

Obtención del diagrama de Bode mediante tarjetas de sonido

Jesús Arias

26 de enero de 2006

1. Introducción

Las tarjetas de sonido de los ordenadores PC actuales tienen unas características muy destacables que las hacen adecuadas para su utilización como equipo de medida sin que desmerezcan con respecto a otro equipamiento de laboratorio mucho más caro. Lo único que se necesita para su aplicación a la medida es el desarrollo de los programas adecuados.

El programa que se describe en este documento es capaz de medir el diagrama de Bode de un circuito en el rango de frecuencias de audio y de mostrarlo por pantalla varias veces por segundo. No se necesita para ello ninguna electrónica adicional. Basta con la tarjeta de sonido del PC. Este programa funciona bajo el sistema operativo Linux, con un kernel que incluya los drivers de sonido ALSA y emulación del API OSS. La tarjeta de sonido debe permitir su funcionamiento en modo full-duplex. Se han probado las siguientes tarjetas de sonido:

- SoundBlaster 16 Vibra (ISA PnP, 44.1 kHz)
- Yamaha OPL3-SA (placa base, ISA PnP, 44.1 kHz)
- Chipset SiS 630 + codec Realtek ALC200 (placa base, 48 kHz)
- Chipset Intel ICH5 + codec Analog Devices (placa base, 48kHz)
- Chipset VIA 8237 + codec Realtek ALC650F (placa base, 48kHz)
- Sun Blade 2500 (placa base, Solaris, incompleto)

2. Fundamentos de la medida del diagrama de Bode

El método típico para la obtención del diagrama de Bode de un sistema supone la aplicación de una señal sinusoidal a la entrada del mismo, y la medida de la amplitud y fase de la señal obtenida en la salida. Como la señal de entrada es una senoide, este proceso ha de repetirse para un número grande de frecuencias para así obtener un diagrama de Bode con una resolución aceptable en el eje

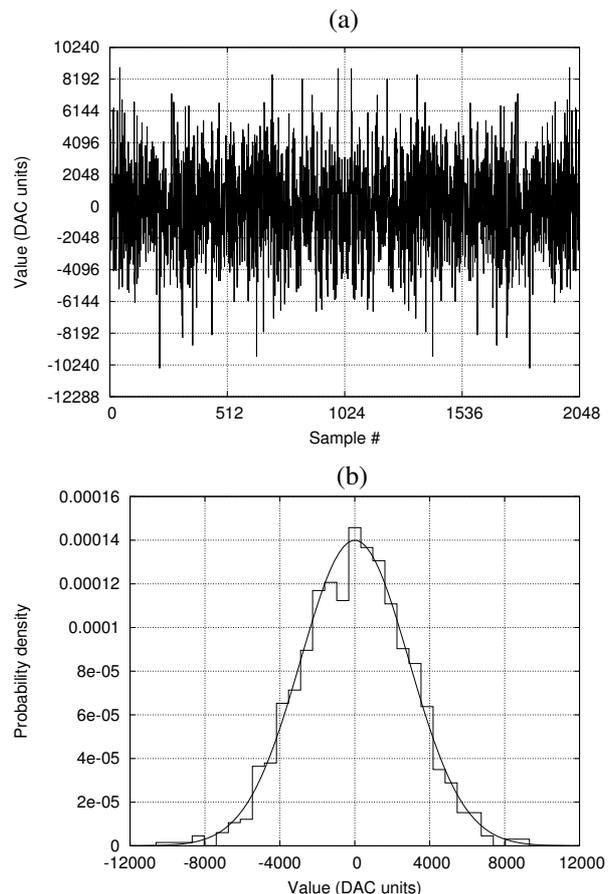


Figura 1: (a) Señal de prueba. (b) Histograma de amplitudes y su ajuste a una curva gaussiana (valor rms: 2894).

