

Aplicación de filtros digitales a sistema DTMF

Nombre: Juan Sebastián Dueñas

Correo: jsduenass@unal.edu.co

año: 2019

Introducción

Motivación: La codificación de información en señales es ampliamente utilizada en el área de telecomunicaciones. Específicamente el sistema DTMF (Dual-Tone Multi-Frequency) es un sistema en el cual a partir de dos tonos simultáneos se codifican 16 salidas únicas. Normalmente se les asignan los valores del 0 al 9 más ciertos caracteres especiales (*, #, A, B, C, D). El sistema DTMF fue utilizado originalmente en los teclados de línea telefónica para identificar y transmitir el número marcado. A pesar de ser una tecnología simple y con cierto tiempo actualmente sigue siendo aplicada principalmente para la recolección de información de usuarios por parte de call centers.

Aplicación a desarrollar: Se busca analizar una señal de audio y poder identificar la secuencia de teclas marcadas. La señal tiene una frecuencia de muestreo original de 44100 Hz debido a que los tonos se encuentran en un rango de frecuencias menor a 2000 Hz se hará un remuestreo con frecuencia de muestreo de 8000 Hz implementando un interpolador y un decimador con el filtro pasa bajas correspondiente. Sobre la nueva señal remuestreada se implementan 8 filtros pasa bandas con el objetivo de identificar cada una de las frecuencias que conforman el sistema DTMF.

Fundamentación Teórica

Modificación de la frecuencia de muestreo

Interpolación (Up-sampling)

La interpolación permite aumentar la frecuencia de muestreo por un factor entero. Una primera aproximación para lograr este aumento de frecuencia se lograría al introducir muestras intermedias con valor 0. A este proceso se le conoce como Zero stuffing. Al ver la respuesta en frecuencia vemos que un aumento por un factor N en la frecuencia de muestreo genera N repeticiones de la señal en el espectro de la frecuencia. Para obtener una respuesta en frecuencia en igual a la original se realiza un filtro pasa bajos que tome únicamente el primer rango de frecuencias atenuando las repeticiones. Los requisitos que debe cumplir el filtro es que la frecuencia de corte normalizada sea $\Omega_c = \pi/N$. Dado que se eliminan las repeticiones hay una atenuación de la señal en N veces, por lo que se requiere a su vez una amplificación o ganancia de N. Para obtener una señal semejante a la original. Al aplicar el filtro las muestras introducidas por Zero stuffing toman el valor correspondiente que deberían tener de ahí que se le conozca como filtro de interpolación pues interpola y allá los valores de estas muestras intermedias.

Decimación (Down-sampling)

La decimación o disminución de la frecuencia de muestreo es una técnica que permite reducir la complejidad al momento de analizar señales. Esto se consigue desechando algunos datos y conservando únicamente uno cada L muestras. Al momento de hacer disminuciones de la frecuencia de muestreo hay que tener en cuenta el *teorema de Nyquist Shannon* el cual establece que: la frecuencia de muestreo tiene que ser el doble que la frecuencia máxima que tenga la señal.

Si no se cumple esta condición se cae en el riesgo de que se produzca fenómenos de alising en el cual frecuencias altas generar interferencia distorsionando la señal. Para evitar el fenómeno de alising antes de hacer el Down sampling se puede realizar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte normalizada de $\Omega_c = \pi/L$.

Conociendo el proceso de interpolación y decimación se puede expandir el cambio de frecuencia para que no esté limitado a factores enteros, sino que se pueda realizar por valores racionales. Un cambio de muestra racional (N/L) puede obtenerse realizando un Up-sampling por N y un Down-sampling por el factor L . Como se vio anteriormente la implementación de un filtro pasa bajas es requerido antes del remuestreo si es Down-sampling y después de el remuestreo para Up-sampling. Por lo que el orden de las operaciones a realizar es importante y siempre se debe realizar el Up-sampling antes que el Down-sampling y de esta manera utilizar un mismo filtro con doble función. Este filtro pasa bajas tiene que tener la frecuencia de corte menor entre el Up-sampling y el Down-sampling.

$$\Omega_c = \min\left(\frac{\pi}{N}, \frac{\pi}{L}\right)$$

Dual-Tone Multi-Frequency

Es un sistema de codificación por tonos utilizado principalmente en los teclados de teléfono, el cual permite identificar la tecla oprimida mediante la combinación de 2 señales con frecuencias características. Actualmente es utilizado en telecomunicaciones para la transmisión de información a call centers. Se caracteriza por codificar la tecla con un tono de fila y un tono de columna. Los tonos de filas son frecuencias bajas y los tonos de columna son frecuencias altas. Ambos tonos tienen que estar presentes para identificar la tecla. A continuación en la se pueden observar la frecuencia asignada cada fila y columna.

