



Productos: Generadores de señal, analizadores de espectro, receptores, analizadores de redes, medidores de potencia, analizadores de audio

¿dB o no dB?

Todo lo que siempre quiso saber sobre los decibelios pero nunca se atrevió a preguntar...

Verdadero o falso: ¿ $30 \text{ dBm} + 30 \text{ dBm} = 60 \text{ dBm}$? ¿Por qué un 1% equivale a -40 dB unas veces y otras a 0.1 dB o a 0.05dB?. En algunas ocasiones estas preguntas dejan perplejo incluso al ingeniero más experimentado. Los decibelios se encuentran en todos los sitios, cuando se habla de niveles de tensión, de potencia, coeficientes de reflexión, figuras de ruido, intensidad de campo, etc. ¿Qué es un decibelio y cómo deberíamos utilizarlo en los cálculos? El objetivo de esta nota de aplicación es refrescar los conocimientos acerca de los decibelios.



Contenidos

1	Introducción.....	3
2	¿Por qué utilizamos los decibelios en nuestros cálculos?	3
3	Definición de dB.....	4
4	¿Qué significa dBm?.....	4
5	¿Cuál es la diferencia entre los decibelios de tensión y los decibelios de potencia?.....	5
6	¿Qué es un nivel?.....	6
7	Atenuación y ganancia.....	8
	Conexión en serie de circuitos de dos puertos.....	9
8	Conversión de decibelios a porcentaje y viceversa.....	9
	Conversión de % de tensión a decibelios y viceversa	9
	Conversión de % de potencia a decibelios y viceversa	10
	Conversión de % de potencia más o menos a decibelios	11
	Conversión de % de potencia más o menos a decibelios	11
9	Utilización de valores en dB en los cálculos.....	12
	Suma de niveles de potencia.....	12
	Medida de señales cerca del nivel de ruido	12
	Suma de tensiones	13
	Tensiones de pico.....	16
10	¿Qué medimos en decibelios?	17
	Relación señal a ruido (S/N).....	17
	Ruido.....	18
	Promediado del ruido.....	19
	Factor de ruido, figura de ruido.....	20
	Ruido de fase.....	20
	Parámetros S.....	22
	VSWR y coeficiente de reflexión	23
	Intensidad de campo.....	24
	Ganancia de antena.....	25
	Factor de cresta.....	25
	Potencia en canal y potencia en canal adyacente	27
	Calidad de modulación EVM	28
	Rango dinámico de los conversores A/D y D/A.....	29
	dB (FS) (“Full Scale”, escala completa).....	30
	Nivel de Presión Sonora	30
	Niveles ponderados de presión sonora dB(A).....	31
11	Números que merece la pena conocer.....	32
	Tabla para la conversión entre decibelios y valores lineales	32
	Tabla para sumar decibelios.....	33
	Algunas cifras útiles.....	34
	Otras magnitudes de referencia	34
	Precisión, posiciones decimales.....	35
12	Bibliografía	35
13	Información adicional	35

1 Introducción

%, dB, dBm y dB(μ V) son conceptos importantes que todo ingeniero debería entender perfectamente y ser capaz de trabajar con ellos normalmente. De no ser así, se encontrará en una clara desventaja durante el desarrollo de su trabajo. Cuando estos términos aparecen en discusiones con clientes o con otros compañeros, tendrá serios problemas para centrarse en el problema si está ocupado preguntándose si 3 dB significa un factor de 2 o de 4 (u otra cosa). Merece la pena el esfuerzo de revisar estos conceptos de vez en cuando y familiarizarse con ellos.

Esta nota de aplicación no está pensada como libro de texto, sino como una ayuda para refrescar los conocimientos en este tema en el caso de que sean conocidos o como una introducción si son conceptos totalmente nuevos.

Cuando se utilizan fórmulas y unidades, se han seguido los estándares internacionales fijados en la ISO 31 y en la IEC 27 (también se indican los casos en los que es una práctica común el desviarse de estos estándares).

2 ¿Por qué utilizamos los decibelios en nuestros cálculos?

Los ingenieros tenemos que trabajar con números todos los días, y estos números pueden ser muy grandes o muy pequeños. En la mayoría de los casos, lo que es más importante es la relación entre dos magnitudes. Por ejemplo, una estación base de telefonía móvil puede transmitir una potencia de 80 W aproximadamente (ganancia de la antena incluida). Los teléfonos móviles sólo reciben unos 0.000 000 002 W, lo que supone un 0.000 000 002 5% de la potencia transmitida.

Siempre que haya que trabajar con rangos numéricos grandes, es conveniente utilizar el logaritmo de esos números. Por ejemplo, la estación base de nuestro ejemplo transmite una potencia de +49 dBm mientras que el teléfono móvil recibe -57 dBm, produciendo una diferencia en potencia de +49 dBm - (-57 dBm) = 106 dB.

Otro ejemplo: si conectamos dos amplificadores en cascada con ganancias de 12 y 16 respectivamente, obtenemos una ganancia total de $12 \times 16 = 192$. En términos logarítmicos, los dos amplificadores tienen una ganancia de 10.8 dB y 12 dB, respectivamente, produciendo una ganancia total de $10.8 \text{ dB} + 12 \text{ dB} = 22.8 \text{ dB}$, que es mucho más fácil de calcular.

Cuando trabajamos con decibelios, los valores son mucho más fáciles de manipular. Es mucho más sencillo sumar y restar decibelios de cabeza que multiplicar y dividir valores lineales. Esta es la principal razón por la que preferimos utilizar decibelios en nuestros cálculos.

3 Definición de dB

A pesar de que el logaritmo en base 10 de la relación de dos niveles de potencia es adimensional, tiene unidades de belios en honor del inventor del teléfono (Alexander Graham Bell). Para obtener cantidades más manejables, utilizamos el dB (**decibelio**) en lugar del belio. Para ello hay que multiplicar por 10 los valores expresados en belios (al igual que multiplicamos por mil una distancia si queremos trabajar con milímetros en lugar de con metros).

$$a = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{dB}$$

Como ya se ha mencionado antes, la ventaja de usar decibelios es que se pueden representar las diversas señales que normalmente se encuentran en ingeniería utilizando números más manejables.

Ejemplo: P_1 es igual a 200 W y P_2 es igual a 100 mW. ¿Cuál es su relación en dB?

$$a = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \text{dB} = 10 \cdot \log_{10}(2000) \text{dB} = 33,01 \text{dB}$$

Por supuesto, antes de dividir estos niveles de potencia, hay que convertirlos a la misma unidad, W o mW. Si dividimos directamente 200 entre 100, el resultado obtenido será incorrecto.

Hoy en día, se utiliza el logaritmo en base 10 casi de forma exclusiva. La abreviatura para este logaritmo es **lg**. En algunos libros de texto antiguos, se puede encontrar la utilización del logaritmo natural, que es el logaritmo en base e ($e = 2.718$ aproximadamente). En esta nota de aplicación sólo se utilizará el logaritmo en base 10, que abreviaremos como **lg** de aquí en adelante.

También es posible convertir decibelios a unidades lineales. Primero hay que convertir los dB a belios dividiendo el valor por 10. Posteriormente, hay que elevar 10 (dado que estamos utilizando el logaritmo en base 10) a esa potencia:

$$\frac{P_1}{P_2} = 10^{\frac{a/\text{dB}}{10}}$$

Ejemplo: $a = 23 \text{ dB}$, ¿Cuánto es P_1 / P_2 ?
Después de calcular primero $23 / 10 = 2.3$, obtenemos:

$$\frac{P_1}{P_2} = 10^{2.3} = 199,5$$

4 ¿Qué significa dBm?

Si referimos un nivel de potencia arbitrario a una cantidad fija de referencia, obtenemos una cantidad absoluta a partir de una relación logarítmica de potencias.

La cantidad de referencia más comúnmente utilizada en telecomunicaciones y radiofrecuencia es 1 mW (la milésima parte de 1 W)

¿Cuál es la diferencia entre los decibelios de tensión y

sobre 50 ohms. Esta cantidad de referencia se designa añadiendo una m (de mW) a dB obteniéndose dBm.

La relación de potencias entre P_1 y P_2 se convierte en una relación entre P_1 y 1 mW, indicándose en dBm.

$$P = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_1}{1 \text{ mW}}\right) \text{ dBm}$$

Según el estándar IEC 27, existe otra forma de escribir esta fórmula. Los niveles se representan con la letra L y el valor de referencia se debe indicar de forma explícita. La fórmula queda de la siguiente forma:

$$L_{P(\text{re } 1 \text{ mW})} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_1}{1 \text{ mW}}\right) \text{ dB}$$

o en la forma corta:

$$L_{P/1 \text{ mW}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_1}{1 \text{ mW}}\right) \text{ dB}$$

Se escribiría $L_{P/1 \text{ mW}} = 7 \text{ dB}$, por ejemplo. Según la IEC 27 no está permitido utilizar la expresión 7 dBm. Como es mucho más común escribir dBm, será ésta la expresión que se utilizará en esta nota de aplicación.

Para tener una idea de los órdenes de magnitud que se manejan, aquí hay algunos ejemplos: el rango de la potencia de salida de un generador de señal va desde los -140 dBm a +20 dBm o desde 0.01 fW a 0.1 W. Las estaciones base de telefonía móvil transmiten a +43 dBm o 20 W. Los teléfonos móviles transmiten de +10 dBm a +33 dBm o desde 10 mW a 2 W. Los transmisores de difusión de radio y televisión operan con niveles de salida de +70 dBm a +90 dBm o desde 10 kW a 1 MW.

5 ¿Cuál es la diferencia entre los decibelios de tensión y los decibelios de potencia?

Para empezar, es necesario olvidarse de todo lo que se haya oído acerca de los decibelios de tensión y de potencia. Sólo existe un tipo de decibelio, y representa la relación entre dos niveles de potencia P_1 y P_2 . Por supuesto, se puede expresar cualquier nivel de potencia como una tensión si se conoce la resistencia.