X (frecuencia), de modo que el tiempo total de la medida se hace muy largo. Desde que se cambia la frecuencia de la señal de prueba hasta que ese cambio se manifiesta en las muestras capturadas en la salida del circuito bajo medida puede pasar un tiempo del orden de décimas de segundo. Este retardo se debe en gran medida a los grandes “buffers” empleados para la captura y reproducción de audio en el ordenador y también en menor medida al tiempo de establecimiento del circuito bajo prueba. Para acelerar el proceso de medida el programa “bodefft” utiliza un método de medida diferente. Se basa en aplicar a la entrada del circuito todas las frecuencias de prueba simultáneamente y en obtener el diagrama de Bode a partir de la transformada de Fourier de las muestras capturadas

en la salida del circuito. De este modo se puede obtener un diagrama de Bode completo en el tiempo que se emplearía para obtener un único punto de dicho diagrama mediante el procedimiento tradicional.

Una posible señal de prueba que contiene todas las frecuencias con la misma amplitud y fase es el impulso. Esta señal tiene una primera muestra con el máximo valor posible mientras que todas las demás son cero. El impulso es una señal típica en análisis teóricos, pero, como veremos enseguida, tiene poca utilidad práctica debido a su pésima relación pico-promedio (PAR: Peak to Average Ratio). Aunque una muestra tenga el valor máximo, dado que las demás son cero, el valor rms de la señal es muy bajo, y la medida queda enseguida afectada por el ruido de cuantización de los convertidores A/D de la entrada de la tarjeta de sonido. Así, por ejemplo, si pretendemos obtener un diagrama de Bode con 2048 puntos necesitamos una secuencia de 2048 muestras de las que la primera tendrá el valor 32767 mientras que las 2047 restantes valen 0. El valor rms de esta señal será por lo tanto: $32767/2048 \approx 16$ y la relación PAR nos da: $32767/16 \approx 2048$ (¡66 dB!). En consecuencia, con señales de tipo impulso no es posible aplicar un voltaje de entrada al circuito con un valor rms alto sin que se sature algún elemento de sistema de medida. En definitiva, se necesita una señal de prueba diferente con un valor PAR más bajo.

La señal de prueba usada en nuestro programa incluye todas las frecuencias de medida con la misma amplitud pero con fases que se han elegido de forma aleatoria entre los valores de 0° ó 180° . Una vez elegidas las fases la señal en el dominio del tiempo se ha generado mediante una transformada FFT inversa. El resultado es el que se muestra en la Figura 1(a). Esta señal se asemeja mucho al ruido blanco, aunque una observación detallada muestra una simetría en torno a la muestra nº 1024. Esta señal también es periódica, con una periodicidad de 2048 muestras, y no presenta discontinuidades. El histograma con la distribución de amplitudes de dicha señal se muestra en la Figura 1(b), donde se ve que es una distribución gaussiana, con un valor rms de 2894 y un valor de pico de 10451. La relación PAR en este caso es de sólo 3.6 (11 dB).

La señal de prueba se reproduce repetidamente en la salida de audio mientras que simultáneamente se capturan muestras de audio en la entrada. Cada 2048 muestras se realiza una transformada FFT de la señal de la entrada y se rotan 180° las fases de las frecuencias que en la señal de prueba se habían elegido rotadas 180° en lugar de 0° . De este modo se obtiene el diagrama de Bode del circuito bajo prueba de modo equivalente a como se haría usando una señal de tipo impulso, pero con otra señal mucho más conveniente. Lo único que nos resta es corregir el diagrama de Bode Obtenido mediante datos de calibración.

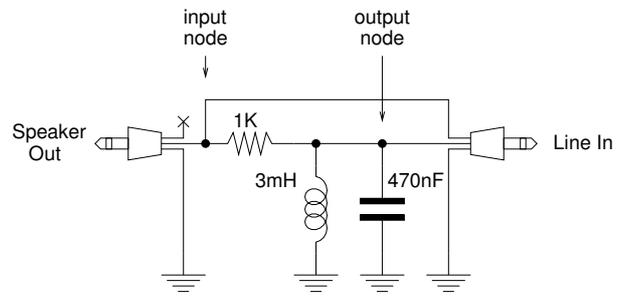


Figura 2: Montaje experimental del circuito de ejemplo (red RLC).