Frecuencias DTMF (con sus sonidos)

	1209 Hz	1336 Hz	1477 Hz	1633 Hz
697 Hz	1	2	3	A
770 Hz	4	5	6	B
852 Hz	7	8	9	C
941 Hz	*	0	#	D

Figura 1: frecuencias de codificación de tecla

Otros requisitos que debe cumplir un sistema DTMF al generar los tonos admite una zona de transición o error de 1,5% de frecuencia nominal. Además, las frecuencia alta (columna) son 3dB más altas que las bajas frecuencia baja(filas). El tono debe estar prendido por al menos 50 ms con un intervalo de silencio de 50 ms.

Filtros FIR por Método de la ventana

Los filtros FIR (Finite Input Response) es un tipo de filtro no retroalimentado es un sistema que depende de la señal de entrada en el presente y en N tiempos pasados, las cuales multiplica por unos coeficientes para producir una respuesta en frecuencia donde produzca un banda pasante de frecuencias donde se deje la señal lo más inalterada posible; una banda rechazada donde se busca atenuar o eliminar el rango de frecuencias que la componen; y una zona de transición entre estas dos. Para el desarrollo de filtros FIR existen varios métodos entre los cuales está el método de la venta el cual consisten en hallar los coeficientes que produzcan la cierta forma en el dominio de la frecuencia. A continuación en la Figura 2 se muestran la fórmula que representa la forma de diferentes tipos de ventanas.

Ventana	Secuencia temporal $0 \leq n \leq N-1$
Rectangular	$\begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & n \geq N \end{cases}$
Bartlett (triangular)	$\begin{cases} \frac{2n}{N-1} & 0 \leq n \leq \frac{N-1}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N-1} & \frac{N-1}{2} \leq n \leq N-1 \end{cases}$
Von Hann (Hanning)	$\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi n}{N-1} \right)$
Hamming	$0.54 - 0.46 \cdot \cos \frac{2\pi n}{N-1}$
Blackman	$0.42 - 0.5 \cdot \cos \frac{2\pi n}{N-1} + 0.08 \cdot \cos \frac{4\pi n}{N-1}$

