

Capítulo 8

Ruido

Introducción

En principio, puede definirse como *ruido* a cualquier señal indeseable en un sistema de telecomunicaciones. Sin embargo, tal definición resultaría ambigua, ya que permite interpretar como ruido a fenómenos tales como intermodulación, interferencias, etc. que, en gran medida son controlables mediante un diseño adecuado del sistema y los circuitos que lo conforman.

El ruido es un fenómeno natural, inevitable y generalmente incontrolable. En otras palabras, el ruido siempre estará presente en cualquier sistema de comunicaciones y contribuirá, en mayor o menor medida, al deterioro de la señal a la salida del receptor, además de constituir el principal factor limitante en su detección. De acuerdo con lo anterior, el ruido es efectivamente una “señal” indeseable, aunque el uso del término señal es discutible, ya que el ruido no representa información excepto en casos muy aislados. El ruido, la distorsión y la interferencia juegan un papel muy importante en los sistemas de comunicación, ya que limitan la calidad de la señal de información, si bien su naturaleza es completamente diferente. El ruido es, esencialmente aleatorio tanto en amplitud como en fase, en tanto que la distorsión y la interferencia siguen, por lo general, patrones determinados, con frecuencia difíciles de identificar. Según su origen, el ruido puede clasificarse como *natural* o *artificial*.

8.1 Ruido artificial

El ruido artificial es debido a la actividad humana y se origina principalmente en máquinas eléctricas en las que se producen chispas, tales como motores o generadores electromecánicos, motores de combustión interna que utilizan bujías, interruptores y conmutadores eléctricos, líneas de alta tensión, descargas en gases, por ejemplo en las lámparas fluorescentes, etc. Algunos de sus efectos se perciben fácilmente en el receptor de radio de un automóvil en que, a veces, la energía radiada por las chispas producidas por las bujías se escucha como chasquidos en el altavoz o cuando en la pantalla de un televisor aparecen líneas o destellos brillantes como consecuencia del paso de un vehículo o la entrada en funcionamiento de un aparato electrodoméstico. Este tipo de ruido puede reducirse ya sea en la fuente que lo pro-

duce, o en el receptor, mediante la inclusión de filtros adecuados y su estudio no forma parte del curso, excepto desde el punto de vista del nivel indeseable que puede introducir en un sistema. No puede estimarse con facilidad y, en el cálculo de sistemas de comunicaciones se incluye su efecto recurriendo a curvas elaboradas con base en numerosas mediciones en diferentes entornos: urbano, suburbano y despejado. El ruido humano generado en zonas urbanas es el mayor y su nivel disminuye con la frecuencia, según se muestra en la figura 8.1.

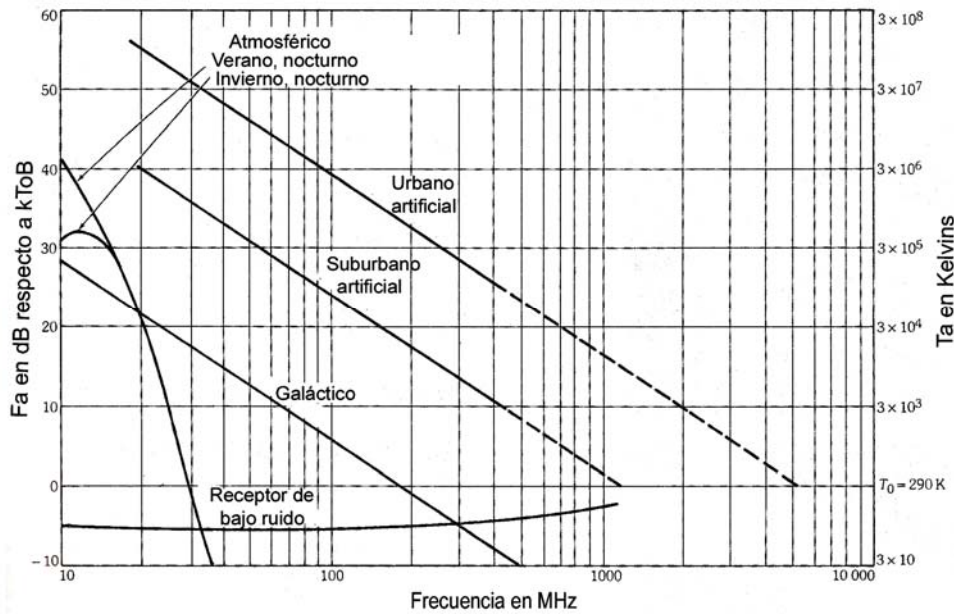


Fig. 8.1. Potencia promedio de ruido en función de la frecuencia, utilizando una antena omnidireccional.

El ruido artificial puede clasificarse en tres clases principales:

Interferencia. Incluye la interferencia de un canal radioeléctrico sobre otro, como resultado del diseño inadecuado del receptor o de la antena, variaciones en la frecuencia de la portadora en el transmisor, efectos debidos a dispersión troposférica o reflexión ionosférica en transmisiones de larga distancia, modulación cruzada entre canales en radioenlaces e interferencia causada por propagación multicamino. Estos tipos de ruidos pueden reducirse o eliminarse con un buen diseño del sistema.

Zumbido. Es un ruido periódico originado por las líneas de suministro eléctrico que transportan corriente alterna. Generalmente es predecible y puede eliminarse con filtrado y blindaje adecuados.

Ruido impulsivo. Este término se emplea para designar una variedad de fenómenos, no todos de origen humano y puede modelarse como la superposición de un número reducido de impulsos de gran amplitud que pueden ocurrir con cierta periodicidad, como el ruido de ignición en los motores de gasolina y el ruido por efecto corona en líneas de alta tensión, o bien producirse de forma aleatoria como el ruido producido por los equipos de conmutación telefónica o el ruido generado por las descargas atmosféricas, este último, de origen natural. El ruido impulsivo tiende a tener una distribución no gaussiana y suele ser no estacionario, por lo que resulta difícil su análisis matemático. Los sistemas sometidos a este tipo de ruido suelen ir precedidos de limitadores o “eliminadores” de ruido que cortan la transmisión si se excede cierto nivel de ruido.