En la actualidad la gran mayoría de las tarjetas de sonido tienen una entrada estéreo. De este modo podemos usar uno de los canales de entrada para registrar el voltaje a la entrada del circuito y otro para registrar el de la salida. La información relativa a la tensión de la entrada resultará muy útil para eliminar imprecisiones de medida debidos a efectos tales como el volumen de la salida de audio, la respuesta en frecuencia de los filtros de audio de la propia tarjeta de sonido y los retardos debidos a los buffers de audio. La única condición necesaria para la correcta cancelación de los citados efectos es tener un buen “matching” entre los dos canales de entrada. Los resultados experimentales demuestran que este matching es suficiente en la totalidad de las tarjetas de sonido probadas.

3. Ejemplo

En la Figura 2 se muestra un circuito de ejemplo cuyo diagrama de Bode va a ser medido mediante el programa “bodefft”. Se trata de una red RLC en la que se espera obtener un comportamiento pasa-banda con una resonancia en torno a los 4 KHz. La salida de audio se conecta a la entrada del circuito y a uno de los canales de entrada de la tarjeta de sonido. El otro canal de salida no se usa. La salida del circuito se conecta a la entrada de audio restante. Es conveniente que la salida de audio esté amplificada para poder atacar impedancias bajas (salida de altavoz, no salida de línea).

Antes de usar el programa “bodefft” debemos ajustar los controles del mezclador de audio de la tarjeta de sonido. Para ello podemos utilizar el programa “aumix”. Debemos seleccionar la entrada de línea como fuente de audio para la grabación en lugar del micrófono y subir el volumen de salida a unos niveles razonables ya que un exceso de amplitud puede provocar la saturación de la entrada y una medida incorrecta, mientras que amplitudes de salida bajas reducen el rango dinámico y en la medida se obtiene más ruido.

Tras arrancar el programa “bodefft” veremos en la pantalla una gráfica con el diagrama de Bode del circuito, esta

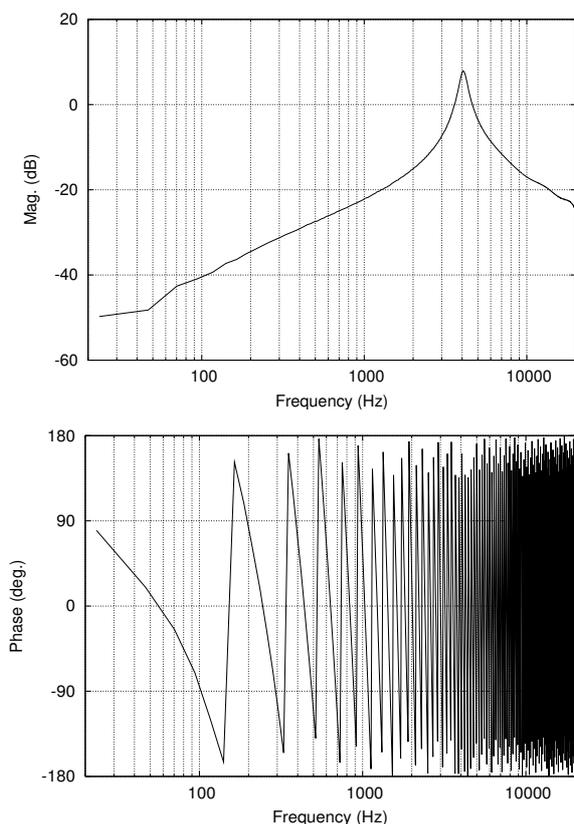


Figura 3: Diagrama de Bode obtenido antes del ajuste de retardo y/o calibración.

gráfica se actualiza prácticamente en tiempo real. Podemos intercambiar las funciones de los dos canales de entrada de audio mediante la tecla “x”, si bien al principio no se usa calibración y por lo tanto sólo se usa uno de los canales. La gráfica obtenida es similar a la que se muestra en la Figura 3.

