Señales y Sistemas
Trabajo Práctico: Modulación AM - Parte 2

1. Objetivos

Los objetivos de esta segunda parte son:

- Calcular e interpretar espectros de señales utilizando la FFT.
- Analizar cómo influyen la duración del tramo observado y la cantidad de puntos de la FFT en el espectro obtenido.
- Utilizar espectrogramas para estudiar señales cuyo contenido en frecuencia cambia en el tiempo.
- Modular y demodular en amplitud una señal de audio.
- Transmitir más de una señal de audio dentro de un mismo archivo.

2. Herramientas

Se utilizará Python con NumPy, Matplotlib y SciPy, y Audacity para grabar los audios. Resultan de utilidad las siguientes funciones:

- `numpy.fft.fft` y `numpy.fft.fftfreq`
- `scipy.io.wavfile.read` y `scipy.io.wavfile.write`
- `scipy.signal.spectrogram`
- `scipy.signal.butter` y `scipy.signal.sosfiltfilt`

En todo el trabajo se utilizará una frecuencia de muestreo $f_s = 96$ kHz. Todos los audios deberán grabarse con Audacity, configurando la frecuencia de muestreo en 96 kHz antes de grabar. No deben utilizarse audios grabados con otra frecuencia de muestreo y luego remuestreados. Todos los espectros deben graficarse con el eje de frecuencias en Hz.

3. Ejercicio 1: Espectro de un tono modulado

En el Ejercicio 5 de la Parte 1 se observó una señal de la forma

$$s_{0(t)} = [1 + \mu \cos(2\pi f_0 t)] \cos(2\pi f_c t).$$

Esta señal es una *modulación en amplitud* (AM): un coseno de frecuencia alta f_c (la portadora) cuya amplitud varía siguiendo a otra señal de frecuencia baja (el mensaje). El parámetro μ es el índice de modulación.

Generar 2 segundos de $s_{0(t)}$ con $f_0 = 200$ Hz, $f_c = 8$ kHz y $\mu = 0{,}5$.

1. Obtener analíticamente la transformada de Fourier de $s_{0(t)}$. Indicar en qué frecuencias hay componentes y con qué amplitud.

2. Calcular la FFT de la señal completa y graficar su módulo. Comparar con el resultado analítico.

3. Repetir el punto anterior tomando únicamente un tramo de la señal, de duración 2 ms, 5 ms, 10 ms y 50 ms.

4. Para el tramo de 2 ms, calcular la FFT con una cantidad de puntos igual al largo del tramo, y luego con 1024 y 8192 puntos.

5. Repetir el punto 2 para $\mu = 0{,}3$ y $\mu = 1$, y para la señal $\cos(2\pi f_0 t)\cos(2\pi f_c t)$.

Preguntas

1. ¿A partir de qué duración del tramo se distinguen las tres componentes del espectro? ¿Qué relación tiene esa duración con f_0?

4. Ejercicio 2: Espectrograma de una señal de voz

Grabar con Audacity entre 5 y 10 segundos de la propia voz, a 96 kHz, y exportarla en formato WAV monoaural. Normalizar la señal para que su valor absoluto máximo sea 1. A la señal normalizada se la llamará $m_{(t)}$.

Para modular un mensaje $m_{(t)}$ cualquiera se utiliza el sistema de la Figura 1, cuya salida es $s_{(t)} = \left[1 + \mu\, m_{(t)}\right] \cos(2\pi f_c t)$.

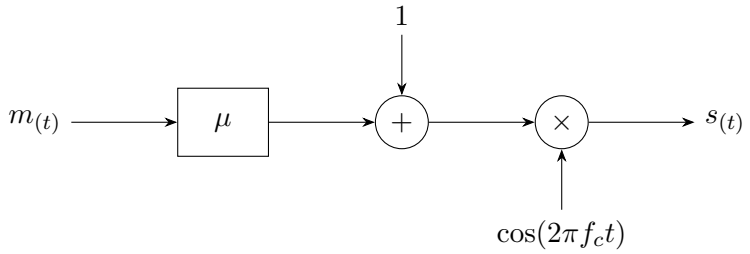


Figura 1: Modulador AM.

1. Calcular la FFT de $m_{(t)}$ completa y graficar su módulo.

2. Graficar el espectrograma de $m_{(t)}$ utilizando una ventana de 40 ms y luego una de 5 ms.

3. Para la ventana de 5 ms, repetir el espectrograma aumentando la cantidad de puntos de la FFT (`nfft`).

4. Generar la señal modulada $s_{(t)}$ con $f_c = 8$ kHz y $\mu = 0{,}8$. Graficar su espectrograma con las dos ventanas anteriores.

5. Guardar $0{,}5\, s_{(t)}$ en un archivo WAV y escucharlo. El factor 0,5 mantiene la señal entre -1 y 1.

Preguntas

1. ¿Qué se observa con la ventana larga que no se observa con la corta, y viceversa? Relacionar con lo obtenido en el Ejercicio 1.

2. En el espectrograma de $s_{(t)}$, ¿dónde se encuentra el contenido de la voz? ¿Por qué aparece dos veces? ¿Qué es la línea horizontal en f_c?