Figura 2: funciones de distintos tipos de ventana

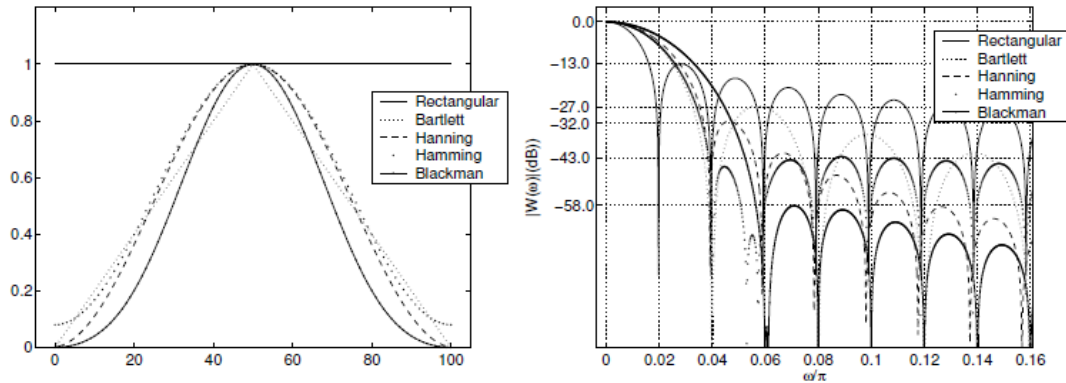


Figura 3: forma de ventanas y respuesta en frecuencia

En el diseño de filtros se deben tener en cuenta 2 objetivos a minimizar el ancho de la zona de transición y el rizado producido. Las diferentes ventanas generan un comportamiento distinto, el ancho de la zona de transición representa el rango de frecuencias necesario para pasar de a banda de paso a la banda de rechazo (Normalmente se expresa en frecuencias normalizadas). Rizado puede ser de 2 tipos en la banda de pazo o en la banda de rechazo en ambos casos corresponde a la atenuación máxima admisible. Para las ventanas más representativas los valores de ancho de zona de transición y la atenuación son conocidos como se muestra en la Figura 4.

Ventana	Anchura del lóbulo ppal de la ventana	Anchura de la banda de transición del filtro diseñado $\Delta\omega$	Pico Lóbulo secundario de la ventana(dB)	Atenuación del filtro diseñado con esta ventana R_s (dB)
Rectangular	$\frac{4\pi}{N}$	$\frac{1.8\pi}{N}$	-13	-21
Bartlett (triangular)	$\frac{8\pi}{N}$	$\frac{6.1\pi}{N}$	-25	-25
Von Hann (Hanning)	$\frac{8\pi}{N}$	$\frac{6.2\pi}{N}$	-31	-44
Hamming	$\frac{8\pi}{N}$	$\frac{6.6\pi}{N}$	-41	-53
Blackman	$\frac{12\pi}{N}$	$\frac{11\pi}{N}$	-57	-74

Figura 4: Características de las diferentes ventanas

Metodología de diseño

Modificación de la frecuencia de muestreo

La señal de audio que va a ser tratada tiene una frecuencia de muestreo de 44.1 KHz, Los tonos utilizados para la codificación de la información se encuentran en un rango de frecuencias menor a 2 KHz. Con el objetivo de reducir la complejidad que representa el análisis sobre una señal con frecuencia de muestre tan alta, se hace un cambio de la frecuencia de muestreo a 8KHz el cual cumple con suficiencia *teorema de muestreo de Nyquist Shannon*.

Al realizar la razón entre la frecuencia nueva (8000 Hz) con respecto a la original (44100 Hz) obtenemos un factor de 80/441 el cual es demasiado alto para su implementación. Por este motivo se se decide realizar una aproximación.

razón entre frecuencias		
80/441	0,1814	
aproximación		error
1/5	0,2000	10,3%
1/6	0,1667	8,1%
2/7	0,2857	57,5%
2/9	0,2222	22,5%
2/11	0,1818	0,2%

Figura 5: aproximaciones de razón de remuestreo

Se definió utilizar la razón de 2/11 produce un error en la frecuencia de 0,2 %. Según lo cual se realizará un interpolador con N=2 y un decimador L=11.

Diseño filtro pasa bajos

Se plantean los requisitos del filtro pasa bajos la frecuencia de corte está determinada por el decimador al tener el orden más alto.

Limite banda atenuada $\omega_s = \min\left(\frac{\pi}{N}, \frac{\pi}{L}\right)$

$$\omega_s = \frac{1}{11}\pi = 0.909\pi$$

$$f_s = f_T * \frac{\omega_s}{2\pi} = 44100 * \frac{\pi}{22\pi} = 2004 \text{ Hz}$$

Limite banda pasante $\omega_p = 2\pi \frac{f_p}{f_T}$

El tono de más alta frecuencia del sistema es 1633 por lo que se define un valor límite de frecuencia pasante $f_p = 1700$

$$\omega_p = 2\pi \frac{1700}{44100} = 0.077\pi$$

Banda de transición $\Delta\omega = \omega_s - \omega_p$

$$\Delta\omega = 0.0138\pi$$

Evaluando el orden según la relación entre orden y banda den transición para cada tipo de ventana (Figura 4) obtenemos:

tipo	orden
rectangular	130
barlett	442
von Hann	449
Hamming	478
blackman	797

Figura 6: orden de filtro para diferentes ventanas

Dado los resultados obtenidos se escoge la ventana rectangular por tener un orden de filtro aceptable.