8.2 Principales tipos de ruido natural

El ruido natural puede clasificarse en dos grandes grupos: el producido por los propios componentes electrónicos de un circuito o sistema y el producido por fuentes externas a él. En el primer caso pueden citarse el ruido térmico, el de granalla, el de partición y el ruido por defecto. En el segundo caso, el ruido atmosférico y el ruido cósmico.

8.3 Ruido inherente a los componentes de un circuito o sistema

Ruido térmico. Es la causa de ruido más importante en los circuitos eléctricos y, por consecuencia, está presente en todos los componentes de los sistemas de comunicaciones que incluyen circuitos eléctricos o electrónicos, particularmente en los receptores en que los niveles de señal pueden ser comparables a los de ruido térmico generado en los circuitos del propio receptor. Su origen es el movimiento aleatorio de los electrones libres en los conductores y semiconductores. Este movimiento es causado por la temperatura y puede interpretarse como que, en un instante dado, el número de electrones que se mueven en una dirección es mayor que el de los que se mueven en dirección opuesta, sin que en un período largo de tiempo predomine el movimiento en ninguna de las dos direcciones, es decir, su valor medio es cero. En otras palabras el ruido térmico se considera como una *variable aleatoria* de valor medio cero, pero *su valor instantáneo no es cero*. En ausencia de un voltaje externo, el movimiento aleatorio de los electrones da lugar a una corriente que cambia de magnitud y dirección continuamente que, en los extremos del conductor o del elemento de circuito particular, produce un voltaje fluctuante: el voltaje de ruido. La magnitud instantánea de este voltaje de ruido es muy pequeña y no puede

medirse con instrumentos convencionales, sin embargo en receptores, en que los niveles de señal procedentes de la antena son muy pequeños, el voltaje de ruido puede ser comparable y aún superior al de señal, con lo que ésta quedaría literalmente “enterrada” en el ruido y no sería posible detectarla, ya que el nivel de ruido, es igual o superior al de la señal y serían amplificadas por igual en los circuitos amplificadores del receptor.

La densidad espectral del ruido térmico es uniforme en el espectro de frecuencias, es decir que sus componentes espectrales abarcan desde 0 Hz (c.c.), hasta frecuencias del orden de 10^{13} Hz, en la región del ultravioleta con la misma amplitud, de aquí que a este tipo de ruido se le designa como *ruido blanco* por analogía con la luz blanca cuyo espectro es uniforme en el rango de frecuencias visibles, o en otras palabras, contiene por igual componentes de todos los colores del espectro visible.

La densidad espectral de ruido depende de la temperatura y está dada por:

$$N_0 = kT \quad \text{watt/Hz} \quad (8.1)$$

Donde:

T = Temperatura en kelvins = Temperatura ambiente en °C + 273.

k = Constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} watt/°K-Hz.

Por consecuencia, en un ancho de banda B , la potencia de ruido es:

$$N = N_0 B = kTB \quad \text{watt} \quad (8.2)$$

El voltaje de ruido sigue una distribución gaussiana con valor medio cero, sin embargo su valor instantáneo no es cero. Si se tiene una resistencia de valor R , cuya impedancia está acoplada a la de la fuente generadora de ruido, puede hablarse de un voltaje efectivo o raíz cuadrático medio (rcm o rms), dado por¹:

$$\langle E_n \rangle = \sqrt{kTBR} \quad \text{Volts} \quad (8.3)$$

Sin embargo, cuando las impedancias no están acopladas y la resistencia se considera por sí sola, es decir, como un generador equivalente de ruido en circuito abierto, el voltaje disponible de ruido debería ser, teóricamente:

$$\begin{aligned} \langle E_n \rangle &= 2\sqrt{kTBR} \\ &= \sqrt{4kTBR} \end{aligned} \quad (8.4)$$

¹ La notación $\langle E_n \rangle$ expresa el valor efectivo o raíz cuadrático medio.

En general, el ruido térmico no se ve afectado por la componente de corriente continua que pueda circular por la resistencia, si bien algunos tipos de resistencias, como las de carbón generan ruido adicional, dependiente de la corriente, que las hace inadecuadas para algunas aplicaciones. El efecto del ruido térmico fue investigado teóricamente por Nyquist² y experimentalmente por Johnson³ y se designa a veces también como Ruido de Johnson o de Nyquist.

Como el ruido térmico es aleatorio, no se puede especificar el voltaje instantáneo en función del tiempo, por lo que es necesario asumir que el ruido sigue una distribución estadística conocida. Las observaciones confirman que el ruido se comporta como una variable aleatoria con distribución gaussiana de valor medio cero. Es decir, puede describirse mediante una función de distribución de probabilidad gaussiana. Así, si se muestrea el ruido en un instante arbitrario t_1 , la probabilidad de que la muestra observada, $n(t_1)$ tenga valores en el intervalo $(n, n+dn)$ está dado por $f(n)$, donde:

$$f(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8.5)$$

y se asume que la varianza σ^2 es conocida, como de hecho ocurre, ya que puede medirse con un medidor de potencia verdadera que tenga una constante de tiempo grande.

Es importante tener en cuenta que todas las fórmulas que se refieren al ruido aleatorio se aplican únicamente a los valores efectivos o raíz cuadrático medios y no a los valores instantáneos, de modo que, en lo que respecta a los valores máximos o de pico que puede alcanzar el ruido, todo lo que se puede decir es que es poco probable que excedan de 10 veces el valor rcm.

Ruido de granalla. La agitación térmica no es la única fuente de ruido en los circuitos electrónicos. El ruido de granalla (*shot noise*) juega un papel de similar importancia al ruido térmico y es causado por las variaciones aleatorias en los tiempos de llegada de los portadores de carga (electrones o huecos) a los electrodos de salida en todos los dispositivos activos, tales como válvulas, transistores, etc. y aparece como una corriente variable de ruido, superpuesta a la corriente de señal de salida. El efecto que produce sobre una señal de audio es semejante al ruido que causa la granalla al caer sobre una chapa metálica, de ahí su nombre.