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_1} \text{ y } P_2 = \frac{U_2^2}{R_2}$$

Se puede expresar la relación logarítmica como sigue:

$$a = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \text{ dB} = 10 \cdot \lg\left(\frac{U_1^2}{U_2^2} \cdot \frac{R_2}{R_1}\right) \text{ dB}$$

Utilizando las siguientes reglas,

¿Qué es un nivel?

$$\log\left(\frac{1}{x}\right) = -\log(x)$$

$$\log(x^y) = y \cdot \log(x)$$

$$\log(xy) = \log(x) + \log(y)$$

obtenemos (de nuevo utilizando lg para referirnos al logaritmo en base 10):

$$a = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \text{ dB} = 10 \cdot \lg\left(\frac{U_1^2}{U_2^2} \cdot \frac{R_2}{R_1}\right) \text{ dB} = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \text{ dB} - 10 \cdot \lg\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \text{ dB}$$

Obsérvese el signo menos antes del término de la resistencia.

En la mayoría de los casos, la resistencia de referencia es la misma para ambos niveles de potencia, $R_1 = R_2$. Por lo tanto:

$$10 \cdot \lg(1) = 0$$

Se puede simplificar en:

$$a = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \text{ dB} = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \text{ dB} \quad (\text{¡simplificado para } R_1 = R_2!)$$

Así se explica por qué se utiliza el 10·lg para relaciones de potencia y el 20·lg para relaciones de tensión.

Precaución: (¡Muy importante!) Esta fórmula sólo es válida si $R_1 = R_2$. Si, como ocurre en algunas ocasiones en televisión, necesitamos tener en cuenta la conversión de 75 ohms a 50 ohms, hay que considerar la relación entre las resistencias.

La conversión a valores lineales se realiza de la misma manera. Para relaciones de tensión, se debe dividir el valor por 20 ya que utilizamos U^2 y **decibelios** ($20 = 2 \cdot 10$, el 2 proviene de U^2 , el 10 de deci).

$$\frac{P_1}{P_2} = 10^{\frac{a/\text{dB}}{10}}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = 10^{\frac{a/\text{dB}}{20}}$$

6 ¿Qué es un nivel?

Como vimos anteriormente, el término dBm conlleva la referencia a un nivel de potencia de 1 mW. Otras cantidades de referencia utilizadas normalmente son 1 W, 1 V, 1 μV y también 1 A o 1 μA . Se designan como dB (W), dB (V), dB (μV), dB (A) y dB (μA), respectivamente, o en medidas de intensidad de campo, dB (W/m^2), dB (V/m), dB ($\mu\text{V}/\text{m}$), dB (A/m) y dB ($\mu\text{A}/\text{m}$). Como en el caso de los dBm, la forma convencional de escribir estas unidades dBW, dBV, dB μV , dBA, dB μA , dBW/ m^2 , dBV/m, dB $\mu\text{V}/\text{m}$,

¿Qué es un nivel?

dBA/m y dB μ A/m se desvían del estándar, pero serán las utilizadas en esta nota de aplicación.

A partir de los valores relativos de la potencia P_1 (tensión U_1) referidos a la potencia P_2 (tensión U_2), se obtienen los valores absolutos utilizando los valores de referencia anteriormente citados.

Estos valores absolutos también se conocen como **niveles**. Un nivel de 10 dBm significa un valor que es 10 dB mayor que 1 mW, y un nivel de -17dB μ V se corresponde con un valor que es 17 dB menor que 1 μ V.

Cuando se trabaja con estos valores, es importante tener en cuenta si son magnitudes de potencia o de tensión.

Algunos ejemplos de magnitudes de potencia son la potencia, la energía, la resistencia, la figura de ruido y la densidad de potencia.

Las magnitudes de tensión (también conocidas como magnitudes de campo) incluyen la tensión, la corriente, la intensidad de campo eléctrico, la intensidad de campo magnético y el coeficiente de reflexión.

Ejemplos: Una densidad de potencia de 5 W/m² se corresponde con el siguiente nivel:

$$P = 10 \cdot \lg\left(\frac{5 \text{ W/m}^2}{1 \text{ W/m}^2}\right) = 7 \text{ dB (W/m}^2)$$

Un nivel de tensión de 7 μ V se puede expresar en dB(μ V):

$$U = 20 \cdot \lg\left(\frac{7 \mu\text{V}}{1 \mu\text{V}}\right) = 16.9 \text{ dB } (\mu\text{V})$$

Para convertir niveles a valores lineales se utilizan las siguientes fórmulas:

$$P = 10^{\frac{a/\text{dB}}{10}} \cdot P_{ref}$$

o

$$U = 10^{\frac{u/\text{dB}}{20}} \cdot U_{ref}$$

Ejemplos: Un nivel de potencia de -3 dB(W) se corresponde con:

$$P = 10^{\frac{-3}{10}} \cdot 1 \text{ W} = 0.5 \cdot 1 \text{ W} = 500 \text{ mW}$$

Un nivel de tensión de 120 dB(μ V) se corresponde con:

$$U = 10^{\frac{120}{20}} \cdot 1 \mu\text{V} = 1000000 \cdot 1 \mu\text{V} = 1 \text{ V}$$

7 Atenuación y ganancia

La función lineal de transferencia a_{lin} de un circuito de dos puertos representa la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada.

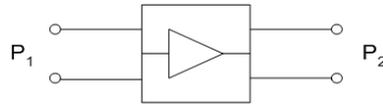


Fig 1: Circuito de dos puertos

$$a_{lin} = \frac{P_2}{P_1}$$

La función de transferencia normalmente se especifica en dB:

$$a = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB}$$

Si la potencia de salida P_2 de un circuito de dos puertos es mayor que la potencia de entrada P_1 , entonces la relación logarítmica entre P_2 y P_1 es positiva. Esto se conoce como **amplificación** o **ganancia**.

Si la potencia de salida P_2 de un circuito de dos puertos es menor que la potencia de entrada P_1 , entonces la relación logarítmica entre P_2 y P_1 es negativa. Esto se conoce como **atenuación** o **pérdida** (se omite el signo menos).

Para la evaluación de la relación de potencias o de la relación de tensiones a partir de los valores en decibelios se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{a/\text{dB}}{10}}$$

o

$$\frac{U_2}{U_1} = 10^{\frac{a/\text{dB}}{20}} \quad (\text{para } R_{out} = R_{in})$$

Los amplificadores convencionales consiguen ganancias de hasta 40 dB en una sola etapa, lo que se corresponde con relaciones de tensión de hasta 100 veces y relaciones de potencia de hasta 10000 veces. Para valores mayores existe el riesgo de que el amplificador oscile. Se pueden obtener ganancias más elevadas conectando varias etapas en serie. La oscilación se puede evitar utilizando un apantallamiento adecuado.

Los atenuadores más comunes tienen valores de 3 dB, 6 dB, 10 dB y 20 dB. Esto se corresponde con relaciones de tensión de 0.7, 0.5, 0.3 y 0.1 o relaciones de potencia de 0.5, 0.25, 0.1 y 0.01. En este caso también se pueden conectar en cascada varios atenuadores para obtener valores de atenuación superiores. Si se intenta obtener atenuaciones superiores con una sola etapa, existe riesgo de que se produzcan diafonías.

Conexión en serie de circuitos de dos puertos

En el caso de una conexión en serie (cascada) de circuitos de dos puertos, se puede calcular fácilmente la ganancia total (o la atenuación total) sumando los valores en decibelios.

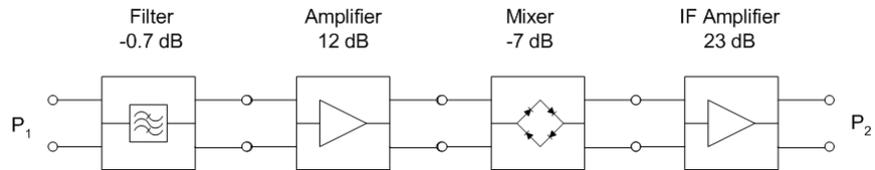


Fig 2: Conexión en cascada de circuitos de dos puertos

La ganancia total se calcula de la siguiente forma:

$$a = a_1 + a_2 + \dots + a_n$$

Ejemplo: Fig. 2 muestra las etapas de entrada de un receptor. La ganancia total se calcula de la siguiente manera:

$$a = -0.7 \text{ dB} + 12 \text{ dB} - 7 \text{ dB} + 23 \text{ dB} = 27.3 \text{ dB}.$$

8 Conversión de decibelios a porcentaje y viceversa

El término “por ciento” significa “por cien”. Un 1% significa la centésima parte de un valor.

$$1\% \text{ de } x = 0,01 \cdot x$$

Al utilizar porcentajes, es necesario formularse lo siguiente:

- ¿Estamos calculando valores de tensión o de potencia?
- ¿Estamos interesados en calcular el %x de una cantidad o un %x más o menos de una cantidad?

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las magnitudes de tensión son tensión, corriente, intensidad de campo y coeficiente de reflexión, por ejemplo.

Las magnitudes de potencia incluyen la potencia, resistencia, figura de ruido y densidad de potencia.

Conversión de % de tensión a decibelios y viceversa

El tanto por ciento x% de una magnitud de tensión se convierte a decibelios de la siguiente forma:

$$a = 20 \cdot \lg \frac{x}{100} \text{ dB}$$

Conversión de decibelios a porcentaje y viceversa

En otras palabras: Para obtener el valor x% en decibelios, se debe convertir primero el valor x del porcentaje a un número racional dividiéndolo por 100. Para convertir a decibelios, se multiplica el logaritmo del número racional por 20 (magnitud de tensión).

Ejemplo: Asumiendo que la tensión de salida de un circuito de dos puertos es igual al 3% de la tensión de entrada, ¿cuál es la atenuación en dB?

$$a = 20 \cdot \lg \frac{3}{100} \text{ dB} = -30.46 \text{ dB}$$

Para convertir el valor en dB a porcentaje:

$$x = 100 \% \cdot 10^{\frac{a/\text{dB}}{20}}$$

Ejemplo: Calcular la tensión de salida de un atenuador de 3 dB como porcentaje de la tensión de entrada.

$$x = 100 \% \cdot 10^{\frac{-3}{20}} = 70.8 \%$$

La tensión de salida de un atenuador de 3 dB es igual al 71% de la tensión de entrada.

Nota: Atenuación significa valores en decibelios negativos.