La gráfica de la magnitud parece prometedora ya que muestra la resonancia prevista. Sin embargo en la gráfica de la fase vemos un descenso muy rápido que da lugar a una especie de “diente de sierra” dado que el espacio de los ángulos es cíclico. El problema se debe al retardo que se tiene entre la secuencia de las muestras de salida y las de entrada. Un retardo da lugar a un descenso continuo de la fase al aumentar la frecuencia. Este retardo dependerá de los “buffers” de audio y nos es fácil de estimar a priori. Por ello el programa “bodefft” proporciona las teclas “d”, “f” y “g” para un ajuste del retardo que nos permita mejorar la gráfica de la fase.

La tecla “d” hace una estimación del retardo de la siguiente manera: En la señal de prueba hay dos frecuencias consecutivas con una fase de 0° . Se mide la diferencia de fases en la señal de entrada para dichas frecuencias, y si el circuito no presenta un cambio de fase brusco en estas frecuencias entonces podemos decir que la diferencia de fases va a ser proporcional al retardo entre la entrada y la

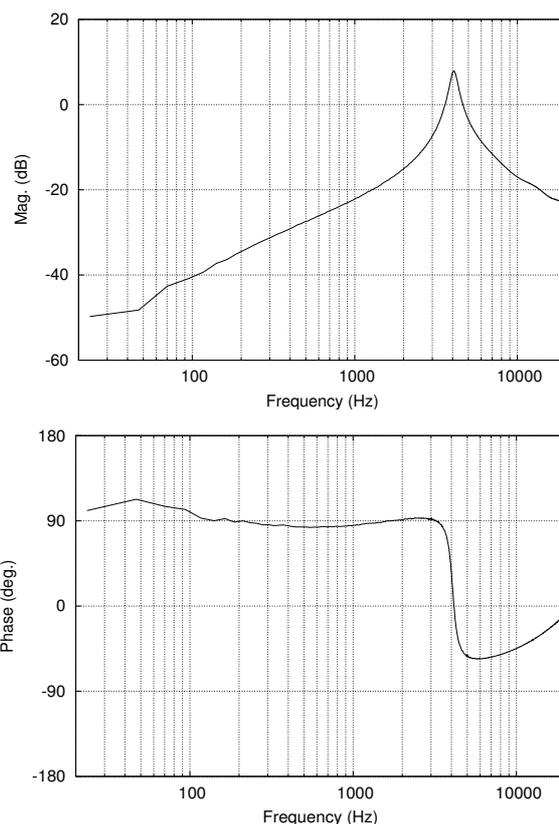


Figura 4: Diagrama de Bode obtenido tras un ajuste del retardo. (Sin calibración)

salida. Si además tenemos en cuenta que la señal de prueba es periódica, basta con descartar el número adecuado de muestras en la entrada para sincronizar las señales de entrada y salida y eliminar el efecto del retardo. Como la cancelación no es totalmente perfecta podemos hacer además un ajuste fino del retardo mediante las teclas “f” y “g” que introducen un retardo de +1 o -1 muestras.

Tras el ajuste del retardo se obtiene un diagrama de Bode como el de la Figura 4. Ahora la caída de 180° en la fase debida a la resonancia del circuito RLC se ve de forma clara. Sin embargo este diagrama aún muestra algunos defectos. Así, por ejemplo vemos una ganancia de pico superior a 0 dB cuando este circuito no debería mostrar ninguna amplificación. También se observa un ligero rizado en la ganancia, especialmente a frecuencias altas, que es debido a los filtros de audio de la tarjeta de sonido, así como una subida de la fase, también en frecuencias altas.

