

Análisis de bandas prohibidas realizando un análisis espectrográfico

En la primer parte de la práctica utilizaron un amplificador Lock-in para realizar el estudio de la respuesta en frecuencia del cristal sónico que se encuentra en el laboratorio. El análisis que realizaron puede resumirse en una primer caracterización del par parlante -micrófono (sistema de alimentación-detección) que luego utilizaron para llevar a cabo un estudio de la transferencia del cristal para distintas configuraciones cristalinas (cambios en la periodicidad, defectos, guías de onda) y en todas las direcciones cristalinas (ΓX , ΓM , XM).

A modo de recapitulación, lo que hicieron durante la caracterización de las bandas prohibidas del cristal fue un barrido en el dominio de las frecuencias, enviando al generador de funciones interno del Lock-in las instrucciones necesarias para generar una rampa de frecuencias. Esto es, en un pequeño Δt (p. ej.: 300 ms), enviaron la instrucción de generar una onda sinusoidal de cierta amplitud a frecuencia w . En el Δt sucesivo, la instrucción enviada al Lock-in es la misma, sólo que ahora para una onda sinusoidal a frecuencia $w+\Delta w$, y así hasta haber barrido el dominio de frecuencias que quisieran estudiar.

Esto queda resumido en la siguiente figura:

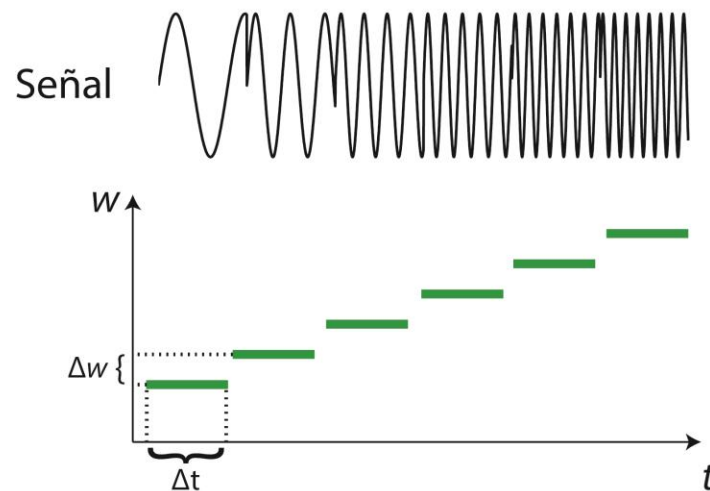


Fig. 1: Rampa en frecuencias utilizada durante la primer parte de la práctica.

Una nueva propuesta para este análisis: el pulso cuadrado

Existe otra manera de analizar la respuesta en frecuencia del sistema realizando una medición sencilla, sin necesidad de utilizar ni un amplificador Lock-in ni de realizar la normalización a partir de los espectros obtenidos sin pasar por el cristal como hicieron antes. Antes de ver esto necesitamos repasar primero algunas cosas.

Como vieron en Física 2 (y probablemente también en Laboratorio 2), un pulso cuadrado ideal puede representarse como una suma infinita de ondas sinusoidales, lo que quiere decir que está compuesto por infinitos armónicos. Esto no es así, sin embargo, para el caso de un pulso 'real' digital, debido a

que toda señal digital tiene su dominio temporal definido por la frecuencia de muestreo (p. ej, cuando decimos que una señal tiene una frecuencia de muestreo de 1 kHz, quiere decir que tenemos 1 muestra cada 1ms). Esto es importante debido a que la frecuencia de muestreo de una señal discreta determina la cota superior de frecuencias definidas en esa señal. Esta frecuencia se llama Frecuencia de Nyquist, y es la mitad de la frecuencia de muestreo ($F_s/2$). Como ejemplo, entonces, con un pulso cuadrado generado con un muestreo a 44.1 kHz sólo se puede tener definido el contenido espectral hasta la Frec. de Nyquist que es 22.05 kHz.

!Nota: Esto tendrán que tenerlo en cuenta a la hora de elegir/generar el pulso cuadrado que utilicen para realizar las mediciones, considerando el dominio de frecuencias que quieran estudiar. Un ejemplo razonable es un pulso muestreado a 44.1 kHz, de 5 ms de duración. Pueden buscar una manera de generarlo, o generar uno online en: <http://www.wavtones.com>.