El ruido de granalla está presente en cualquier dispositivo electrónico en que los electrones se mueven aleatoriamente a través de una barrera de potencial. Sus efec-

² Nyquist, H. *Thermal agitation of electric charge in conductors*. Phys. Rev. vol. 32, pag 110. 1928

³ Johnson, J.B. *Thermal agitation of electricity in conductors*. Phys. Rev. Vol 32, pag 97. 1928

tos, aunados a los de otros tipos de ruido, pueden cuantificarse globalmente si se conoce el ruido a la entrada y a la salida del dispositivo. En algunos casos, los fabricantes de dispositivos especifican el nivel de ruido de granalla producido en condiciones de funcionamiento determinadas.

Ruido de partición. Ocurre cuando los electrones de un haz pueden incidir sobre dos o más electrodos, de modo que hay fluctuaciones aleatorias en el número de electrones que llegan a cada electrodo. Este tipo de ruido es predominante en válvulas al vacío con electrodos múltiples, por ejemplo tetrodos y pentodos.

Ruido por defecto. Este término se emplea para describir una extensa variedad de fenómenos que se manifiestan como voltajes de ruido en los terminales de diversos dispositivos cuando pasan corrientes continuas a través de ellos. A tal tipo de ruido se les designa a veces como ruido de corriente, ruido en exceso, ruido de parpadeo (flicker), ruido de contacto o ruido $1/f$. Su densidad espectral de potencia está dada por:

$$\varphi_x(\omega) = \frac{kI^\alpha}{\omega^\beta} \quad (8.6)$$

Donde I es la corriente continua que circula por el dispositivo, ω la frecuencia angular y k , α y β , son constantes. Generalmente, el valor de α es cercano a 2 y el de β cercano a 1. Este ruido puede predominar en bajas frecuencias debido a su dependencia respecto a $1/\omega$.

8.4 Ruido debido a fuentes naturales externas al sistema

Ruido atmosférico. La atmósfera afecta al ruido externo a un receptor de dos formas: atenúa el ruido procedente del cosmos y, por otra parte, genera ruido propio. Las descargas eléctricas atmosféricas durante las tormentas producen ráfagas de ruido impulsivo, cuyas componentes en las bandas de frecuencias medias y altas se propagan a grandes distancias gracias a los mecanismos de propagación ionosférica. De manera semejante a las ondas en esas bandas, este ruido depende del clima, hora del día, estación del año y ubicación del receptor con relación a las zonas de ocurrencia de tormentas.

Por lo general, el ruido atmosférico decrece al aumentar la latitud y aumenta en las zonas ecuatoriales. Es particularmente activo en las épocas lluviosas en las regiones del Caribe, Indias Orientales, Africa Ecuatorial, Norte de la India y Extremo Oriente. El informe 332 del CCIR ofrece un resumen, a escala mundial de los niveles de potencia de ruido atmosférico durante el verano y en horas diurnas. Estos

niveles de potencia de ruido se pueden relacionar con la intensidad de campo de ruido mediante la siguiente expresión⁴:

$$\langle E_n \rangle = F_a + 20 \log_{10} f_{MHz} - 65.5 \quad (8.7)$$

Donde:

E_n = Intensidad de campo rms, en un ancho de banda de 1 KHz, en dB μ V/m.

F_a = Nivel de potencia de ruido en dB respecto a kTB.

f_{MHz} = frecuencia en MHz.

El nivel de potencia de ruido atmosférico en un punto dado, decrece con la frecuencia.

Ruido cósmico. El ruido cósmico es generado en el espacio exterior, fuera de la atmósfera terrestre. Las principales fuentes son el Sol, la Vía Láctea y otras fuentes cósmicas discretas, designadas como radioestrellas, entre las que se incluye una fuente particularmente intensa en la constelación de Casiopea⁵. Las investigaciones en el campo de la Radioastronomía han permitido identificar un número considerable de fuentes de ruido cósmico. Como el ruido procedente de fuentes cósmicas debe penetrar la atmósfera terrestre para alcanzar la antena de un receptor, sufre los efectos de reflexión y absorción ionosféricas, en este caso desde el exterior, por lo que su efecto es reducido a frecuencias inferiores a unos 20 MHz, en tanto que los procesos de absorción molecular que ocurren en la atmósfera, limitan la recepción del ruido cósmico a frecuencias superiores a los 10 GHz. Estos aspectos son de importancia en las comunicaciones por satélite, ya que los vehículos espaciales por encima de unos 1000 Km sobre la superficie terrestre no tienen estas limitaciones y, por tanto son susceptibles de recibir mayores niveles de ruido que los receptores terrestres. En estos sistemas el ruido cósmico constituye un factor limitante y debe considerarse en su diseño. Son de interés los siguientes casos:

Ruido en el plano galáctico. Es el ruido procedente del plano galáctico en dirección del centro de la galaxia (Vía Láctea) y es el de mayor nivel. El ruido procedente de otras zonas de la galaxia puede llegar ser de 12 a 15 dB inferior al del plano galáctico.

⁴ E. C. Jordan, ed. *Reference Data for Radio Engineers: Radio, Electronics, Computer and Communications*. 7th. Edition. Howard W. Sams & Co. Indianapolis. 1986.

⁵ Para información más amplia relativa al ruido galáctico consúltese, por ejemplo, E. C. Jordan. *Reference Data for Engineers: Radio, Electronics, Computer, and Communications*. 7th. Ed. Howard W. Sams & Co. Indianapolis, IN. 1986. Capítulo 34.

Además de las fuentes de ruido cósmico mencionadas, el cosmos está permeado de radiación electromagnética que proviene de todas direcciones, designada como *radiación de fondo* y que actúa como una fuente de ruido a una temperatura equivalente de alrededor de 4 K.

Ruido solar. En los sistemas de comunicación vía satélite, el sol constituye una fuente de ruido blanco muy importante, que puede causar severos problemas de interferencia, y aún, bloqueo total de las comunicaciones cuando hay alineamiento entre éste y la estación receptora terrestre. En el caso de satélites geosíncronos, este alineamiento ocurre dos veces al año, en la proximidad de los equinoccios y durante éstos, por breves períodos al día. La señal radioeléctrica producida por el sol es de nivel tal, que prácticamente puede llegar a saturar el receptor de la estación terrestre, bloqueando la recepción de cualquier otra señal. Se distinguen dos condiciones para el ruido solar:

Sol quieto. Es el ruido solar en condiciones de poca o nula actividad solar, especialmente la causada por las manchas solares.