Conversión de % de potencia a decibelios y viceversa

El tanto por ciento x% de una magnitud de potencia se convierte a decibelios de la siguiente forma:

$$a = 10 \cdot \lg \frac{x}{100} \text{ dB}$$

Para obtener el valor x% en decibelios, se debe convertir primero el valor x del porcentaje a un número racional dividiéndolo por 100. Para convertir a decibelios, se multiplica el logaritmo del número racional por 10 (magnitud de potencia).

Ejemplo: Asumiendo que la potencia de salida de un circuito de dos puertos es igual al 3% de la potencia de entrada, ¿cuál es la atenuación en dB?

$$3 \% \cdot P = 0.03 \cdot P$$
$$a = 10 \cdot \lg \frac{3}{100} \text{ dB} = -15.23 \text{ dB}$$

Para convertir el valor en dB a porcentaje:

$$x = 100 \% \cdot 10^{\frac{a/\text{dB}}{10}}$$

Ejemplo: Calcular la potencia de salida de un atenuador de 3 dB como porcentaje de la tensión de entrada.

$$x = 100 \% \cdot 10^{\frac{-3}{10}} = 50.1 \%$$

La potencia a la salida de un atenuador de 3 dB es la mitad

Conversión de decibelios a porcentaje y viceversa

(50%) de la potencia de entrada..

Nota: Como anteriormente, atenuación significa valores en decibelios negativos

Conversión de % de tensión más o menos a decibelios

Un x% más (o menos) de un valor significa que añadimos (o restamos) el porcentaje al valor de inicio. Por ejemplo, si la tensión de salida U_2 de un amplificador debe ser un x% superior a la tensión de entrada U_1 , el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$U_2 = U_1 + x\% \cdot U_1 = U_1 \left(1 + \frac{x}{100} \right)$$

Si la tensión de salida es menor que la tensión de entrada entonces x será un valor negativo.

Para la conversión a decibelios se utiliza la siguiente fórmula:

$$a = 20 \cdot \lg \left(1 + \frac{x}{100} \right) \text{ dB}$$

Nota: Utilizar el factor de 20 para magnitudes de tensión.

Ejemplo: La tensión de salida de un amplificador es 12.2% superior a la tensión de entrada. ¿Cuál es la ganancia en decibelios?

$$a = 20 \cdot \lg \left(1 + \frac{12.2}{100} \right) \text{ dB} = 1 \text{ dB}$$

Obsérvese que incluso con valores de porcentaje pequeños, el cálculo del tanto por ciento más de una cantidad da como resultado un valor en decibelios diferente que el cálculo del tanto por ciento menos.

20% más da como resultado +1.58 dB

20% menos da como resultado -1.94 dB

Conversión de % de potencia más o menos a decibelios

Para potencia se aplica la siguiente fórmula:

$$P_2 = P_1 + x\% \cdot P_1 = P_1 \left(1 + \frac{x}{100} \right)$$

Para la conversión a decibelios se utiliza la siguiente fórmula:

$$a = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{x}{100} \right) \text{ dB}$$

Nota: Utilizar el factor de 10 para magnitudes de potencia.

Ejemplo: La potencia de salida de un atenuador es 20% menor que la potencia de entrada. ¿Cuál es la atenuación en decibelios?

$$a = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{-20}{100} \right) \text{ dB} = -0.97 \text{ dB} \approx -1 \text{ dB}$$

Al igual que en el caso del cálculo con tensiones, el cálculo del tanto por ciento más de una cantidad da como resultado un valor en decibelios diferente que el cálculo del tanto por ciento menos.

9 Utilización de valores en dB en los cálculos

En esta sección se describe cómo sumar niveles de potencia y tensión en decibelios.

Suma de niveles de potencia

¿30 dBm + 30 dBm = 60 dBm? ¡Por supuesto que no! Si convertimos estos niveles a valores lineales, resulta obvio que $1\text{ W} + 1\text{ W} = 2\text{ W}$, que son 33 dBm y no 60 dBm. Pero esto es verdad sólo si los niveles de potencia no están correlados, es decir, si los valores instantáneos no tienen una relación de fase constante.

Nota: Es necesario convertir los niveles de potencia logarítmicos a valores lineales antes de sumarlos. Es más práctico trabajar con valores en decibelios después de realizar la suma, por lo que normalmente se convierten de nuevo a dBm.

Ejemplo: Se desea sumar tres señales P_1 , P_2 y P_3 con niveles de 0 dBm, +3 dBm y -6 dBm. ¿Cuál es la potencia total?

$$P_1 = 10^{\frac{0}{10}} = 1\text{ mW}$$

$$P_2 = 10^{\frac{3}{10}} = 2\text{ mW}$$

$$P_3 = 10^{\frac{-6}{10}} = 0.25\text{ mW}$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 3.25\text{ mW}$$

Al convertirlo de nuevo a decibelios se obtiene

$$P = 10 \cdot \lg\left(\frac{3.25\text{ mW}}{1\text{ mW}}\right) \text{dBm} = 5.12\text{ dBm}$$

La potencia total es 5.12 dBm.

Medida de señales cerca del nivel de ruido

Una de las tareas más comunes es la de medir señales débiles cercanas al nivel de ruido de un instrumento de medida, como un receptor o un analizador de espectro. El instrumento de medida muestra la suma total del ruido inherente y la potencia de la señal, aunque idealmente sólo debería mostrar la potencia RMS de la señal, que es lo que normalmente ocurre al utilizar un medidor de potencia. En el caso de un analizador de espectro es necesario activar el detector RMS.

Utilización de valores en dB en los cálculos

Primero se determina el nivel de ruido inherente P_r del instrumento de medida desactivando la señal. Después, se mide la señal con el ruido P_{tot} . Se puede obtener la potencia P de la señal restando los valores lineales.

Ejemplo: El nivel de ruido P_r de un medidor de potencia es igual a -70 dBm. Cuando se aplica una señal, el nivel aumenta hasta $P_{tot} = -65$ dBm. ¿Cuál es la potencia de la señal en dBm?

$$P_r = 10^{\frac{-70}{10}} \text{ mW} = 0.000\ 000\ 1 \text{ mW}$$

$$P_{tot} = 10^{\frac{-65}{10}} \text{ mW} = 0.000\ 000\ 316 \text{ mW}$$

$$P = P_{tot} - P_r$$

$$P = 0.000\ 000\ 316 \text{ mW} - 0.000\ 000\ 1 \text{ mW} = 0.000\ 000\ 216 \text{ mW}$$

$$P = 10 \cdot \lg \frac{0.000\ 000\ 216 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \text{ dBm} = -66.6 \text{ dBm}$$

La potencia de la señal P es -66.6 dBm.

Se puede observar que sin realizar ninguna compensación, el ruido del instrumento de medida provocará un error de 1.6 dB, que es un valor relativamente elevado para un instrumento de medida de precisión.

Suma de tensiones

De igual manera, se pueden sumar valores en decibelios para magnitudes de tensión si antes se convierten los valores logarítmicos a valores lineales. Es necesario conocer si los valores están correlados o no, es decir, es necesario conocer la relación de fase.

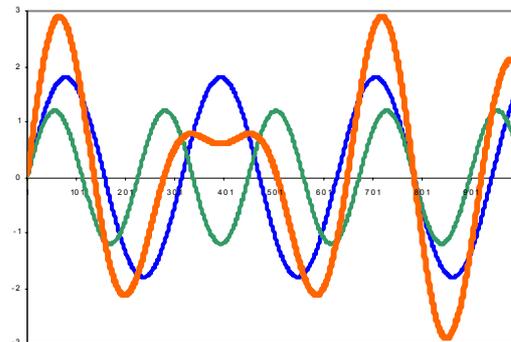


Fig 3: Suma de dos tensiones no correladas

Las señales no correladas se suman de forma cuadrática, esto es, realmente se suman los valores asociados de potencia. Debido a que la resistencia sobre la que se aplica la tensión es la misma para todas las señales, el valor de resistencia desaparece de la fórmula:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

Utilización de valores en dB en los cálculos

Si cada una de las tensiones se especifican como niveles, por ejemplo en dB(V), se deben convertir antes a valores lineales.

Ejemplo: Se suman tres valores de tensión no correlados $U_1 = 0 \text{ dB(V)}$, $U_2 = -6 \text{ dB(V)}$ y $U_3 = +3 \text{ dB(V)}$ de la siguiente manera obteniéndose un valor de tensión U total:

$$U_1 = 10^{\frac{U_1/\text{dB(V)}}{20}} \cdot U_{ref} = 10^{\frac{0}{20}} \cdot 1 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

$$U_2 = 10^{\frac{U_2/\text{dB(V)}}{20}} \cdot U_{ref} = 10^{\frac{-6}{20}} \cdot 1 \text{ V} = 0.5 \text{ V}$$

$$U_3 = 10^{\frac{U_3/\text{dB(V)}}{20}} \cdot U_{ref} = 10^{\frac{3}{20}} \cdot 1 \text{ V} = 1.41 \text{ V}$$

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} = \sqrt{1^2 + 0.5^2 + 1.41^2} \text{ V} = 1.75 \text{ V}$$

Tras convertir U a dB(V), obtenemos:

$$U = 20 \log \frac{1.75 \text{ V}}{1 \text{ V}} \text{ dB(V)} = 4.86 \text{ dB(V)}$$

Si los valores de tensión están correlados, el cálculo es mucho más complicado. Tal y como se muestra en las siguientes figuras, la fase determina la tensión total que se produce.

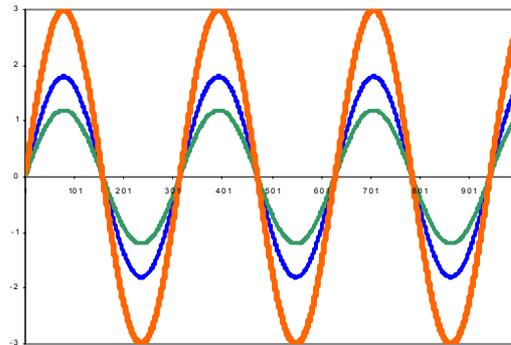


Fig 4: Suma de dos tensiones correladas, fase 0°

El azul representa la tensión U_1 , el verde representa la tensión U_2 y el rojo representa la tensión total U .