Para corregir estos efectos podemos usar el canal adicional de entrada de audio, que hasta este momento no se había utilizado para nada. Pulsando la tecla “c” se realiza una calibración del sistema de medida que consiste en el registro del voltaje de entrada al circuito, del que se obtendrá la magnitud y fase para cada frecuencia. Esta información se utilizará posteriormente para corregir el voltaje medido en la salida eliminando los efectos antes

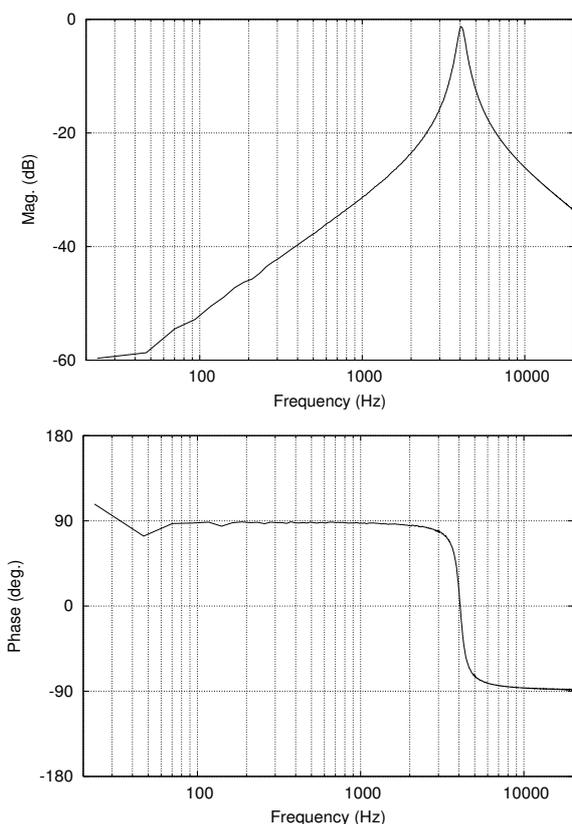


Figura 5: Diagrama de Bode obtenido tras la calibración del sistema de medida.

mencionados. Tras la calibración, se obtiene el diagrama de Bode de la Figura 5. Aquí vemos que se han eliminado los problemas antes mencionados y que el diagrama de Bode obtenido es casi perfecto. Tan solo se observa un poco de ruido en las frecuencias bajas, donde la amplitud está unos 60 dB por debajo del máximo.

El ruido mencionado se debe principalmente a la red eléctrica. Se puede reducir sus efectos promediando un número grande de medidas. Pulsando la tecla “a” se activa dicho promediado. En total se promedian 15 registros de 2048 muestras, lo que corresponde a un tiempo total de 640 ms para una frecuencia de muestreo de 48 KHz. Este tiempo equivale exactamente a 32 ciclos de 50 Hz, de modo que las interferencias debidas a la red eléctrica quedan muy atenuadas. El número óptimo de promedios dependerá por lo tanto de la frecuencia de muestreo y de la frecuencia de la red eléctrica (países civilizados/barbaros :)

4. Midiendo impedancias

Los diagramas de Bode obtenidos mediante el programa “bodefft” se pueden utilizar para obtener la impedancia de un circuito mediante un montaje experimental como el que se muestra en la Figura 6. Aquí se ha incluido

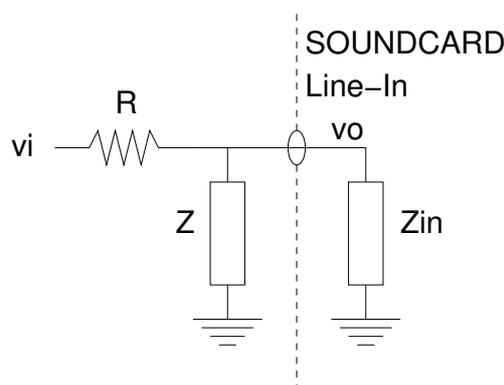


Figura 6: Montaje experimental para la medida de impedancias.