Sol perturbado. Es el ruido solar en condiciones de actividad solar significativa (manchas solares, protuberancias solares, destellos solares, playas, etc.).

8.5 Relación señal/ruido

Se define como relación señal a ruido, S/N o SNR⁶ al cociente de la potencia de la señal entre la potencia de ruido en un punto dado de un sistema, es decir:

$$S/N = \frac{\text{Potencia de señal}}{\text{Potencia de ruido}} \quad (8.8)$$

O, expresada en dB,

$$(S/N)_{dB} = 10 \log_{10}(S/N) \quad (8.9)$$

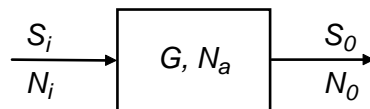
La relación S/N proporciona una medida de la calidad de una señal en un sistema determinado y depende, tanto del nivel de señal recibida como del ruido total, es decir, la suma del ruido procedente de fuentes externas y el ruido inherente al sistema. En el diseño de sistemas, se desea que la relación señal a ruido tenga un valor tan elevado como sea posible. Sin embargo, el significado de “tan elevado como

⁶ SNR corresponde a la abreviatura, en inglés de relación señal a ruido (*signal to noise ratio*)

sea posible”, debe entenderse en el contexto de cada aplicación particular, ya que por lo general, el obtener altos valores de S/N conlleva un aumento, a veces considerable, en el costo de implementación del sistema. Un valor adecuado de esta relación es aquél en el que la señal recibida puede considerarse sin defectos o con un mínimo de ellos. Por ejemplo en el caso de transmisión de voz, se desea que la señal recibida sea una reproducción fiel de la transmitida, pero puede tolerarse un cierto nivel de ruido y distorsión que depende de aspectos subjetivos relacionados con la percepción auditiva humana. Lo mismo ocurre en el caso de transmisión de imágenes. En los sistemas digitales de comunicaciones suele utilizarse el concepto de tasa de errores (BER⁷), equivalente, en cierta medida a la relación señal a ruido, más empleado en los sistemas analógicos.

8.6 Factor de ruido

Supóngase un amplificador de ganancia G_a , que genera una potencia de ruido interno N_a como se indica en la figura,



donde:

- S_i = potencia de la señal de entrada.
- N_i = potencia de ruido a la entrada.
- S_o = potencia de la señal de salida.
- N_o = potencia de ruido a la salida.
- N_a = ruido generado por el propio amplificador.
- G = ganancia del amplificador.

Se define el *factor de ruido* como la relación entre la relación señal a ruido a la entrada y la relación señal a ruido a la salida:

$$F = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_o}{N_o}} = \frac{N_o}{kTBG} \quad (8.10)$$

donde,

$$S_o = GS_i \quad (8.11)$$

⁷ BER corresponde a la abreviatura, en inglés, de *bit error rate*.

y, además,

$$N_0 = GN_i + N_a \quad (8.12)$$

Substituyendo (8.11) y (8.12) en (8.10):

$$F = \frac{GN_i + N_a}{GN_i} = 1 + \frac{N_a}{GN_i} \quad (8.13)$$

Si el ruido de entrada, N_i es únicamente ruido térmico,

$$N_i = kTB \quad (8.14)$$

De la ecuación (8.14) se puede obtener la potencia de ruido generada por el sistema:

$$N_a = (F - 1)kTB \quad (8.15)$$

Ahora bien, de lo anterior se ve que:

$$F = \frac{N_0}{GN_i} \quad (8.16)$$

es decir:

$$FN_i = \frac{N_0}{G} \quad (8.17)$$

y, substituyendo (17):

$$FN_i = kTBF \quad (8.18)$$

FN_i es la potencia total de ruido, debida al ruido externo y al del propio amplificador, referida a la entrada (N_0/G). Representa también el *umbral* de ruido a la entrada al que se designa también como *señal mínima discernible (SMD)*. Cuando el nivel de potencia de la señal de entrada es igual a la señal mínima discernible, $kTBF$, la relación S/N es igual a 1. Esta es la condición ideal en que el amplificador no genera ningún ruido adicional.

El factor de ruido suele expresarse en dB, en cuyo caso suele designarse como *cifra o figura de ruido*⁸ (NF), dada por:

⁸ En la literatura es frecuente utilizar indistintamente los términos *factor de ruido* y *cifra o figura de ruido*. Aquí se utilizará este último para designar el valor en dB (NF) y el primero para la magnitud de F .

$$NF = 10 \log F \quad (8.19)$$

Figura de ruido de un atenuador. La figura de ruido de un atenuador es igual a su atenuación L en dB.

8.7 Temperatura equivalente de ruido

En la mayor parte de los circuitos convencionales, el concepto del factor o de la figura de ruido es adecuado para describir su comportamiento. Sin embargo, con el desarrollo de amplificadores y circuitos de *bajo* ruido, en que el factor de ruido es ligeramente mayor que 1, es más conveniente utilizar el concepto de *temperatura de ruido*. Esta se define como la temperatura T_r de una resistencia ficticia a la entrada del circuito ideal, libre de ruido, que generaría la misma potencia de ruido que el circuito real, conectado a una carga libre de ruido.

Si se toma la temperatura de referencia como $T_0 = 290$ K (17°C) y se asume que el ruido a la entrada es únicamente ruido térmico a esa temperatura, entonces:

$$N_i = kT_0B \quad (8.20)$$

Y la ecuación (8.15) puede ahora escribirse como:

$$N_a = (F - 1)kT_0B \quad (8.21)$$

Que puede expresarse de la manera siguiente:

$$N_a = kT_aB \quad (8.22)$$

Donde:

$$T_a = (F - 1)T_0 \quad (8.23)$$

T_a representa la temperatura ficticia de una fuente de ruido térmico, constituida en este caso, por el amplificador. Es decir, se puede considerar al amplificador como una fuente de ruido térmico a una temperatura equivalente o efectiva de ruido igual a T_a .

De (8.22), se tiene que, si $T_0 = 290$ K:

$$F = 1 + \frac{T_a}{T_0} = 1 + \frac{T_a}{290} \quad (8.24)$$

Las ecuaciones (8.22) y (8.23) proporcionan las relaciones entre el factor de ruido y la temperatura equivalente de ruido.