La propuesta, entonces, es que si en vez de utilizar una rampa de frecuencias como la de la figura 1 se utiliza un pulso cuadrado, se puede realizar el estudio de la respuesta del sistema a partir de la transformada de Fourier de la señal temporal medida con un micrófono a la salida del cristal. Efectivamente, lo que estaremos haciendo es alimentar al sistema durante un Δt con una señal con un gran contenido espectral, como resume la siguiente figura:

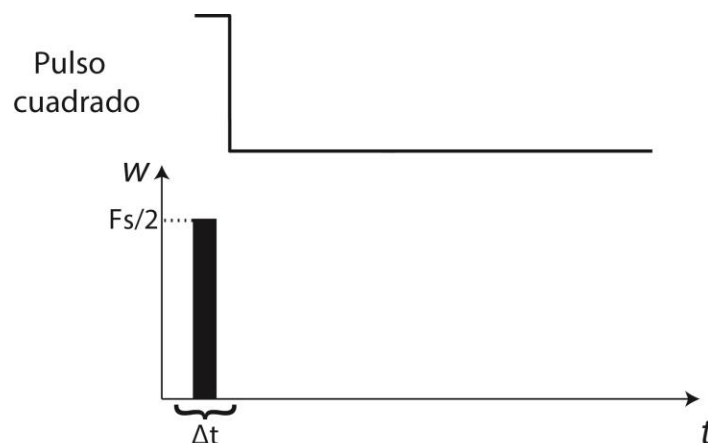


Fig. 2: Pulso cuadrado discreto y su contenido espectral, remarcando la noción de que la máxima frecuencia definida es $F_s/2$, con F_s la frecuencia de muestreo.

La nueva herramienta: el sonograma

Las figuras 1 y 2 muestran la evolución temporal del contenido espectral, tanto de la señal que ya utilizaron para realizar las mediciones (figura 1), como de la nueva propuesta (figura 2). Para la mayoría de ustedes, esta forma de representación probablemente sea novedosa. Al realizar la transformada de Fourier, es probable que ya hayan visto un espectro como los que estudiaron en la primer parte de la práctica, asignándole a cada frecuencia una intensidad o amplitud (en el eje vertical) y el estudio lo realizaban en el dominio de las frecuencias (en el eje horizontal). Las figuras 1 y 2 son bosquejos demostrativos de una herramienta que es ampliamente usada en estudios de fonética, música, procesamiento de habla y en el estudio del canto de aves, entre otros.

Esta herramienta, llamada sonograma, permite tener una representación temporal del contenido espectral involucrado en cada sección de la señal. Para confeccionarlo, se realizan análisis de tiempo-

frecuencia en pequeñas ventanas (ej: 5-10 ms) sucesivas, a lo largo de toda la señal que se quiere analizar. En estos casos se habla de una transformada de Fourier de tiempo reducido, o transformada de Gabor (cuando se utilizan ventanas Gaussianas para realizar el análisis).

!Nota: pueden investigar un poco sobre transformadas de Fourier y leer sobre el 'límite de Gabor', si les llega a interesar. La STFT (Short-Time Fourier Transform) tiene una resolución fija: aumentando la ventana temporal se pierde la resolución temporal, pero mejora la definición en el dominio de las frecuencias, mientras que haciendo ventanas temporales cada vez más pequeñas, disminuye la resolución espectral al aumentar la temporal.

Un sonograma 'completo' es un gráfico en 3 ejes: el eje horizontal es el tiempo (t), el eje vertical la frecuencia (w) y el tercer 'eje' contiene la información de la intensidad de cada frecuencia, que se representa en escala logarítmica o bien por un código de colores o bien por una escala de grises. En este último caso, el blanco se representa la menor intensidad, y el negro la máxima intensidad, dentro de un rango dinámico ajustable.