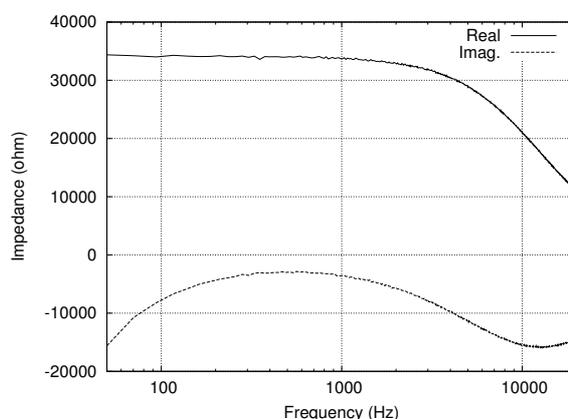


Figura 7: Impedancia de entrada de la tarjeta de sonido.

una resistencia en serie, R , y se considera la impedancia de entrada de la tarjeta de sonido, Z_{in} , que queda en paralelo con la impedancia objeto de medida, Z . La impedancia Z se obtiene como:

$$Z(f) = \left[\left(\frac{1}{H(f)} - 1 \right) \frac{1}{R} - \frac{1}{Z_{IN}(f)} \right]^{-1}$$

Donde $H(f)$ es la función de transferencia, v_o/v_i (figura 6), cuyo diagrama de bode se mide con el programa “bodefft”, R es la resistencia en serie y $Z_{IN}(f)$ es la impedancia de entrada de la tarjeta de sonido. $H(f)$, $Z_{IN}(f)$ y $Z(f)$ son valores complejos.

El valor de R se debe elegir de acuerdo con la magnitud esperada para la impedancia que se mide. Los mejores resultados se obtienen cuando R y Z tienen valores parecidos. La impedancia de entrada de la tarjeta de sonido se mide desconectando Z del circuito y derivando su valor de forma similar a la de Z :

$$Z_{in} = \left[\left(\frac{1}{H(f)} - 1 \right) \frac{1}{R} \right]^{-1}$$

La impedancia de entrada típica ronda los $33k\Omega$ resistivos, con componentes reactivas pequeñas que se notan

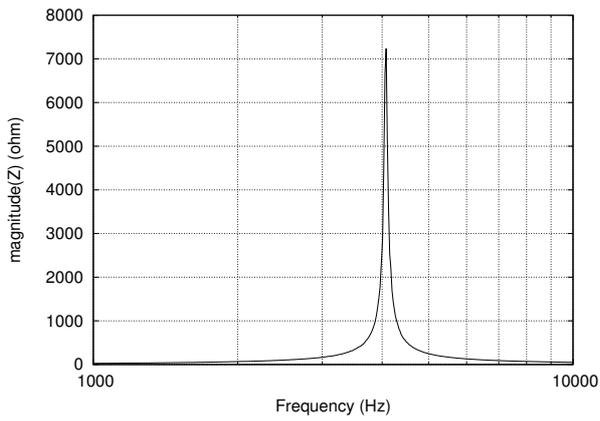


Figura 8: Impedancia obtenida del tanque LC del circuito de ejemplo.

más a frecuencias muy bajas (condensador en serie) o muy altas (capacidad de entrada) (Figura 7).

El cálculo de la impedancia se realiza mediante el programa “impedance.c”. Este programa usa como entrada los diagramas de Bode grabados con el programa “bod-efft”. En la Figura 8 se muestra la impedancia medida para el tanque LC del circuito de ejemplo. A partir de esta medida se puede derivar el valor de Q de la bobina empleada, que ha resultado ser de 85 a una frecuencia de 4 kHz.