En la mayoría de los sistemas de comunicaciones, la temperatura de ruido en las terminales de entrada puede ser diferente de la temperatura de ruido del sistema, T_a . Si se designa por T_i la temperatura de ruido en las terminales de entrada, y, si N_a es el ruido interno generado por el sistema, el ruido a la salida es:

$$\begin{aligned} N_0 &= kT_iBG + N_a \\ &= kT_iBG + kT_rBG \\ &= kBG(T_i + T_r) \\ &= kBG[T_i + (F - 1)T_0] \end{aligned} \quad (8.25)$$

Que se reduce a $N_0 = kT_iBGF$ cuando $T_i = T_0$ y, de acuerdo a lo anterior, la potencia total de ruido a la salida del sistema puede relacionarse con una temperatura equivalente de ruido:

$$T_e = T_i + T_r \quad (8.26)$$

En que T_i caracteriza a la potencia de ruido generada fuera del sistema y presente en las terminales de entrada de éste y T_r es la temperatura equivalente de ruido del sistema, referida a las terminales de entrada, que representa a la potencia de ruido generada por el propio sistema. De esta forma, las dos fuentes de ruido se combinan en una sola y se describen mediante una temperatura equivalente de ruido. Esta temperatura equivalente de ruido se puede emplear como un estándar de comparación entre dos o más sistemas, ya que combina a las dos fuentes de ruido. Así, dos sistemas pueden tener la misma temperatura de ruido aún cuando los circuitos que utilicen tengan diferentes figuras de ruido.

8.8 Factor equivalente de ruido de circuitos en cascada

El factor de ruido de varios circuitos conectados en cascada puede obtenerse a partir de (8.10) y (8.13). Consideremos por simplicidad, dos circuitos en cascada, cada uno con el mismo ancho de banda de ruido B , pero con diferentes ganancias y factores de ruido: F_1 , G_1 y F_2 , G_2 . La conexión en cascada tendrá un factor de ruido equivalente F_{eq} . De la definición del factor de ruido, el ruido a la salida de los dos circuitos en cascada será:

$$N_0 = F_{eq} G_1 G_2 k T_0 B \quad (8.27)$$

Que es la potencia de ruido debido al primer circuito o etapa a la salida de la segunda etapa, más el ruido N_{a2} introducido por ésta.

$$N_0 = kT_0BF_1G_1G_2 + N_{a2} = kT_0BF_1G_1G_2 + (F_2 - 1)kT_0BG_2 \quad (8.28)$$

Con lo que el factor equivalente de ruido de las dos etapas resulta:

$$F_{eq} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} \quad (8.29)$$

Siguiendo un razonamiento similar, se demuestra que, el factor de ruido equivalente para n etapas en cascada es:

$$F_{eq} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1G_2 \dots G_{n-1}} \quad (8.30)$$

De la expresión anterior se observa que si la ganancia de la primera etapa, G_1 es elevada, el factor equivalente de ruido es prácticamente igual al factor de ruido de la primera etapa. Por el contrario, si la primera etapa es un atenuador ($G_1 < 1$), el factor de ruido de la segunda etapa contribuye considerablemente al factor de ruido equivalente. En el caso de receptores que emplean como circuito frontal (primera etapa) un mezclador pasivo, el factor de ruido puede expresarse como:

$$F_{eq} = F_M + \frac{F_{FI} - 1}{G_M} \quad (8.31)$$

Donde:

F_M = Factor de ruido del mezclador.

F_{FI} = Factor de ruido del amplificador de frecuencia intermedia.

G_M = Ganancia de conversión del mezclador.

Como la ganancia de conversión de un mezclador pasivo es siempre menor que 1, es evidente que el factor de ruido de la etapa que sigue al mezclador, el amplificador de FI, contribuye de forma muy importante al factor de ruido equivalente.

La figura equivalente de ruido es igual al factor de ruido expresado en dB:

$$NF_{eq} = 10 \log F_{eq} \quad (8.32)$$

En el caso de receptores, es necesario tener en cuenta el efecto de la línea de transmisión entre la antena y la entrada del receptor, ya que la línea actúa como un atenuador cuyo factor de ruido está dado por:

$$F_{\text{linea}} = 10^{-\frac{L}{10}} \quad (8.33)$$

Donde L es la atenuación en dB de la línea (recuérdese que la atenuación en dB se expresa con un número positivo).

De forma similar al factor equivalente de ruido de circuitos en cascada, puede hablarse también de una temperatura equivalente o efectiva de ruido. De las ecuaciones (8.23) y (8.29) se ve que:

$$T_{eq} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_{en}}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (8.34)$$

En que $T_{e1}, T_{e2} \dots T_{en}$ son las temperaturas equivalentes de cada uno de los circuitos en cascada.

Ejemplo

Se tiene un atenuador de 6 dB y un amplificador con una ganancia de 15 dB y una figura de ruido de 9 dB. Calcular la figura equivalente de ruido: (a) Si el atenuador se conecta antes del amplificador y (b) Si el atenuador se conecta después del amplificador.

Solución:

Se convierten primero las magnitudes logarítmicas a lineales:

	G (dB)	NF(dB)	G	F
Atenuador	-6	6	0.25	4
Amplificador	15	9	31.6	8

(a) Atenuador seguido del amplificador.

$$F_{eq} = F_{aten} + \frac{F_{amp} - 1}{G_{aten}} = 4 + \frac{8 - 1}{0.25} = 32$$

$$NF_{eq} = 10 \log(F_{eq}) = 15.05 \text{ dB}$$

(b) Amplificador seguido del atenuador.

$$F_{eq} = F_{amp} + \frac{F_{aten} - 1}{G_{amp}} = 8 + \frac{4 - 1}{31.6} = 8.09$$

$$NF_{eq} = 10 \log(F_{eq}) = 9.08 \approx 9 \text{ dB}$$

En el ejemplo anterior se ve el efecto adverso que produce la conexión de un atenuador a la entrada de un receptor.