A modo de ejemplo de un sonograma de una señal real, la siguiente figura muestra la grabación del canto de un diamante mandarín (*Taeniopygia guttata*) y su sonograma. En él se observa claramente un 'granulado' en el fondo, correspondiente al ruido de la grabación. Luego, en cada parte de la señal donde la presión es apreciable, se encuentran estructuras bien marcadas y con distinto contenido espectral, y la escala de grises denota la intensidad de cada frecuencia. También se muestran dos cortes espectrales donde se puede observar, por ejemplo, zonas donde hay grandes aportes centrados en una frecuencia fundamental alta (a) y otros en los cuales la frecuencia fundamental es baja, pero hay fuerte presencia de armónicos superiores (b), representado por un 'apilamiento' de las franjas oscuras en el sonograma.

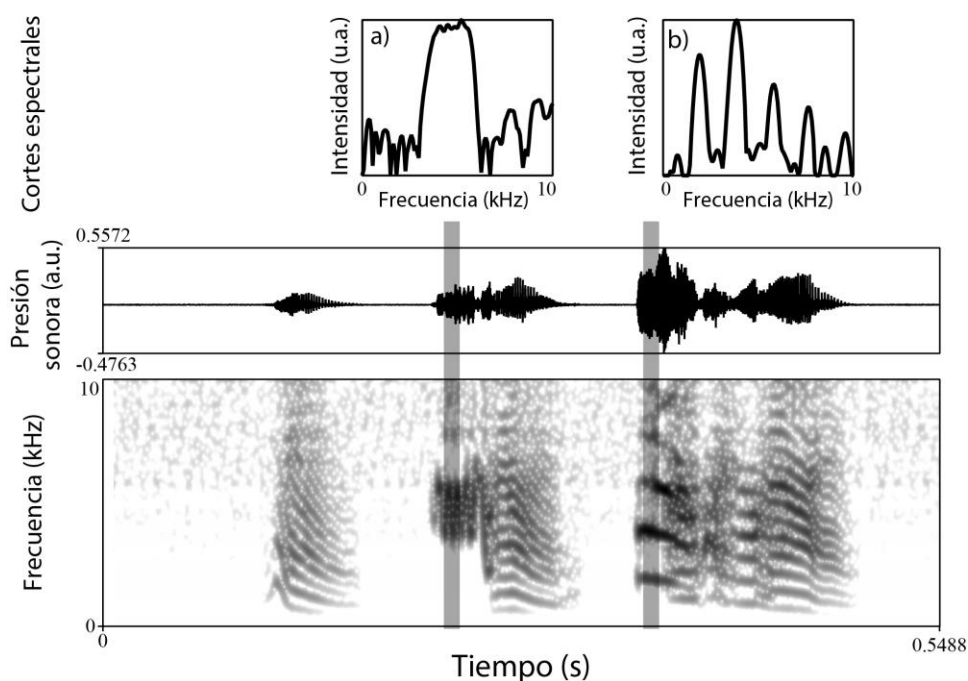


Fig. 3: Señal sonora grabada y sonograma del canto de un diamante mandarín. También se muestran cortes espectrales para hacer la conexión entre el análisis de los espectros y la representación del sonograma.

El programa: Praat

El sonograma mostrado en la figura 3 fue confeccionado con el mismo programa que se propone utilizar para esta parte de la práctica: Praat [1]. Praat engloba una enorme cantidad de herramientas que se utilizan en diversos estudios de señales acústicas, fonéticas, etc. Lo más notable, y lo más importante para el desarrollo de esta práctica, es la posibilidad de visualizar inmediatamente el sonograma de la señal que se está analizando. Para cargar un archivo de audio a Praat, éste debe estar en algún formato de audio típico (ej: .wav) y, una vez abierto el programa, seleccionar la opción '**Open->Read from file...**'. Luego puede visualizarse la señal y su sonograma seleccionando la opción '**View & Edit**' de la lista de botones de la derecha. El programa tiene una serie de cursores que permiten posicionarse sobre algún punto del gráfico y obtener una medición de, por ejemplo, los valores de las frecuencias a determinado tiempo en la señal, valor de la presión, etc. Hay muchísimas opciones que pueden explorarse, pero a continuación detallo algunas de las más relevantes para poder llevar a cabo el análisis.

Opciones del programa

- Una vez abierta una señal, pueden modificarse las opciones del sonograma (rango de frecuencias, ancho de ventana temporal para realizar el análisis de tiempo-frecuencia y rango dinámico en dB a mostrar). Todo esto se controla desde el menú '**Spectrum -> Spectrogram Settings...**'. Este menú está en la parte superior del gráfico de la señal.