Se determina la frecuencia de corte $f_c = \frac{f_p + f_s}{2}$

$$f_c = \frac{2004 + 1700}{2}$$

$$f_c = 1850$$

Diseño filtro pasa bandas

El diseño de los filtros pasa bandas se realiza después de haber realizado el cambio de frecuencia de muestreo las frecuencias que identifican cada fila o columna están muy cercanas entre por lo que una zona de transición delgada es fundamental, es por ello que se usa una ventana de forma cuadrada.

frecuencia muestreo	8000
---------------------	------

frecuencia	error 3,5 %	Banda de transicion	orden
697	24,395	0,00609875	295
770	26,95	0,0067375	267
852	29,82	0,007455	241
941	32,935	0,00823375	219
1209	42,315	0,01057875	170
1336	46,76	0,01169	154
1477	51,695	0,01292375	139

Dado que todos los filtros tienen que trabajar simultáneo se decide utilizar un mismo orden para todos para que no existan diferencias en la velocidad del proceso se decide por un orden de 300 el cual cumple con los órdenes requerido para todas las frecuencias.

Para la selección de la frecuencia de corte se realizó utilizando la frecuencia central f de cada tono mas un ancho de banda e , donde $f_{c1} = f - e$ y $f_{c2} = f + e$. Para todas las frecuencias se decidió usar un $e = 20 \text{ Hz}$.

Implementación

Para la implementación del sistema se desarrolló en Matlab en conjunto con simulink . La señal de audio se lee desde un archivo, a continuación, se desarrolló el cambio de frecuencia de muestreo en el programa de matlab para lo cual fue necesario crear el filtro pasa bajos.

Filtro pasa bajas

Ventana rectangular $f_T = 44100$ $f_c = 1850$ $N = 130$

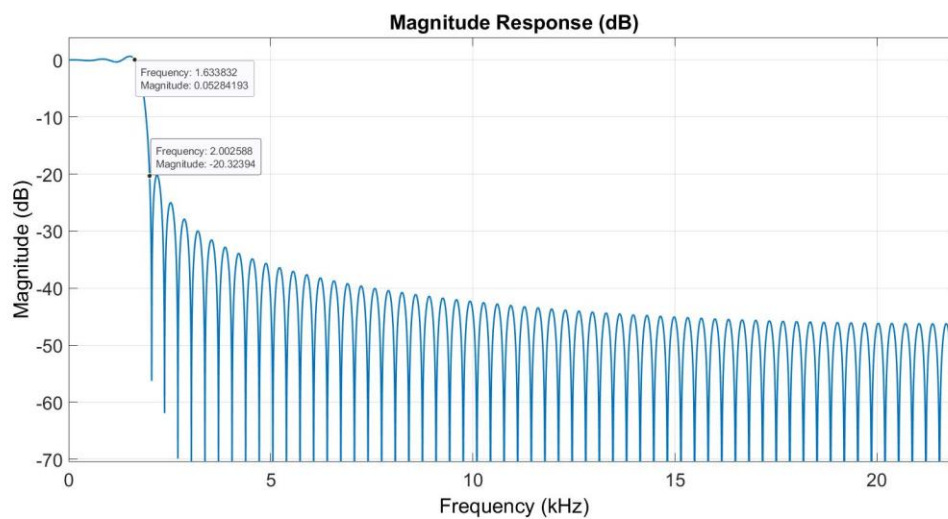


Figura 7: filtro pasa bajas

Una vez realizado el remuestreo se prosigue a realizar el desarrollo de los filtros pasa bandas encargado de identificar las frecuencias para cada una de las filas y las columnas.