8.9 Temperatura de ruido de la antena

Una antena recibe ruido de las direcciones comprendidas en su patrón o diagrama de radiación, que pasa al receptor junto con la señal deseada. El ruido externo, tanto de fuentes naturales como artificiales, captado por la antena, se caracteriza generalmente por la *temperatura de ruido de la antena*, definido como:

$$T_a = \frac{P_a}{kB} \quad (8.35)$$

Donde P_a es la potencia de ruido captada por la antena en el ancho de banda B . Esta temperatura es la que “ve” la antena y no su temperatura física. Una antena puede estar en un ambiente helado y su temperatura física puede ser, por ejemplo de 253K (-20°C) en tanto que su temperatura de ruido puede ser de varios miles de kelvins. Por el contrario, la antena puede estar físicamente a temperatura ambiente (290K) y su temperatura de ruido puede ser de 20K o menos. La temperatura de ruido de una antena depende de la dirección a que está apuntada y de las características de su patrón de radiación. En este aspecto, juegan un papel importante los lóbulos secundarios del patrón de radiación, ya que una antena puede estar apuntada al cielo, con una temperatura de ruido, por ejemplo, de 30K, pero si algún lóbulo secundario apunta hacia la tierra o hacia el sol, la temperatura de ruido será entonces considerablemente mayor. Por esta razón, en los sistemas de bajo ruido es muy importante suprimir los lóbulos secundarios o laterales del patrón de radiación.

8.10 Temperatura de ruido del sistema

Este concepto se aplica principalmente a los sistemas receptores y es de gran utilidad en los cálculos relacionados con el ruido. La potencia total de ruido en un sistema receptor puede representarse mediante una temperatura de ruido T_s correspondiente a esa potencia, referida a las terminales de entrada del receptor y dada por:

$$N_i = kT_s B \quad (8.36)$$

En que B es el ancho de banda del sistema. La temperatura efectiva de ruido total de un sistema receptor puede considerarse, arbitrariamente, formada por tres componentes: (a) La temperatura de ruido externo captada por la antena, T_a . (b) La temperatura de ruido de los componentes que conectan la antena al receptor, tales como línea de transmisión, conectores, acopladores, transiciones, etc., T_t y (c) la temperatura de ruido generada en el propio sistema, T_r , caracterizada generalmente por su figura de ruido.

La potencia de ruido de la antena que llega a la entrada del receptor es atenuada por la línea de transmisión, conectores, etc. por un factor L , la atenuación de la línea y demás componentes entre la antena y el receptor, de modo que la contribución efectiva de la temperatura de la antena a la temperatura del sistema es T_a/L . Por otra parte, la contribución efectiva del ruido generado a la salida de la línea de transmisión es $T_t(1 - 1/L)$. La temperatura de ruido del sistema *referida a las terminales de entrada del receptor* por consecuencia, está dada por:

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_a}{L} + T_t \left(1 - \frac{1}{L}\right) + T_r \\ &= \frac{T_a}{L} + T_t \left(1 - \frac{1}{L}\right) + (F_r - 1)T_0 \end{aligned} \quad (8.37)$$

Donde F_r es el factor de ruido del receptor. Nótese que la temperatura de ruido del sistema, *referido a la entrada de la línea de transmisión* es:

$$T'_s = T_a + (L - 1)T_t + LT_r \quad (8.38)$$

De acuerdo a lo anterior, la temperatura de ruido, referido a las terminales de la antena es L veces mayor que la referida a la entrada del receptor.

8.11 Ruido en sistemas modulados en amplitud

La inmensa mayoría de los sistemas de comunicaciones emplean modulaciones, bien sea de una portadora senoidal continua o de pulsos, cuyo comportamiento ante el ruido es diferente, dando lugar a distintos valores de la relación señal a ruido. El comportamiento de cualquier sistema puede juzgarse en términos de dicha relación que debe ser tan grande como sea posible para un sistema dado. En esta sección resumiremos las principales relaciones señal a ruido para las modulaciones de amplitud, frecuencia y pulsos.

Relación S/N en AM completa. En este caso, la potencia de la señal de información a la entrada del receptor, contenida en las bandas laterales está dada por:

$$S_i = \frac{m^2 P_c}{2} \quad (8.39)$$

Donde m es el índice de modulación y P_c la potencia de la portadora. Por otra parte, la potencia de ruido a la entrada del receptor está dada por:

$$N_i = 2 p_0 B \quad (8.40)$$

En que p_0 es la densidad espectral de ruido ($p_0 = kT$) y B es el ancho de banda de la señal en banda base. En estas condiciones, la relación señal a ruido a la entrada del receptor es:

$$S_i / N_i = \frac{m^2 P_c}{2 N_i} \quad (8.41)$$

En el detector, toda la potencia de la señal, contenida en las dos bandas laterales, queda concentrada en la banda base (B), de modo que la relación señal a ruido a la salida del detector, asumiendo que éste no introduce ruido adicional, es ahora:

$$S_0 / N_0 = \frac{m^2 P_c}{N_i} \quad (8.42)$$

La relación señal a ruido a la salida del detector es el doble de la de entrada, es decir, el detector introduce una mejora de 3 dB en la relación señal a ruido en AM completa.

Relación S/N en AM con doble banda lateral y portadora suprimida (DSBSC⁹)

La diferencia entre este caso y el de AM completa es la portadora, por lo que *para igual potencia en las bandas laterales*, la relación S_0/N_0 en ambos sistemas debe ser igual, lo que da lugar a las relaciones siguientes¹⁰:

$$\begin{aligned} (S_0 / N_0)_{DSBSC} &= (S_0 / N_0)_{AM} \\ (S_0 / N_0)_{DSBSC} &= 4(S_i / N_i)_{DSBSC} \end{aligned} \quad (8.43)$$

⁹ *Double Sideband Suppressed Carrier*

¹⁰ Connor, F.R. *Ruido*. Vol. VI de la serie "Temas de Telecomunicación". Editorial Labor, S.A. Barcelona, 1976.

Lo que equivale a una mejora de 6 dB en la relación señal a ruido en DSBDC respecto a AM completa.

Relación S/N en Banda lateral única (BLU o SSB)

Siguiendo un razonamiento similar se puede demostrar que:

$$(S_0 / N_0)_{BLU} = 8(S_0 / N_0)_{AM} \quad (8.44)$$

La mejora en este caso es de 9 dB respecto a AM completa.