Utilización de valores en dB en los cálculos

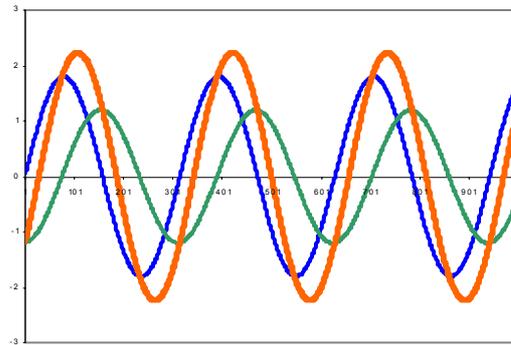


Fig 5: Suma de dos tensiones correladas, fase 90°

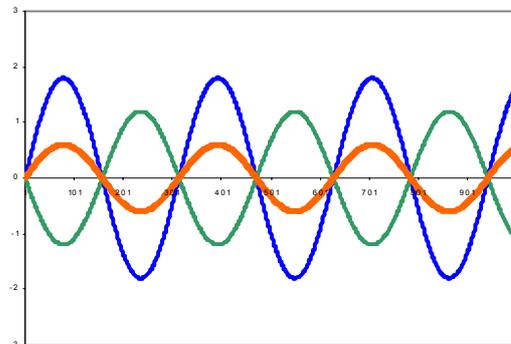


Fig 6: Suma de dos tensiones correladas, fase 180°

La tensión total varía desde $U_{\max} = U_1 + U_2$ para una fase de 0° (en fase) hasta $U_{\min} = U_1 - U_2$ para una fase de 180° (en contra fase). Para valores intermedios, se debe calcular el vector suma de las tensiones.

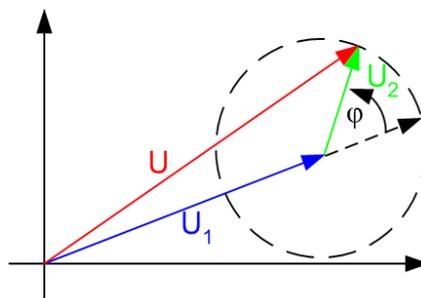


Fig 7: Vector suma de dos tensiones

En la práctica, sólo es necesario conocer los valores extremos U_{\max} y U_{\min} .

Utilización de valores en dB en los cálculos

Si las tensiones U_1 y U_2 son niveles en dB(V) o dB(μ V), primero hay que convertirlas a valores lineales igual que con tensiones no correladas. Sin embargo, la suma es lineal en lugar de cuadrática (ver la siguiente sección sobre tensiones de pico).

Tensiones de pico

Si aplicamos una señal formada por varias tensiones a la entrada de un amplificador, receptor o analizador de espectro, es necesario conocer la tensión de pico. Si la tensión de pico excede un valor determinado, pueden producirse limitaciones como productos de intermodulación no deseados. La tensión de pico U es igual a:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

El valor máximo de entrada para amplificadores y analizadores normalmente se indica en dBm. En un sistema de 50 Ω , la conversión a partir del valor de pico se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$P = 20 \cdot \lg \frac{U^2}{50\Omega} \cdot 10^3 \text{ dBm}$$

El factor 10^3 resulta de la conversión de Vatios a mili Vatios.

Obsérvese que este valor representa la potencia de pico instantánea y no el valor RMS.

10 ¿Qué medimos en decibelios?

En esta sección se resumen algunos de los términos y magnitudes típicas que se especifican en decibelios. Como no se analizan los términos con demasiada profundidad, se recomienda consultar la bibliografía en el caso de necesitar una información más extensa. Las siguientes secciones son independientes unas de otras, por lo que es posible consultar únicamente la información que se necesita.

Relación señal a ruido (S/N)

Una de las magnitudes más importantes en la medida de señales es la relación señal a ruido (S/N). Las medidas fluctuarán más si la S/N se degrada. Para determinar la relación señal a ruido, primero se mide la señal S y posteriormente la potencia de ruido N sin la presencia de la señal. No es posible medir la señal sin ningún ruido, por lo que sólo se obtendrán resultados correctos si la S/N es buena.

$$SN = \frac{S}{N}$$

O en dB:

$$SN = 10 \cdot \lg \frac{S}{N} \text{ dB}$$

En algunas ocasiones, además del ruido también hay distorsión. En estos casos, lo normal es determinar la relación señal a ruido y distorsión (SINAD) en lugar de la relación señal a ruido.

$$SINAD = \frac{S}{N + D}$$

O en dB:

$$SINAD = 10 \lg \frac{S}{N + D} \text{ dB}$$

Ejemplo: Se desea medir la relación S/N de un receptor de radio FM. El generador de señal está modulado a 1 kHz con una desviación de FM adecuada. En la salida de altavoz del receptor, se mide una potencia de 100 mW, por ejemplo. Ahora se desactiva la modulación del generador de señal y se mide una potencia de ruido de 0.1 μW a la salida del receptor. La relación S/N se calcula como sigue:

$$SN = 10 \cdot \lg \frac{100 \text{ mW}}{0.1 \mu\text{W}} = 60 \text{ dB}$$

Para determinar el valor de la SINAD, se modula de nuevo la señal del generador a 1 kHz y se mide la potencia de salida del receptor, 100 mW. A continuación se elimina la señal de 1 kHz utilizando un filtro en el instrumento de medida. Se mide entonces el ruido y la distorsión armónica. Si por ejemplo obtenemos un valor de 0.5 μW, se obtiene un valor de SINAD:

¿Qué medimos en decibelios?

$$SINAD = 10 \cdot \lg \frac{100 \text{ mW}}{0,5 \mu\text{W}} = 53 \text{ dB}$$

Ruido

El ruido está provocado por la agitación térmica de los electrones en los conductores eléctricos. La potencia P (por ejemplo, a la entrada de un receptor o de un amplificador) depende de la temperatura T y también del ancho de banda de medida B (por favor, no confundir ancho de banda B con $B = \text{Belio}$).

$$P = kTB$$

Aquí, k es la constante de Boltzmann $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ (Julios por Kelvin, 1 Julio = 1 Watio-Segundo), T es la temperatura en K (Kelvin, 0 K se corresponde con $-273,15^\circ\text{C}$ o $-459,67^\circ\text{F}$) y B es el ancho de banda de medida en Hz.

A temperatura ambiente (20°C , 68°F), se obtiene una potencia por Hz de:

$$P = kT \cdot 1 \text{ Hz} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W s K}^{-1} \cdot 293,15 \text{ K} \cdot 1 \text{ Hz} = 4,047 \cdot 10^{-21} \text{ W}$$

Si se convierte este nivel de potencia a dBm, se obtiene lo siguiente:

$$P/\text{Hz} = 10 \cdot \lg \left(\frac{4,047 \cdot 10^{-18} \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) \text{ dBm} = -173,93 \text{ dBm/Hz}$$

El nivel de ruido térmico en la entrada de un receptor es -174 dBm por Hz. Obsérvese que este nivel de potencia no depende de la impedancia de entrada, esto es, es el mismo para sistemas a 50Ω , 60Ω y 75Ω .

El nivel de potencia es proporcional al ancho de banda B . Utilizando el factor del ancho de banda b en dB, se puede calcular la potencia total de la siguiente forma:

$$b = 10 \cdot \lg \left(\frac{B}{1 \text{ Hz}} \right) \text{ dB}$$

$$P = -174 \text{ dBm} + b$$

Ejemplo: Un analizador de espectro ideal que no produce ruido intrínseco se configura con un ancho de banda de 1 MHz . ¿Qué potencia de ruido se obtendrá?

$$b = 10 \cdot \lg \left(\frac{1 \text{ MHz}}{1 \text{ Hz}} \right) \text{ dB} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1000000 \text{ Hz}}{1 \text{ Hz}} \right) \text{ dB} = 60 \text{ dB}$$

$$P = -174 \text{ dBm} + 60 \text{ dB} = -114 \text{ dBm}$$

La potencia de ruido a temperatura ambiente con un ancho de banda de 1 MHz es igual a -114 dBm .

Un receptor / analizador de espectro produce un nivel de ruido 60 dB superior con un ancho de banda de 1 MHz que con 1 Hz . Si se quiere

¿Qué medimos en decibelios?

medir niveles inferiores, es necesario reducir el ancho de banda, aunque sólo se puede hacer hasta que se alcance el ancho de banda de la señal. Es posible medir señales con niveles por debajo del nivel de ruido hasta cierto punto debido a que cada señal adicional aumenta la potencia total (ver la sección de medida de señales cerca del nivel de ruido). Sin embargo, se alcanza rápidamente el límite de resolución del instrumento de medida que se está utilizando.

En algunas aplicaciones concretas como medidas de astronomía y espacio profundo se realizan medidas de señales de amplitudes muy bajas provenientes de sondas espaciales y estrellas, por ejemplo. En este caso, la única solución es refrigerar las etapas de entrada del receptor a niveles cercanos al cero absoluto (-273.15°C o -459.67 F).

Promediado del ruido

Para visualizar el ruido de una forma estable, lo normal es activar la función de promediado disponible en los analizadores de espectro. La mayoría de los analizadores de espectro evalúan las señales utilizando lo que se conoce como detector de muestra y promedian los valores logarítmicos que aparecen en la pantalla. Esto da como resultado un error sistemático en la medida ya que los valores más bajos tienen una elevada influencia en el resultado. En la siguiente figura se muestra este efecto utilizando una señal modulada en amplitud con una senoide.