5. Ejercicio 3: Demodulación

Se busca recuperar $m_{(t)}$ a partir de la señal modulada $s_{(t)}$ del ejercicio anterior. El receptor tiene la estructura de la Figura 2, donde el segundo bloque todavía no está definido.

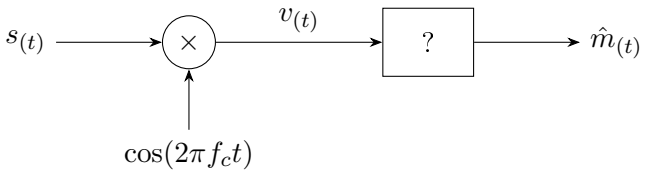


Figura 2: Demodulador. El bloque indicado con un signo de pregunta debe determinarse.

1. Generar $v_{(t)} = s_{(t)} \cos(2\pi f_c t)$. Graficar su espectrograma y escucharla.
2. Determinar qué operación debe realizar el segundo bloque para que su salida $\hat{m}_{(t)}$ contenga únicamente el audio original, e implementarla. Comparar $\hat{m}_{(t)}$ con $m_{(t)}$ en el tiempo, en el espectrograma y escuchándolas.
3. Repetir la demodulación multiplicando en el demodulador por $\cos(2\pi f_c t + \varphi)$ en lugar de $\cos(2\pi f_c t)$, con $\varphi = 0$, $60°$ y $90°$. Para cada caso medir el valor absoluto máximo de la señal recuperada y graficar su espectrograma.

Preguntas

1. ¿Cómo es el espectro de $v_{(t)}$? Justificar analíticamente dónde queda ubicado el contenido de la voz.
2. ¿Se escucha alguna diferencia entre $v_{(t)}$ y $m_{(t)}$? ¿Y en el espectrograma?
3. ¿Qué parte del espectro de $v_{(t)}$ debe conservarse y qué parte debe eliminarse? ¿Qué tipo de sistema realiza esa operación?
4. ¿Cómo depende el valor medido de φ? Justificar analíticamente. ¿Qué consecuencia tiene esto para un receptor que no conoce la fase de la portadora?

6. Ejercicio 4: Dos emisoras en un mismo archivo

Se desea guardar dos audios distintos en un único archivo WAV de un solo canal, de manera que cada uno pueda recuperarse por separado.

Grabar dos audios $m_{1(t)}$ y $m_{2(t)}$ de igual duración (o recortados a la misma duración), ambos a 96 kHz y normalizados.

1. Generar
$$w_{(t)} = 0{,}25 \Big[\big(1 + \mu\, m_{1(t)}\big) \cos(2\pi f_1 t) + \big(1 + \mu\, m_{2(t)}\big) \cos(2\pi f_2 t) \Big]$$
con $f_1 = 8$ kHz, $f_2 = 12$ kHz y $\mu = 0{,}8$. El factor 0,25 mantiene la señal entre -1 y 1. Guardarla en un archivo WAV.
2. Graficar el espectrograma de $w_{(t)}$.
3. Recuperar $m_{1(t)}$ y $m_{2(t)}$ con el procedimiento del Ejercicio 3. Escuchar los resultados.

4. A partir de las respuestas a las preguntas, modificar el sistema para que ambos audios se recuperen sin interferencia. Generar nuevamente el archivo, demodular y comparar con el caso anterior.

Preguntas

1. ¿Se recupera cada audio limpio? Describir lo que se escucha además del audio buscado.
2. Observando el espectrograma de $w_{(t)}$, ¿qué rango de frecuencias ocupa cada emisora? ¿Hay alguna región compartida?
3. ¿Qué debe cumplir cada audio *antes* de ser modulado para que las emisoras no se interfieran?
4. ¿Qué procesamiento previo a la modulación permite solucionar el problema? ¿Debe modificarse además el filtro del demodulador?

7. Ejercicio 5: Recepción de un archivo desconocido

Junto con este enunciado se entrega el archivo `emisoras.wav`, que contiene varias emisoras AM generadas de la misma forma que en el ejercicio anterior. No se informa cuántas son ni en qué frecuencias se encuentran. Las portadoras no tienen necesariamente la misma fase.

1. Graficar el espectrograma del archivo, eligiendo sus parámetros de manera conveniente y justificando la elección.
2. Determinar cuántas emisoras hay, la frecuencia y la fase de la portadora de cada una, el ancho de banda que ocupa y en qué intervalos de tiempo transmite.
3. Demodular cada emisora y guardar cada audio recuperado en un archivo WAV.
4. Indicar qué se escucha en cada una.

Preguntas

1. ¿Cómo puede determinarse la fase de cada portadora?
2. ¿Qué ocurre si se la ignora?

8. Entrega

La entrega deberá incluir:

- Informe completo en formato PDF, sin código, con los gráficos obtenidos, las respuestas a todas las preguntas planteadas y sus justificaciones.
- Código fuente.
- Todos los archivos WAV grabados y generados.

Uso de herramientas de inteligencia artificial: se permite utilizarlas para entender los temas y como apoyo para escribir el código, pero no para resolver el trabajo completo. Cada integrante del grupo debe poder justificar las decisiones tomadas y explicar los temas involucrados y el código entregado.