Filtros pasa bandas filas

ventana rectangular $f_T = 8000$ $N = 300$

$f_{f1} = 697$ $f_{f2} = 770$ $f_{f3} = 852$ $f_{f4} = 941$

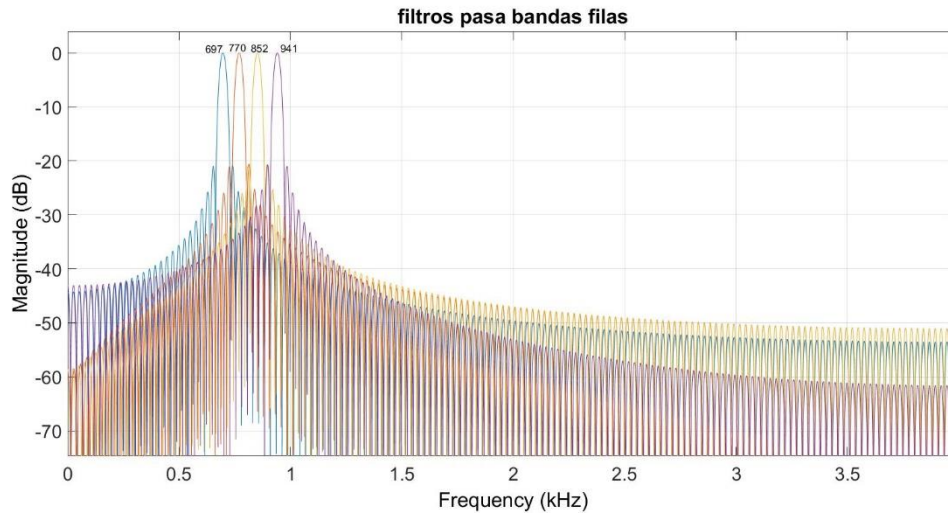


Figura 8: filtro pasa bandas filas

Como se puede observar en la Figura 8 no hay solapamiento entre filtros en la zona de paso.

Filtros pasa bandas columnas

Ventana rectangular $f_T = 8000$ $N = 300$

$f_{c1} = 1209$ $f_{c2} = 1336$ $f_{c3} = 1477$ $f_{c4} = 1633$

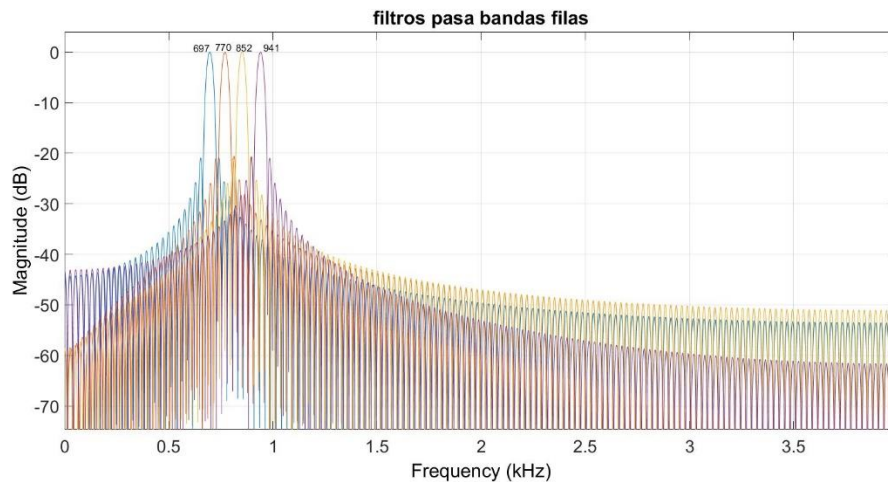


Figura 9: filtro pasa bandas columnas

Como se puede observar en la Figura 9 no hay superposición entre filtros en la zona de paso.

Una vez desarrollados los filtros se pasó a realizar el modelo sobre simulink la señal de entrada proveniente del workspace es pasada por cada tipo de filtro y con osciloscopio se obtiene el resultado de pasar por cada filtro.

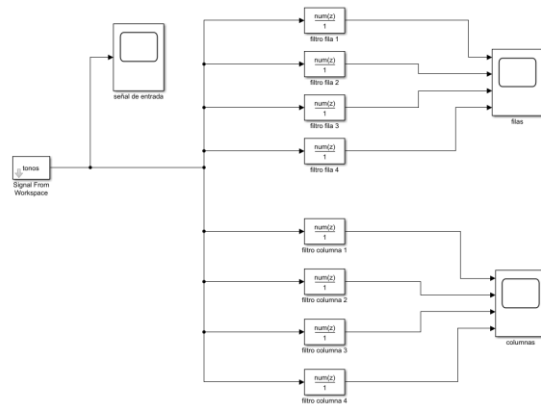


Figura 10: diagrama de simulink

Resultado

Una vez se realiza el cambio de frecuencia se diseñan los filtros para cada una de las filas y las columnas dentro del programa. Se exporta el espacio de trabajo a simulink donde se toma la señal a 8 KHz y se asignan los coeficientes a cada uno de los filtros.