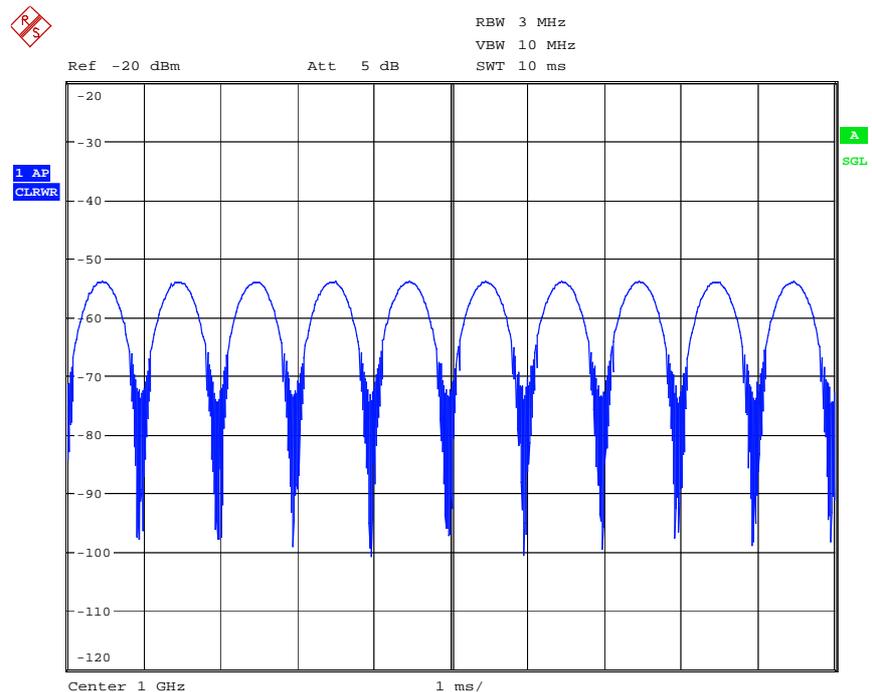


Fig 8: Señal modulada en amplitud con valores de amplitud logarítmicos en función del tiempo

Como se puede ver, la señal sinusoidal aparece distorsionada y tiene un valor promedio que es 2.5 dB más bajo. Los analizadores de espectro de R&S utilizan un detector RMS para evitar este error de medida (ver [3]).

Factor de ruido, figura de ruido

El factor de ruido F de un circuito de dos puertos se define como la relación entre la relación señal a ruido a la entrada SN_{in} y la relación señal a ruido a la salida SN_{out} .

$$F = \frac{SN_{in}}{SN_{out}}$$

La relación señal a ruido se calcula tal y como se ha descrito en páginas anteriores.

Si se especifica el factor de ruido en unidades logarítmicas, se utiliza el término figura de ruido (NF).

$$NF = 10 \cdot \lg \frac{SN_{in}}{SN_{out}} \text{ dB}$$

Para determinar la figura de ruido total resultante de conectar varios circuitos de dos puertos en serie, es necesario considerar algunos detalles que van más allá del objetivo de esta nota de aplicación. Para más detalles, consultar documentación técnica o Internet (ver [2] y [3]).

Ruido de fase

Idealmente, el espectro de un oscilador está representado por una línea situada en la frecuencia de oscilación. Sin embargo, debido a diferentes efectos físicos del ruido, el ángulo de fase de la señal varía lo que da como resultado un ensanchamiento del espectro. Esto se conoce como **ruido de fase**.

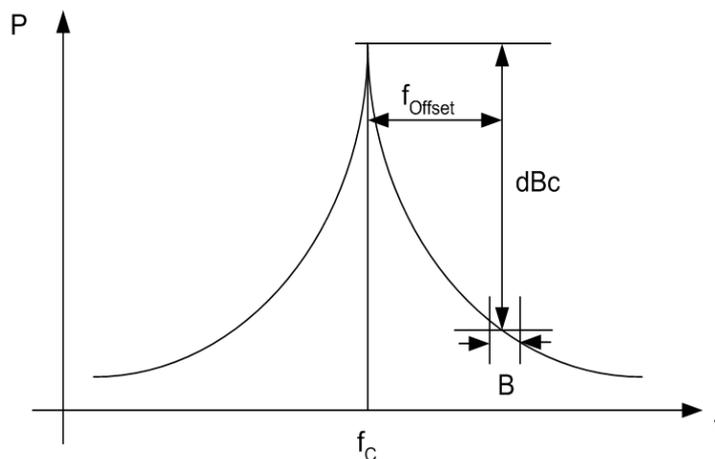


Fig 9: Ruido de fase de un oscilador

Para medir este ruido de fase, es necesario determinar la potencia de ruido del oscilador P_R en función del offset de la portadora f_c (conocido como offset de frecuencia f_{Offset}) utilizando un receptor de banda estrecha o un analizador de espectro en un determinado ancho de banda B . Después

¿Qué medimos en decibelios?

se reduce mediante cálculos el ancho de banda de medida a 1 Hz, se referencia esta potencia a la potencia de portadora P_c para obtener el resultado en dBc (ancho de banda de 1 Hz). La c en dBc indica portadora ("carrier").

Así se obtiene el ruido de fase, o más exactamente el ruido de fase de banda lateral única ("Single SideBand", SSB) L :

$$L = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_R}{P_c} \cdot \frac{1}{B/1 \text{ Hz}} \right) \text{ dBc}$$

El término dBc no sigue el estándar, pero es el término más utilizado. Es posible realizar la conversión a unidades lineales, pero normalmente no se trabaja con ellas.

Normalmente las hojas de características de osciladores, generadores de señal y analizadores de espectro contienen una tabla con los valores del ruido de fase a diferentes offsets de frecuencia. Se asume que los valores son iguales para la banda superior y la inferior.

Offset	Ruido de fase SSB
10 Hz	-86 dBc (1 Hz)
100 Hz	-100 dBc (1 Hz)
1 kHz	-116 dBc (1 Hz)
10 kHz	-123 dBc (1 Hz)
100 kHz	-123 dBc (1 Hz)
1 MHz	-144 dBc (1 Hz)
10 MHz	-160 dBc (1 Hz)

Tabla 1: Ruido de fase SSB a 640 MHz

La mayoría de las hojas de características muestran curvas para el ruido de fase SSB diferentes a la curva mostrada en la Fig. 9. Esto es debido a que los lazos enganchados en fase (PLLs) que se utilizan en los instrumentos modernos para enganchar los osciladores al oscilador de referencia mejoran el ruido de fase aunque también lo degradan en función del offset de frecuencia debido a problemas de diseño.

¿Qué medimos en decibelios?

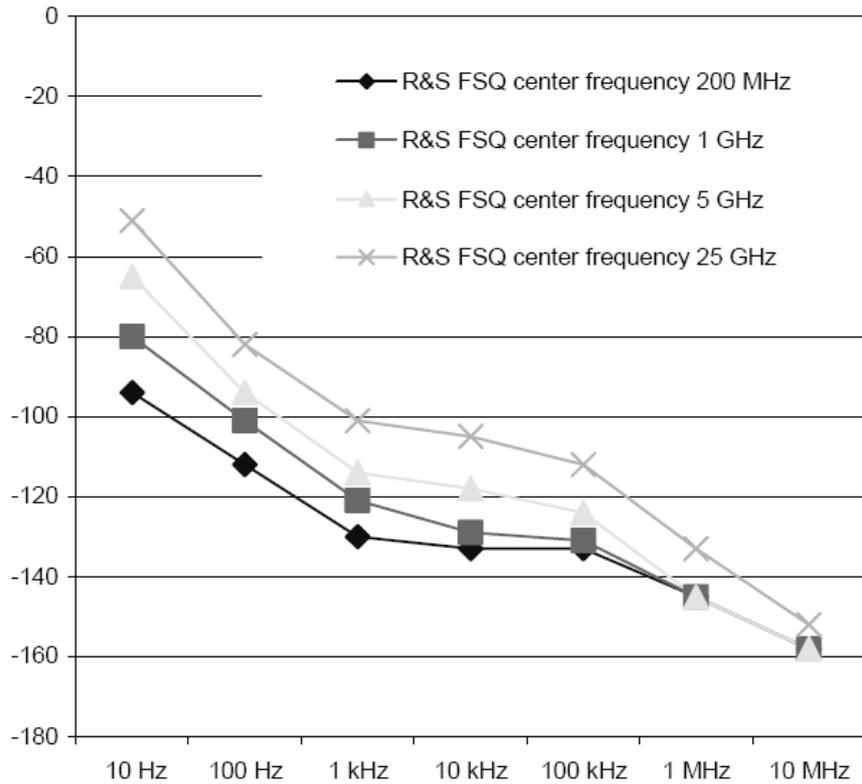


Fig 10: Curvas de ruido de fase para el Analizador de Señal R&S®FSQ

Cuando se comparan diferentes osciladores es necesario considerar el valor de la frecuencia portadora. Si se multiplica la frecuencia de un oscilador utilizando un multiplicador sin ruido (sólo posible en la teoría), la relación del ruido de fase se degradará de manera proporcional a la tensión, esto es, si multiplicamos la frecuencia por 10, el ruido de fase aumentará en 20 dB al mismo offset de frecuencia. Por ello, como regla general los osciladores de microondas son peores que los osciladores de RF. Cuando se mezclan dos señales, los niveles de la potencia de ruido se suma en cada offset de frecuencia.

Parámetros S

Los circuitos de dos puertos se caracterizan utilizando cuatro parámetros: S_{11} (coeficiente de reflexión a la entrada), S_{21} (coeficiente de transmisión en directa), S_{12} (coeficiente de transmisión en inversa) y S_{22} (coeficiente de reflexión a la salida).

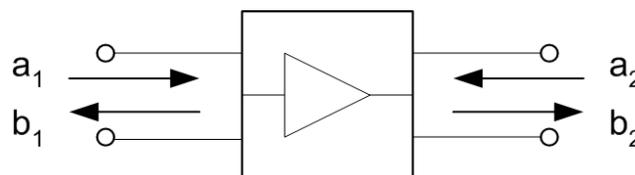


Fig 11: Parámetros S para un circuito de dos puertos

¿Qué medimos en decibelios?

Para calcular los parámetros S se utilizan las señales a_1 , b_1 y a_2 , b_2 de la siguiente forma:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

Las señales a y b son magnitudes de tensión.

Para utilizar los parámetros S como valores en decibelios, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$s_{11} = 20 \cdot \lg S_{11} \text{ dB} \quad s_{21} = 20 \cdot \lg S_{21} \text{ dB}$$
$$s_{12} = 20 \cdot \lg S_{12} \text{ dB} \quad s_{22} = 20 \cdot \lg S_{22} \text{ dB}$$

VSWR y coeficiente de reflexión

Al igual que el coeficiente de reflexión, la relación de tensión de onda estacionaria (VSWR, Voltaje Standing Wave Ratio) o la relación de onda estacionaria (SWR, Standing Wave Ratio) mide la adaptación de una fuente de señal a la impedancia de referencia. La VSWR varía de 1 al infinito y no se expresa en decibelios. Sin embargo, el coeficiente de reflexión r sí.

