes de ruido están correlacionadas o no ya que el tratamiento de la señal se realiza en forma diferente.

Si dos o más fuentes de tensión o corriente de ruido producen independientemente una perturbación, se dice que no están correlacionadas, o que son no-correlacionadas. En el caso de fuentes no-correlacionadas se halla la resultante de las potencias de ruido independientes sumando las distintas potencias de ruido individuales. Por ejemplo: si V_1 y V_2 son dos fuentes de ruido independientes, la V_{total} es la suma de los cuadrados de las tensiones individuales.

$$V_{total}^2 = V_1^2 + V_2^2 \quad (17)$$

Entonces el ruido total es:

$$V_{total} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (18)$$

Si las fuentes de ruido están correlacionadas puede hallarse el efecto resultante valiéndose de la siguiente ecuación:

$$V_{total} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + 2\gamma \cdot V_1 V_2} \quad (18)$$

Donde γ es el coeficiente de correlación que pueda variar entre +1 y -1. Si γ es igual a cero el voltaje es no-correlacionado, cuando $|\gamma| = 1$ el voltaje es totalmente

correlacionado. Para valores de γ entre 0 y +1 ó 0 y -1 el voltaje es parcialmente correlacionado.