El resultado obtenido al realizar se puede observar en las figuras 11 y 12.

Filas

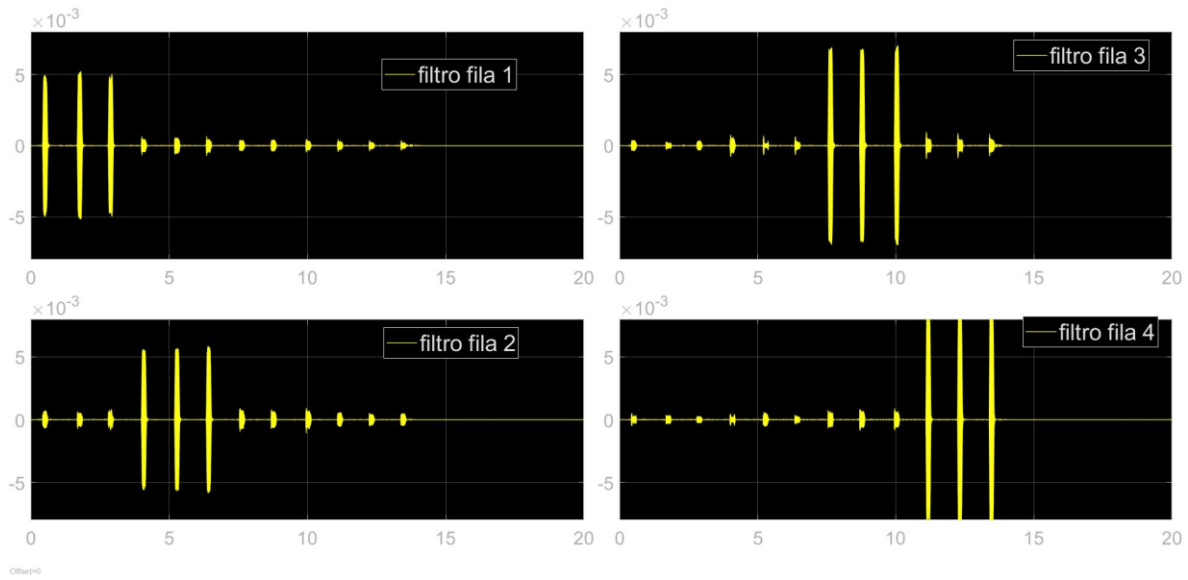


Figura 11: respuesta de señal pasada por cada uno de los filtros de fila

Columnas

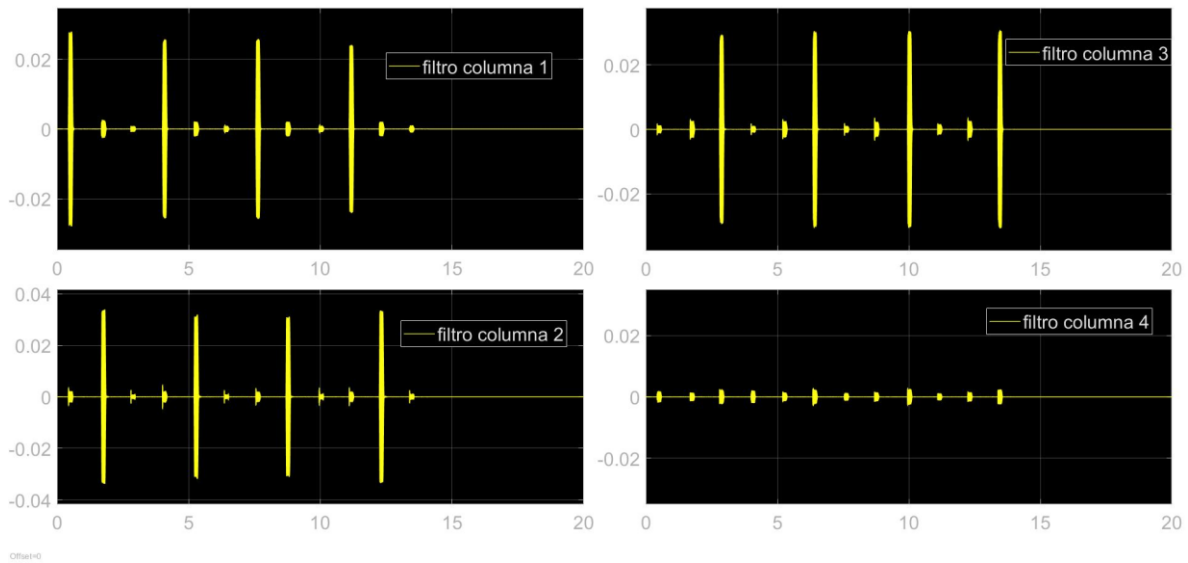


Figura 12: respuesta de señal pasada por cada uno de los filtros de fila

Con base a los resultados podemos realizar la pareja de frecuencias en cada momento del tiempo y así identificar la secuencia de audio.

Fila	Columna	Tecla
Fila 1	Columna 1	1
Fila 1	Columna 2	2
Fila 1	Columna 3	3
Fila 2	Columna 1	4
Fila 2	Columna 2	5

Fila 2	Columna 3	6
Fila 3	Columna 1	7
Fila 3	Columna 2	8
Fila 3	Columna 3	9
Fila 4	Columna 1	*
Fila 4	Columna 2	0
Fila 4	Columna 3	#

Figura 13: secuencia de teclas pulsadas

Con la información recolectada podemos observar que las teclas de la señal de audio corresponden a una secuencia de las primeras 3 filas pasando en orden por todas las columnas.

Análisis

Filtro pasa bajas

Cabe destacar que este filtro cumple una doble función en el proceso de up sampling sirve para interpolar las muestras intermedias mientras que en el proceso de down sampling limita el ancho de banda para evitar la presencia del fenómeno de aliasing.

Filtro pasa bandas

Los diagramas no hay intersección entre las bandas de paso fue implementado con filtros rectangulares los cuales no un control muy pobre sobre el rizado lo cual puede observarse en de ruido que a aparece a lo largo de la señal. A pesar de que el ruido producido por otros tonos no poder ser confundida por el paso de una señal aun así deteriora la calidad de la respuesta obtenida.