La relación entre r y la VSWR:

$$r = \left| \frac{1 - VSWR}{1 + VSWR} \right|$$

$$VSWR = \left| \frac{1 + r}{1 - r} \right|$$

Para VSWR = 1 (adaptación muy buena), $r = 0$. Cuando la VSWR es muy elevada, r tiende a 1 (desadaptación o reflexión total).

r representa la relación de dos magnitudes de tensión. Para expresar r en decibelios, se utiliza el término a_r :

$$a_r = 20 \cdot \lg \left(\frac{r}{1} \right) \text{ dB}$$

$$r = 10^{\frac{a_r / \text{dB}}{20}}$$

a_r son las pérdidas de retorno.

A la hora de calcular la VSWR a partir del coeficiente de reflexión, r debe estar en unidades lineales.

En la tabla siguiente se puede observar la relación entre la VSWR, r y a_r/dB . Se puede obtener una aproximación de r dividiendo la parte decimal de la VSWR por dos. Esto es válido para valores de VSWR hasta 1.2.

¿Qué medimos en decibelios?

VSWR	r	a _r [dB]
1,002	0,001	60
1,004	0,002	54
1,006	0,003	50
1,008	0,004	48
1,01	0,005	46
1,02	0,01	40
1,04	0,02	34
1,1	0,05	26
1,2	0,1	20
1,3	0,13	18
1,4	0,16	15
1,5	0,2	14

Tabla 2: Relación entre la VSWR, el coeficiente de reflexión r y las pérdidas de retorno a_r

Obsérvese que para un circuito de dos puertos, r se corresponde con el coeficiente de reflexión a la entrada S_{11} o con el coeficiente de reflexión a la salida S_{22} .

Los atenuadores tienen los coeficientes de reflexión más bajos. Los mejores tienen coeficientes de reflexión $< 5\%$ hasta 18 GHz. Esto se corresponde con unas pérdidas de inserción > 26 dB o una VSWR < 1.1 . Las entradas de los instrumentos de medida y las salidas de los generadores de señal normalmente tienen una VSWR < 1.5 , lo que se corresponde con < 0.2 o $a_r > 14$ dB.

Intensidad de campo

En las medidas de intensidad de campo los términos más comúnmente utilizados son densidad de potencia, intensidad de campo eléctrico e intensidad de campo magnético.

La **Densidad de potencia S** se mide en W/m^2 o mW/m^2 . Las unidades logarítmicas son $dB(W/m^2)$ y $dB(mW/m^2)$.

$$S = 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{1 W/m^2}\right) dB(W/m^2)$$

$$S = 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{1 mW/m^2}\right) dBm/m^2$$

La **Intensidad de campo eléctrico E** se mide en V/m o $\mu V/m$. Las unidades logarítmicas son $dB(V/m)$ y $dB(\mu V/m)$.

$$E = 20 \cdot \lg\left(\frac{E/(V/m)}{1/(V/m)}\right) dB(V/m)$$

$$E = 20 \cdot \lg\left(\frac{E/(\mu V/m)}{1/(\mu V/m)}\right) dB(\mu V/m)$$

¿Qué medimos en decibelios?

Para convertir dB(V/m) a dB(μ V/m) se utiliza la siguiente fórmula:

$$E / \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) = E/\text{dB}(\text{V}/\text{m}) + 120 \text{ dB}$$

La suma de 120 dB se corresponde con la multiplicación por 10^6 en unidades lineales.

$$1 \text{ V} = 10^6 \mu\text{V}.$$

Ejemplo: $-80 \text{ dB}(\text{V}/\text{m}) = -80 \text{ dB}(\mu\text{V}/\text{m}) + 120 \text{ dB} = 40 \text{ dB}(\mu\text{V}/\text{m})$

La **Intensidad de campo magnético H** se mide en A/m o μ A/m. Las unidades logarítmicas son dB(A/m) y dB(μ A/m).

$$H = 20 \cdot \lg\left(\frac{H/(\text{A}/\text{m})}{1(\text{A}/\text{m})}\right) \text{dB}(\text{A}/\text{m})$$

$$H = 20 \cdot \lg\left(\frac{H/(\mu\text{A}/\text{m})}{1(\mu\text{A}/\text{m})}\right) \text{dB}(\mu\text{A}/\text{m})$$

Para convertir dB(A/m) a dB(μ A/m) se utiliza la siguiente fórmula:

$$H / \text{dB}(\mu\text{A}/\text{m}) = H / (\text{dB}/\text{A}) + 120 \text{ dB}$$

Ejemplo: $20 \text{ dB}(\mu\text{A}/\text{m}) = 20 \text{ dB}(\mu\text{A}/\text{m}) - 120 \text{ dB} = -100 \text{ dB}(\text{A}/\text{m})$

Para más información acerca de la intensidad de campo, ver [1].

Ganancia de antena

Normalmente las antenas dirigen la radiación electromagnética en una determinada dirección. La ganancia de potencia G en el receptor se especifica en decibelios con respecto a una antena de referencia. La antena de referencia más común es el radiador isotrópico y el dipolo $\lambda/2$. La ganancia se especifica en dB_i o dB_D. Para calcular la ganancia en unidades lineales, se utiliza la siguiente fórmula para la conversión:

$$G_{lin} = 10^{\frac{G/\text{dB}_i}{10}} \quad \text{o} \quad G_{lin} = 10^{\frac{G/\text{dB}_D}{10}}$$

Para más información acerca de la ganancia y del factor de antena ver [1].

Factor de cresta

La relación entre la potencia de pico y la potencia promedio (valor RMS) de una señal se conoce como factor de cresta. Una señal sinusoidal tiene un valor de pico 2 veces superior al valor de RMS, lo que significa que el factor de cresta es igual a 2, o 3 dB.

Para señales de RF moduladas, el factor de cresta se refiere al valor de pico de la envolvente de la modulación en lugar del valor de pico de la portadora de RF. La envolvente de una señal modulada en frecuencia (FM) es constante, por lo que el factor de cresta es igual a 1 (0 dB).

¿Qué medimos en decibelios?

Si se suman varias señales sinusoidales, teóricamente el valor de pico aumenta hasta la suma de cada una de las tensiones individuales. La potencia de pico P_s sería igual a:

$$P_s = \frac{(U_1 + U_2 + \dots + U_n)^2}{R}$$

La potencia RMS P se obtiene añadiendo las potencias de cada señal:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U_1^2}{R} + \frac{U_2^2}{R} + \dots + \frac{U_n^2}{R}$$

Así se obtiene un factor de cresta C_F igual a:

$$C_F = \frac{P_s}{P}$$

$$C_F = 10 \cdot \lg \frac{P_s}{P} \text{ dB}$$

Cuanto más señales (independientes) se añadan, es menos probable que se alcance la suma de todas las tensiones individuales debido a las diferencias de fase. El factor de cresta varía alrededor de los 11 dB, y la señal tiene una apariencia similar al ruido.

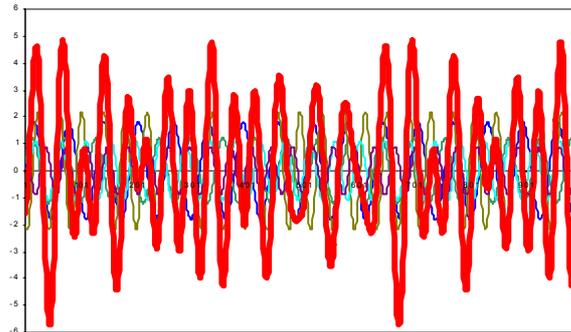


Fig 12: Señal con una apariencia similar al ruido con un factor de cresta de 11 dB

Ejemplos: El factor de cresta del ruido es aproximadamente 11 dB. Las señales OFDM que se utilizan en DAB, DVB-T y WLAN tienen un factor de cresta también de aproximadamente 11 dB. Las señales CDMA fijadas por los estándares CDMA2000 y UMTS tienen factores de cresta que van hasta los 15 dB, pero pueden reducirse hasta los 7 dB a 9 dB utilizando técnicas especiales de modulación de los datos. Excepto en el caso de las ráfagas, la envolvente de las señales de GSM es constante debido al tipo de modulación utilizado (MSK) y por lo tanto el factor de cresta es de 0 dB. Las señales EDGE tienen un factor de cresta de 3.2 dB debido a la función de filtrado de la modulación 8PSK (también excluyendo las ráfagas).

¿Qué medimos en decibelios?

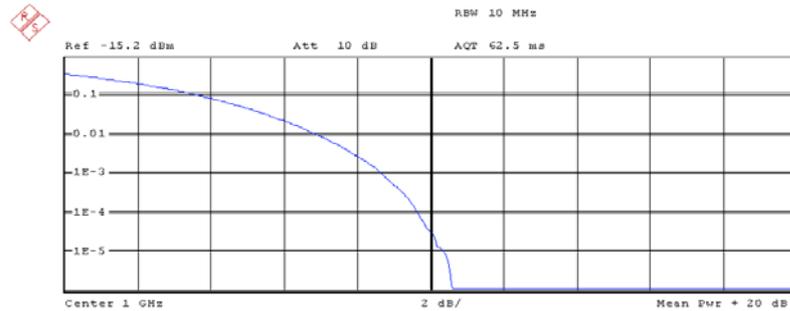


Fig 13: Factor de cresta medido con el Analizador de Señal R&S®FSQ

Potencia en canal y potencia en canal adyacente

Los sistemas de comunicaciones modernos como GSM, CDMA2000 y UMTS gestionan un gran número de llamadas. Para evitar caídas de la red, es importante asegurarse de que en cada canal útil hay exactamente la potencia permitida P_{ch} (donde ch viene de canal en inglés, channel). La potencia en canal se especifica normalmente como un nivel L_{ch} en dBm.

$$L_{ch} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{ch}}{1 \text{ mW}}\right) \text{ dBm}$$

Normalmente L_{ch} es 20 W o 43 dBm.