8.12 Ruido en sistemas modulados en frecuencia

La expresión para una señal modulada en frecuencia a la entrada del discriminador del receptor es:

$$\begin{aligned} v_i(t) &= V_c \text{sen} \left[\omega_c t - \frac{\Delta f}{f_m} \cos \omega_m t \right] \\ &= V_c \text{sen}(\omega_c t + \phi) \end{aligned} \quad (8.45)$$

Donde $\phi = -\beta \cos \omega_m t$, en que $\beta = \Delta f / f_m$. Δf es la desviación de frecuencia y $f_m = \omega_m / 2\pi$ es la frecuencia de la señal moduladora. La señal v_0 a la salida del discriminador es proporcional a la desviación de fase ϕ , que corresponde a una desviación de frecuencia $(1/2\pi)d\phi/dt$:

$$\begin{aligned} v_0(t) &= K \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{K\omega_m}{2\pi} \beta \text{sen} \omega_m t \\ &= K\Delta f \text{sen} \omega_m t \end{aligned} \quad (8.46)$$

En que K es una constante de proporcionalidad.

La potencia promedio de la señal anterior es:

$$S_0 = \frac{(K\Delta f)^2}{2} \quad \text{watts} \quad (8.47)$$

Para calcular el efecto del ruido, hay que notar que cada componente de ruido, de frecuencia f_n se mezclará con la portadora, dando lugar a modulación tanto de amplitud como angular, como se ilustra en la figura 8.2.

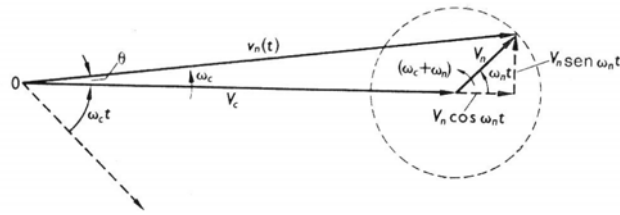


Fig. 8.2. Efecto del ruido en FM.

Si V_n es la amplitud máxima de la componente de ruido y teniendo en cuenta que $V_c \gg V_n$ se tiene:

$$\begin{aligned} v_n(t) &= (V_c + V_n \cos \omega_n t) + j \frac{V_n}{V_c} \text{sen } \omega_n t \\ &= V_c \left[1 + \frac{V_n}{V_c} (\cos \omega_n t + j \text{sen } \omega_n t) \right] \\ &\cong V_c \text{sen}(\omega_c t + \theta) \end{aligned} \quad (8.48)$$

Donde:

$$\theta = \arctan \frac{\frac{V_n}{V_c} \text{sen } \omega_n t}{1 + \frac{V_n}{V_c} \cos \omega_n t} \cong \frac{V_n}{V_c} \text{sen } \omega_n t \quad (8.48)$$

A la salida del discriminador, el voltaje de ruido, designado ahora como $v_d(t)$, será proporcional a la modulación de frecuencia que produce la señal de ruido $v_n(t)$, a su vez relacionada con la modulación de fase producida por el ruido:

$$v_d(t) = K \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt} = K \frac{V_n}{V_c} f_n \cos \omega_n t \quad (8.49)$$

La potencia promedio de ruido por unidad de ancho de banda a la salida es:

$$\delta N_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{K V_n f_n}{V_c} \right)^2 \quad (8.50)$$

Ahora bien, la potencia de ruido en un ancho de banda Δf es:

$$p_0 \Delta f = \frac{V_n^2}{2} \quad (8.51)$$

y la potencia de la portadora es $P_c = V_c^2/2$, con lo que la potencia de ruido es ahora:

$$\delta N_0 = \frac{K^2 f_n^2 p_0 \Delta f}{2P_c} \quad (8.52)$$

La potencia total de ruido en el ancho de banda $\pm B$ se calcula como:

$$\begin{aligned} N_0 &= \int_{-B}^B \frac{K^2 f_n^2 p_0}{2P_c} df = \frac{K^2 p_0}{2P_c} \int_{-B}^B f_n^2 df \\ &= \frac{K^2 p_0 B^3}{3P_c} \\ &= \frac{K^2 kTB^3}{3P_c} \end{aligned} \quad (8.53)$$

puesto que $p_0 = kT$ y, de acuerdo a lo anterior, la relación señal a ruido de salida en FM es:

$$\begin{aligned} (S_0/N_0)_{FM} &= \frac{K^2 \Delta f^2}{\frac{2}{K^2 kTB^3}} \\ &= 3 \left(\frac{\Delta f}{B} \right)^2 \frac{P_c}{2kTB} \\ &= 3\beta^2 \frac{P_c}{2kTB} \end{aligned} \quad (8.54)$$

Donde β es el índice de modulación en FM. Si se compara la relación señal a ruido en FM con la relación AM se puede demostrar que:

$$\frac{(S_0/N_0)_{FM}}{(S_0/N_0)_{AM}} = 3\beta^2 \quad (8.55)$$

De (8.41) y (8.53) se observa que, en tanto que en AM el nivel de ruido no depende de la frecuencia, en FM, en FM el ruido aumenta proporcionalmente a B^3 , como se ilustra en la figura 8.3.

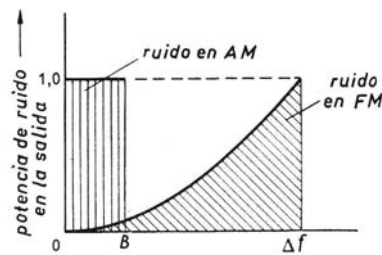


Fig. 8.3. Ruido en FM.

8.12 Ruido en los sistemas PCM

En los sistemas PCM en que la relación señal a ruido a la entrada es del orden de 10 dB o mayor, la contribución más importante al ruido es el debido al error de cuantificación.

Considérese una señal de amplitud V volts, cuantificada uniformemente en q niveles y con una separación entre niveles de ΔV volts, como se ilustra en la figura 8.4.

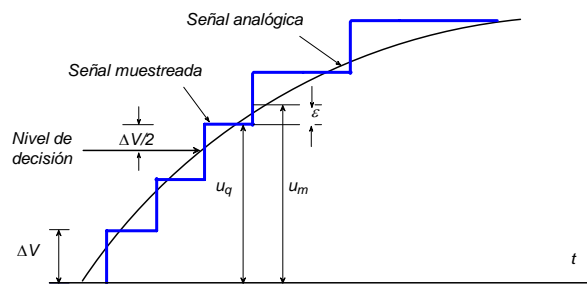


Fig. 8.4. Ruido de cuantificación.