Atajos del teclado (Esto puede hacerse con los botones de la parte inferior izquierda del gráfico)

- Ctrl+N = Zoom IN sobre la zona seleccionada en el gráfico superior

- Ctrl+O = Zoom OUT

- Ctrl+L = 'View Spectral Slice': muestra el espectro al tiempo seleccionado (Intensidad vs. frecuencia).

Grabación de audio con Praat

Para grabar la señal que sale del cristal, utilizaremos también el programa Praat. Para esto basta con seleccionar '**New -> Mono Sound**' en la pantalla principal de Praat. Esto abre una nueva pantalla, donde puede elegirse los canales a grabar, la frecuencia de muestreo, y el nombre a darle al sonido grabado. Para realizar la grabación basta con seleccionar el botón '**Record**' y, una vez que la grabación termina, seleccionar '**Stop**' para dejar de grabar.

!Nota/Pregunta: En la grabación del sonido entra en juego la definición de las frecuencias involucradas. Piensen bien a qué frecuencia van a muestrear la medición, considerando que tendrán definición hasta la frecuencia de Nyquist.

!Nota: El programa no guarda automáticamente la grabación en un archivo. Para esto, primero hay que incluir la grabación a la lista de Praat, presente en la pantalla principal, seleccionando el botón '**Save to list**' en la pantalla de grabación. Una vez hecho esto la grabación aparece en la pantalla principal, y para guardar a un archivo basta seleccionar '**Save -> Save as WAV file...**'.

Diseño experimental

Para realizar el experimento utilizando las herramientas que mencionamos arriba, sólo basta con conectar un parlante a la salida de la PC (entrada mini-plug), y un micrófono que también se conecte directamente a la PC (sin pasar por el Lock-in). Como no está presente el filtro del Lock-in con la señal

de referencia como antes, es recomendable que las mediciones se hagan en un esquema de menor ruido posible, por lo cual tapar con la goma espuma el cristal es altamente recomendable.

Para realizar las mediciones deben abrir la ventana de grabación, empezar a grabar y luego reproducir el sonido que ya tenían cargado (el pulso), utilizando la opción '**Play**' , seleccionando el sonido que quieren reproducir en la pantalla principal de Praat.

La actividad propuesta es la de estudiar el fenómeno de bandas prohibidas, midiendo en las distintas direcciones cristalinas la respuesta del sistema ante la presentación de un pulso cuadrado de sonido con alto contenido espectral.

!Nota: como el par parlante-micrófono es distinto al que ya usaron, deberían realizar alguna caracterización del nuevo sistema de alimentación y adquisición de datos.

!Nota: deben asegurarse que el 'balance' de los parlantes está ajustado de forma tal que el sonido salga sólo por uno (para tener una sola fuente sonora), y que la señal que van a utilizar sea una señal MONO (para asegurarse que todo el contenido de la señal está contenido en un único canal).

Filtrado y análisis

Si la señal registrada tiene ruidos a bajas frecuencias (p.ej., ruido de línea) que quieran filtrar, pueden utilizar la opción de filtrado off-line que ofrece Praat. Para esto basta seleccionar la grabación que quieren filtrar de la lista en la pantalla principal, y seleccionar de la lista de botones de la derecha la opción '**Filter -> Pass Hann Band**'. Este filtro dejará pasar las frecuencias entre '**From Frequency**' y '**To Frequency**', utilizando un suavizado de valor '**Smoothing**', en los límites de la ventana para que el corte no sea completamente abrupto. Un valor predeterminado de 100 Hz suele funcionar apropiadamente.

Para realizar el análisis, basta con abrir las mediciones en Praat, y con las herramientas ya explicadas pueden realizar la cuantificación necesaria, y tener una representación visual muy clara del fenómeno de las bandas prohibidas.

!Nota: Pueden usar en conjunción el sonograma y el corte espectral para cuantificar el band-gap.

!Pregunta: ¿cómo esperan que se vea el band-gap en el sonograma?.

Referencias

[1] Paul Boersma & [David Weenink](http://www.praat.org/) (2013). **Praat: doing phonetics by computer [Computer program]**. Retrieved from <http://www.praat.org/>.