En los canales adyacentes, la potencia no puede superar el valor de P_{adj} . Este valor se mide en relación a la potencia en canal útil L_{ACPR} (ACPR = adjacent channel power ratio, relación de potencia en canal adyacente) y se especifica en dB.

$$L_{ACPR} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{adj}}{P_{ch}}\right) \text{ dB}$$

Normalmente L_{ACPR} alcanza valores desde los -40 dB (para dispositivos móviles) hasta los -70 dB (para estaciones base UMTS) para los canales inmediatamente contiguos y valores superiores para los canales alternados.

Al medir niveles de potencia es importante considerar el ancho de banda del canal, ya que puede ser diferente para el canal útil y para el canal adyacente. Ejemplo (CDMA2000): Canal útil 1.2288 MHz, canal adyacente 30 kHz. En algunas ocasiones también es necesario seleccionar el filtro de modulación, como por ejemplo, el factor de redondeo de un filtro raíz coseno alzado.

Los analizadores de espectro modernos incorporan funciones de medida que tienen en cuenta el ancho de banda del canal útil y del canal adyacente así como el tipo de filtro de forma automática. Para más información ver [3].

¿Qué medimos en decibelios?

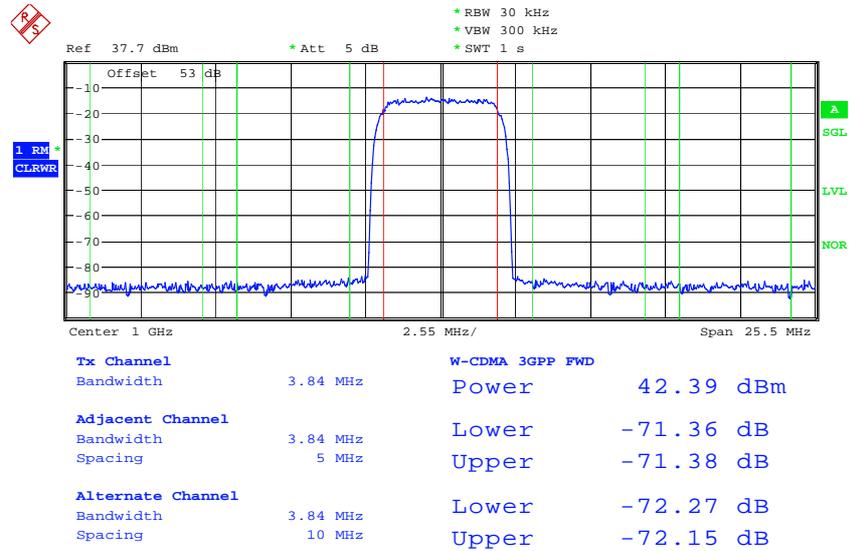


Fig 14: Potencia en canal adyacente para una señal UMTS, medida con el Analizador de Señal R&S® FSQ

Calidad de modulación EVM

Idealmente, la decodificación de señales digitales debería producirse con el menor número de errores posibles. En la transmisión de una señal digital, el ruido y las interferencias son inevitables. Esto hace que la calidad de la señal generada por el transmisor sea muy importante. Una medida de calidad de la señal es la desviación con respecto a la constelación ideal. La siguiente figura muestra un ejemplo con una modulación QPSK.

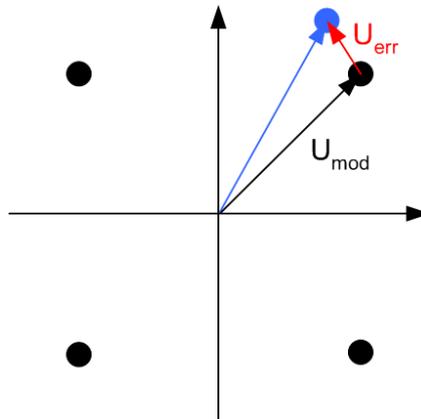


Fig 15: Error de modulación

Para determinar la calidad de la modulación, la amplitud del vector error U_{err} se referencia al valor nominal del vector de la modulación U_{mod} . Este cociente se conoce como vector error o magnitud del vector error (EVM, Error Vector Magnitude) y se expresa en porcentaje o decibelios.

¿Qué medimos en decibelios?

$$EVM_{lin} = \frac{|U_{err}|}{|U_{mod}|} \cdot 100 \%$$

$$EVM = 20 \cdot \lg\left(\frac{|U_{err}|}{|U_{mod}|}\right) \text{ dB}$$

Hay que distinguir entre el valor de pico EVM_{peak} que sólo se produce durante un determinado período de tiempo y el valor RMS del error EVM_{RMS} .

Obsérvese que estos vectores son tensiones. Esto significa que hay que utilizar el $20 \cdot \lg$ en los cálculos. De esta forma un EVM de 0.3% se corresponde con -50 dB.

Rango dinámico de los conversores A/D y D/A

La frecuencia de reloj f_{clock} y el número de bits n son dos de las características más importantes de los conversores analógico-digital (A/D) y digital-analógico (D/A). Cada bit se puede representar con el doble (o la mitad, dependiendo del punto de vista) de la tensión. Así se obtiene un rango dinámico D de 6 dB por bit (como se ha visto anteriormente, 6 dB se corresponde con un factor de 2 para magnitudes de tensión). En la medida de señales sinusoidales hay una ganancia del sistema de 1.76 dB.

$$D = 20 \cdot \lg(2^n) + 1.76 \text{ dB}$$

Ejemplo: Un conversor D/A de 16-bit tiene un rango dinámico de $96.3 \text{ dB} + 1.76 \text{ dB} = 98 \text{ dB}$.

En la práctica, los conversores A/D y D/A presentan no linealidades que hacen que no sea posible llegar a los valores teóricos. Además, el efecto "jitter" del reloj y los efectos dinámicos hacen que los conversores tengan un rango dinámico reducido, especialmente a la frecuencia del reloj. Por ello, las características de un conversor se especifican utilizando lo que se conoce como rango dinámico sin espúreos o el número de bits efectivos.

Ejemplo: Se especifica un conversor A/D de 8-bit A/D que tiene 6.3 bits efectivos a la frecuencia de reloj de 1 GHz. Esto da como resultado un rango dinámico de $37.9 \text{ dB} + 1.76 \text{ dB} = 40 \text{ dB}$.

Para una frecuencia de reloj de 1 GHz, un conversor A/D puede trabajar con señales de hasta 500 MHz (frecuencia de Nyquist). Si sólo se utiliza una parte de este ancho de banda, se puede aumentar el rango dinámico utilizando filtros. Por ejemplo, un conversor de 8-bit puede alcanzar un rango dinámico de 60 dB o más en vez de sólo 50 dB ($= 8 \cdot 6 + 1.76 \text{ dB}$).

A partir del rango dinámico, se puede calcular el número efectivo de bits de la siguiente manera:

$$2^n = 10^{\frac{D/dB - 1.76}{20}}$$

Con $n = \log_2(2^n)$ (\log_2 es el logaritmo en base 2) y

$$\log_2(x) = \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10}(2)} \text{ o } \log_{10}(10^x) = x$$

obtenemos:

¿Qué medimos en decibelios?

$$n / \text{Bit} = \frac{\log_{10}\left(10^{\frac{D/dB-1.76}{20}}\right)}{\log_{10}(2)} = \frac{D/dB-1.76}{20 \log_{10}(2)} = \frac{D/dB-1.76}{20 \log_{10}(2)}$$

Ejemplo: ¿Cuántos bits efectivos tiene un conversor A/D con un rango dinámico de 70 dB?

Se calcula de la siguiente forma:

$$70 \text{ dB} - 1.76 \text{ dB} = 68.2 \text{ dB y } 20 \log_{10}(2) = 6.02$$

$$68.2 / 6.02 = 11.3$$

Así se obtiene como resultado 11.3 bits efectivos.

dB (FS) (“Full Scale”, escala completa)

Los conversores analógico-digital y digital-analógico tienen un rango dinámico máximo determinado por el rango de números que pueden procesar. Por ejemplo, un conversor A/D de 8-bit puede manejar números desde el 0 hasta un máximo de $2^8 - 1 = 255$. Este número también se conoce como el valor a escala completa (n_{FS}). Se puede especificar el nivel de entrada n de un convertidor con respecto al valor de escala completa y representar esta relación como un logaritmo.

$$a = 20 \cdot \lg\left(\frac{n}{n_{FS}}\right) \text{ dB(FS)}$$

Ejemplo: Un conversor A/D de 16-bit A/D tiene un rango de valores de 0 a $2^{16} - 1 = 65535$. Si se conecta a la entrada del conversor una tensión representada por el valor numérico 32737, tenemos:

$$a = 20 \cdot \lg\left(\frac{32737}{65535}\right) \text{ dB(FS)} = -6.02 \text{ dB(FS)}$$

Si el conversor representa tensiones positivas y negativas, hay que dividir el rango total por dos y tener en cuenta el desplazamiento del cero.

Nivel de Presión Sonora

En medidas acústicas, el nivel de presión sonora L_p se mide en decibelios. L_p es la relación logarítmica entre una presión sonora p y una presión sonora de referencia $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (micro pascales). Este valor de presión sonora de referencia es el nivel más bajo de presión que el oído de un ser humano puede percibir en el rango de frecuencia más sensible (alrededor de los 3 kHz). Este nivel de presión se conoce como umbral de audición

$$L_p = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ dB}$$

$$p = 10^{\frac{L_p}{20}} \cdot p_0$$

Niveles ponderados de presión sonora dB(A)

El oído humano tiene una respuesta en frecuencia que también depende del nivel de presión sonora. Cuando se mide presión sonora, se utilizan filtros especiales de ponderación para simular esta respuesta en frecuencia. Así se obtienen valores que simulan la respuesta del oído humano más fielmente que los valores sin ponderar. Los diferentes tipos de filtros de ponderación se conocen como A, B, C y D.