En las señales filtradas también se puede observar la diferencia en la magnitud entre las señales de las filas respecto a el de las columnas. Las filas tienen una magnitud de 0.008 mientras las columnas tienen magnitud de 0.06 lo cual es consistente con el diseño de DTMF.

Conclusiones

- El cambio de la frecuencia de muestreo es una herramienta útil que permite acoplar sistemas discretos que no se encuentran sobre una frecuencia lo cual permite expandir de el origen de las señales a analizar pues no se encuentran restringidas a ser obtenidas en la frecuencia del sistema.
- En un sistema interpolador decimador solo es necesario la aplicación de un filtro pasa bajas el cual cumple doble propósito de limitar las frecuencias para cumplir con el teorema del muestreo e interpolar los valores de las muestras insertadas por el zero-stuffing.
- El filtro interpolador decimador debe tener la frecuencia de corte mas restrictiva de los dos.
- El envío de información por multitono permite aprovechar el ancho de banda de un transmisor para enviar información por varios canales simultáneamente.

Referencias

- www.eecs.umich.edu. (2019). *Decoding DTMF: Filters in the Frequency Domain*. [online] Available at: <https://www.eecs.umich.edu/courses/eecs206/public/lab/lab7/lab7.pdf> [Accessed 17 Dec. 2019].
- Jiménez, N. (1999). *Aplicaciones de filtros digitales*. [online] Available at: https://www.academia.edu/39034605/Aplicaciones_de_filtros_digitales [Accessed 17 Dec. 2019].
- what is DTFM tone. (2019). [ebook] Available at: https://www.specialtyansweringervice.net/wp-content/uploads/resources_papers/dtmf-tone/Dual-Tone-Multi-Frequency-Signalling.pdf [Accessed 17 Dec. 2019].