La amplitud de las muestras cuantificadas, u_q , diferirá de la amplitud de las muestras originales, u_m , por un error ε , cuyo valor máximo será $\Delta V/2$, en que ΔV es la amplitud del escalón de cuantificación. El error puede tener cualquier valor en el intervalo $\pm \Delta V/2$ y puede considerarse como *ruido* que se suma con la señal u_m . Para calcular el valor raíz cuadrático medio de este ruido de cuantificación se supone que, en un intervalo suficientemente largo, todos los niveles tienen la misma probabilidad de ocurrir, de modo que:

$$\langle \varepsilon^2 \rangle = \int_{-\Delta V/2}^{\Delta V/2} \varepsilon^2 d\varepsilon = \frac{\Delta V^2}{12} \quad (8.56)$$

Sobre una carga de 1Ω , la potencia de este ruido de cuantificación será:

$$N_0 = \frac{\Delta V^2}{12} \quad (8.57)$$

Para calcular ahora la potencia de una señal cuantificada a q niveles discretos, separados ΔV volts, se tiene que:

$$V = (q-1)\Delta V \quad (8.58)$$

Y admitiendo que se utilicen pulsos bipolares, las amplitudes de los pulsos serán $\pm \Delta V/2, \pm 3\Delta V/2, \dots, \pm (q-1)\Delta V/2$, con lo que para igual probabilidad de ocurrencia de todos los niveles, la potencia promedio de la señal está dada por:

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{1}{\left(\frac{q}{2}\right)} \left[\left(\frac{\Delta V}{2}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta V}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{(q-1)\Delta V}{2}\right)^2 \right] \\ &= \frac{\Delta V^2}{2q} [1^2 + 3^2 + 5^2 + \dots + (q-1)^2] \end{aligned} \quad (8.59)$$

Que puede escribirse como:

$$S_0 = \frac{\Delta V^2}{2q} \left\{ [1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots]^2 - 2^2 \left[1^2 + 2^2 + 2^2 + \dots + \left(\frac{q-2}{2}\right)^2 \right] \right\} \quad (8.60)$$

Ahora bien,

$$\sum_{n=1}^{n=m} n^2 = \frac{m(m+1)(2m+1)}{6} \quad (8.61)$$

Con lo que se tiene:

$$\begin{aligned} 1^2 + 2^2 + \dots + (q-1)^2 &= \frac{q(q-1)(2q-1)}{6} \\ 1^2 + 2^2 + \dots + \left(\frac{q-2}{2}\right)^2 &= \frac{q(q-1)(q-2)}{4 \times 6} \end{aligned} \quad (8.62)$$

De modo que:

$$S_0 = \frac{\Delta V^2}{12q} [q(q-1)(2q-1) - q(q-1)(q-2)] \quad (8.63)$$

Y con un poco de manipulación algebraica se tiene finalmente que la potencia de señal en PCM es:

$$S_0 = \frac{\Delta V^2}{12q} (q^2 - 1) \cong \frac{\Delta V^2}{12q} q^2 \quad (8.64)$$

La aproximación anterior es válida si $q \gg 1$. Por último, la relación señal a ruido, debida al ruido de cuantificación resulta:

$$(S_0 / N_0)_{PCM} = \frac{\frac{\Delta V^2}{12q} (q^2 - 1)}{\frac{\Delta V^2}{12q}} = (q^2 - 1) \cong q^2 \quad (8.65)$$

Así por ejemplo, para cuantificación a 8 bits (256 niveles), la relación señal a ruido en PCM será de $10\log(256^2) = 48$ dB.

Problemas

8.1 Calcular el nivel necesario de potencia de una señal, para una S/N de 40 dB a la entrada de un amplificador cuya figura de ruido es de 8 dB, si el ancho de banda de ruido es de 200 KHz.

8.2 Un receptor de HF situado en zona urbana tiene una figura de ruido de 13 dB y está conectado a una antena mediante una línea de transmisión cuya atenuación es de 0.8 dB. la frecuencia de funcionamiento es de 27 MHz y el ancho de banda, de 10 KHz. Determinar el nivel de señal necesario en las terminales de la antena para una relación mínima señal a ruido de 30 dB.

8.3 Si en un receptor de telefonía móvil digital, el nivel mínimo de señal de entrada necesario para una relación C/N de 20 dB es de -95 dBm, determinar la figura equivalente de ruido del receptor si el ancho de banda de ruido es de 10 KHz.

8.4 Un amplificador de bajo ruido (LNA) para recepción de televisión analógica tiene una temperatura equivalente de ruido de 70K y se halla en la zona en que la potencia radiada por el satélite es de 53 dBw. La frecuencia central de la portadora es de 11.2 GHz, y está modulada en frecuencia con un ancho de banda de 36 MHz. La antena tiene una ganancia de 34.7 dBi y las pérdidas de acoplamiento entre la antena y el LNA son de 0.6 dB. Calcular la relación C/N a la entrada del LNA si la distancia al satélite se supone de 38000 Km y se asumen condiciones de propagación en el espacio libre.

8.5 Un sistema de recepción está formado por una antena parabólica, un amplificador de bajo ruido conectado mediante una guía de onda y un receptor con las siguientes características:

Temperatura de ruido de la antena:	60K
Atenuación en la guía de onda:	1 dB
Temperatura equivalente del LNA:	77K
Ganancia del LNA:	20 dB
Figura de ruido del receptor:	10 dB

Calcular la temperatura y la figura de ruido equivalentes de todo el sistema.

8.6 Demostrar que la relación señal a ruido en un sistema PCM crece exponencialmente con el ancho de banda.

8.7 Un sistema de recepción está formado por un preamplificador, conectado a un receptor principal a través de un cable cuya atenuación es de 8 dB. Las figuras de ruido son 6 dB para el preamplificador, y 13 dB el receptor. Calcular la ganancia mínima que debe tener el preamplificador si la figura de ruido total del sistema no debe ser mayor de 9 dB.