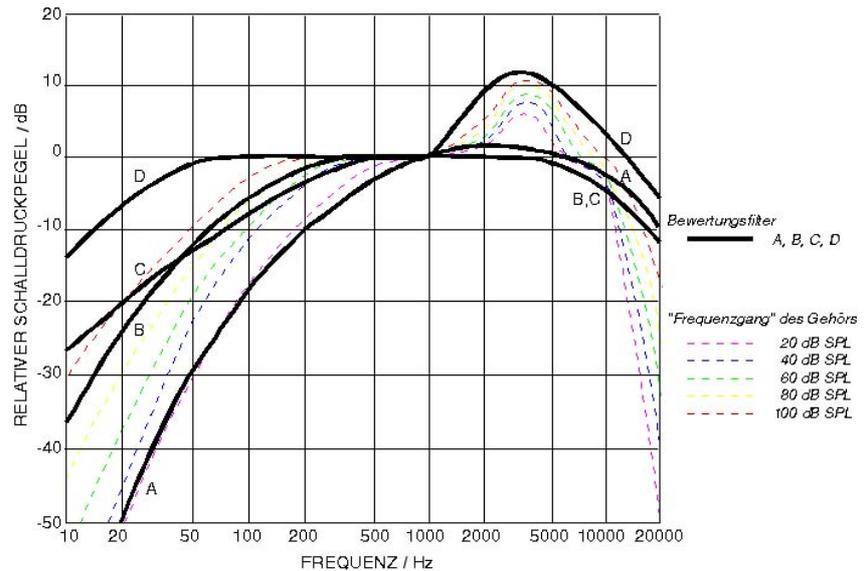


Fig 16: Filtros de ponderación A, B, C y D y la respuesta en frecuencia del oído humano

El filtro tipo A es el más utilizado. El nivel que se obtiene con este filtro se conoce como L_{pA} y se especifica en **dB(A)** para especificar el filtro de ponderación.

Una diferencia del nivel de presión sonora de 10 dB(A) se percibe como si se doblara el volumen. Diferencias en el nivel de 3 dB son claramente audibles, pero sólo es posible reconocer diferencias más pequeñas si se realiza una comparación directa.

Ejemplos: Nuestro rango de audición va desde los 0 dB(A) (umbral de audición) hasta el umbral de dolor de 120 dB(A) a 134 dB(A). El nivel de presión sonora en una habitación muy tranquila puede ser de 20 dB(A) a 30 dB(A). Utilizando 16 bits de datos, el rango dinámico de un CD de música puede alcanzar los 98 dB, valor suficiente para satisfacer el rango dinámico del oído humano.

11 Números que merece la pena conocer

Manejar valores en decibelios es mucho más sencillo si se memorizan unos cuantos valores, a partir de los cuales se pueden obtener otros. Se puede simplificar el problema redondeando hacia arriba o hacia abajo algunos de los resultados para que sea más fácil recordar estas cifras. Todo lo que hay que hacer es memorizar los valores aproximados, por ejemplo, un factor de 2 en potencia se corresponde con 3 dB (en lugar del valor exacto de 3.02 dB).

En la siguiente tabla se muestra una lista con algunos valores útiles de recordad.

Tabla para la conversión entre decibelios y valores lineales

Valor en dB	Relación de potencia		Relación de tensión	
	Aprox.	Exacto	Aprox.	Exacto
0.1 dB	±2 %	+2.3 % -2.3%	±1 %	+1.16 % -1.15 %
0.2 dB	±4 %	+4.7 % -4.5 %	±2%	+2.33 % -2.23 %
0.5 dB	±10 %	+12.2 % -10.9 %	±5 %	+5.9 % -5.5 %
1 dB	± 20 %	+25.9 % -20.5 %	±10 %	+12.2 % -11.9 %
3 dB	2 0.5	1.995 0.501	1.4 0.7	1.412 0.798
3.02 dB	2 0.5	2.0 0.5	1.414 0.707	$\sqrt{2}$ $1/\sqrt{2}$
5 dB	3 0.33	3.16 0.316	1.8 0.6	1.778 0.562
6 dB	4 0.25	3.98 0.25	2 0.5	1.995 0.501
10 dB	10 0.1	10 0.1	3 0.3	3.162 0.316
20 dB	100 0.01	100 0.01	10 0.1	10 0.1
40 dB	10000 0.0001	10000 0.0001	100 0.01	100 0.01
60 dB	1000000 0.000001	1000000 0.000001	1000 0.001	1000 0.001

Tabla 3: Conversión entre decibelios y valores lineales

Números que merece la pena conocer

Nota: *¡3 dB no se corresponde exactamente con una relación de potencia de 2 y 6 dB no se corresponde exactamente con una relación de potencia de 4!. Sin embargo, normalmente se utilizan estas simplificaciones ya que aportan una precisión suficiente en los cálculos.*

Se pueden calcular aquellos valores intermedios que no aparecen en la tabla de la siguiente manera:

4 dB = 3 dB + 1 dB, que se corresponde con un factor de 2 + 20% de la potencia, esto es, aproximadamente 2.4 veces la potencia.

7 dB = 10 dB – 3 dB, que se corresponde con 10 veces la potencia menos la mitad de la potencia, esto es, 5 veces la potencia.

Tabla para sumar decibelios

Si se necesita calcular con precisión la suma de dos valores especificados en decibelios, primero hay que convertir las cantidades a magnitudes lineales, sumarlas y posteriormente convertir el resultado a decibelios. La siguiente tabla es útil a la hora de realizar los cálculos. En la Columna 1 aparece la diferencia entre dos valores en dB como Delta dB. En la Columna 2 aparece el factor de corrección para magnitudes de potencia y en la Columna 3 aparece el factor de corrección para magnitudes de tensión. Para obtener el total sólo hay que añadir el factor de corrección al valor más alto de los dos que se desean sumar.

Delta dB	Potencia	Tensión
0	3.01	6.02
1	2.54	5.53
2	2.12	5.08
3	1.76	4.65
4	1.46	4.25
5	1.19	3.88
6	0.97	3.53
7	0.79	3.21
8	0.64	2.91
9	0.51	2.64
10	0.41	2.39
11	0.33	2.16
12	0.27	1.95
13	0.21	1.75
14	0.17	1.58
15	0.14	1.42
16	0.11	1.28
17	0.09	1.15
18	0.07	1.03
19	0.05	0.92
20	0.04	0.83

Tabla 4: Factores de corrección para sumar valores en decibelios

Números que merece la pena conocer

Ejemplos: 1) Supongamos que se desean sumar los siguientes niveles de potencia: -60 dBm y -66 dBm. Para ello, se restan ambas cantidades obteniéndose una diferencia de 6 dB. Utilizando la tabla se obtiene un factor de corrección de 0.97 dB. Se añade este factor al valor más alto, esto es i.e. -60 dBm (¡-60 dBm es mayor que -65 dBm!) y se obtiene una potencia total de -59 dBm.

2) Al medir una señal en un analizador de espectro, el ruido visualizado en el analizador aumenta en 0.04 dB. A partir de la tabla, se puede ver que el nivel de la señal cale aproximadamente 20 dB por debajo del nivel de ruido del analizador de espectro.

3) Se desea sumar dos valores iguales de tensión. Esto significa que la diferencia en nivel es de 0 dB. La tensión total cale 6 dB (valor obtenido en la tabla) por debajo del valor de la tensión (= dos veces la tensión).

Algunas cifras útiles

Las siguientes cifras también pueden ser útiles a la hora de realizar los cálculos:

13 dBm se corresponde con $U_{\text{RMS}} = 1 \text{ V}$ sobre 50Ω

0 dBm se corresponde con $U_{\text{RMS}} = 0.224 \text{ V}$ sobre 50Ω

107 dB(μV) se corresponde con 0 dBm sobre 50Ω

120 dB(μV) se corresponde con 1 V

-174 dBm es la potencia de ruido térmico con un ancho de banda de 1 Hz a una temperatura aproximada $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($68 \text{ }^\circ\text{F}$).

Otras magnitudes de referencia

Hasta ahora, hemos utilizado como magnitudes de referencia 1 mW y 50Ω . Sin embargo, hay sistemas que utilizan referencias distintas, como en televisión que se usan 75Ω y en acústica donde la impedancia de referencia es 600Ω . Los sistemas de RF con 60Ω como impedancia de referencia o los sistemas con 600Ω de los Estados Unidos no se utilizan demasiado. Sin embargo, es bastante sencillo adaptar las fórmulas a estas nuevas referencias.

R	P_0	U_0	Note
50Ω	1 mW	0.224 V	Ingeniería RF
60Ω	1 mW	0.245 V	Ingeniería RF (antigua)
75Ω	1 mW	0.274 V	Ingeniería TV
600Ω	1 mW	0.775 V	Acústica
600Ω	1.66 mW	1.000 V	Estándar USA

Bibliografía

Tabla 5: Sistemas de referencia adicionales

Precisión, posiciones decimales

¿Cuántas posiciones decimales se deberían utilizar para especificar valores en decibelios?

Si se aumenta un nivel de potencia x en 0.01 dB, el valor lineal varía de la siguiente forma:

$$x \text{ dB} + 0.01 \text{ dB} \equiv 10^{\frac{x+0,01}{10}} = 10^{\frac{x}{10}} \cdot 10^{\frac{0,01}{10}} = 10^{\frac{x}{10}} \cdot 1.0023$$

Esto es equivalente a un aumento de potencia del 0.23%. En el caso de tensión, el cambio es del 0.11%. Este cambio de nivel es comparable a las fluctuaciones normales del resultado de medida.

Por lo tanto, no tiene sentido especificar valores en decibelios con cinco o más decimales salvo en contadas ocasiones.

12 Bibliografía

- [1] Field Strength and Power Estimator, Nota de Aplicación 1MA85, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG [1MA85](#)
- [2] Para una mayor información acerca de la terminología utilizada en esta Nota de Aplicación, ver www.wikipedia.org.
- [3] Christoph Rauscher, Fundamentos del análisis de espectro, Rohde & Schwarz GmbH&Co. KG, PW 0002.6629.00

13 Información adicional

Agradecemos sus comentarios y preguntas acerca de esta nota de aplicación. Puede contactar con la siguiente dirección de correo electrónico:

stecnico@rses.rohde-schwarz.com.

Por favor, visite la página web de Rohde & Schwarz España, www.rohde-schwarz.es. Podrá encontrar otras notas de aplicación y más información.



ROHDE & SCHWARZ

ROHDE & SCHWARZ ESPAÑA · Salcedo, 11 · 28034 Madrid · Teléfono +34 91 33410 70 · Fax +34 91 803 58 33

Internet: <http://www.rohde-schwarz.es> · e-mail: stecnico@rses.rohde-schwarz.com