

Un nuevo enfoque en linealidad para los altavoces en vivo de RCF

En este documento técnico, discutiremos la importancia de excluir las distorsiones de fase en los sistemas de refuerzo de sonido y de cómo RCF lo hizo posible con el procesamiento FIRPHASE, alcanzando una linealidad de fase cercana a la frecuencia sin los molestos retrasos de tiempo.

Una breve historia sobre la percepción de fases

La ley acústica de George Ohm (1843) establece que un sonido musical es percibido por el oído como el conjunto de una serie de componentes de tonos armónicos puros. Más adelante Von Helmholtz concordó con la Ley de Ohm y profundizó sus futuras investigaciones indicando que la percepción auricular depende únicamente de la amplitud del espectro del sonido y es independiente de los ángulos de fase de los diversos elementos que contiene el espectro.

En 1841, August Seebeck, un científico de la Universidad Dresden, argumentó con sus experimentos que las diferencias de fase son claramente audibles. El efecto de la fundamental faltante explica como el tono de un sonido percibido puede ser alterado por las diferencias de fases de sus armónicos. El debate continuó por veinte años en el diario científico *Annalen der Physik and Chemie*, Seebeck luego murió joven y su conocimiento fue olvidado. Fue hasta 1959, cuando Schroeder en su trabajo titulado "New results concerning monaural phase sensitivity" (1959), demostró el fenómeno. Schroeder indica que la conclusión de Ohm no es válida, y que solamente se aplica en ciertos casos particulares. Luego postula el efecto de enmascaramiento de fase de Schroeder: solo modificando los componentes individuales de fase de dos señales con envolventes idénticas, es posible producir una fuerte variación en el tono percibido, por ejemplo, al tocar melodías.

Hoy en día tenemos varias demostraciones que se oponen a la creencia anterior de que el oído humano es sordo a la fase, como el trabajo de Lipshitz et al. en el *Journal of Audio Engineering Society* en 1982: "hemos encontrado que la distorsión de fase de rango medio puede ser escuchada no sólo en simples combinaciones

de sinusoides, sino también en varias señales acústicas comunes". Señaló que esos problemas existen, pero que pueden ser sutiles y los diseñadores de transductores pueden tomar una decisión inteligente sobre la importancia (no la existencia) de los efectos de fase.

En otra conferencia AES en 1996, Johansen & Rubak indicaron que "La conclusión debe ser: No podemos permitir que el exceso de fase sea descuidado y tendremos que trabajar en la equalización de otra manera."

La percepción del espectro de fase también ha sido estudiado en relación a muchos tópicos, como la acústica en las salas de concierto, percepción de tono, identificación vocálica, enmascaramiento, procesamiento de voz y representación binaural.

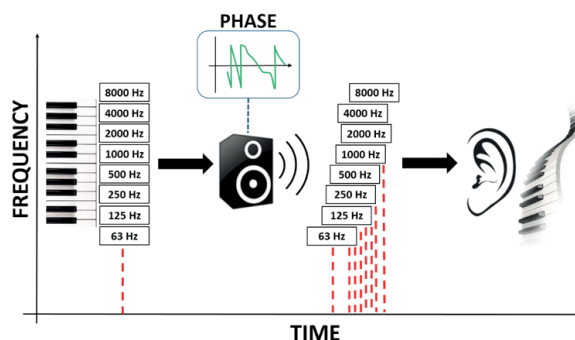


Fig.1 - Ejemplo visual de distorsión de una fase monoaural generada por un sistema de sonido el cual esta conformado por transductores, EQ, crossovers y amplificadores

Fase lineal 0°

La fase lineal o delay de grupo constante describe una característica de sistemas lineales donde todos los componentes espectrales de una señal viajan a través del sistema a una misma velocidad. En un caso particular, un sistema de fase lineal puede ser llamado de fase 0°: todos componentes espectrales de una señal llegan a la salida al mismo tiempo.

En un sistema con respuesta en frecuencia lineal y fase de 0°, la forma de la señal a la salida es idealmente una réplica exacta de la

señal de entrada, donde la magnitud depende exclusivamente de la ganancia del sistema.

Cajas de altavoces de múltiples vías y los tradicionales crossovers análogos o digitales basados en filtros IIR, son ejemplos típicos de sistemas de fases no lineales con cierta cantidad de “alteración de tiempo” debido a la naturaleza all pass de la suma de las respuestas eléctricas o acústicas.

El objetivo de un diseñador de altavoces es entregar un sonido “transparente” donde el parlante es capaz de reproducir un sonido lo más parecido posible al original, una característica importante para las aplicaciones basadas en la voz. Cualquier caracterización de audio como ecualizaciones o distorsiones deben ser hechas por, ej., por el músico o por las manos del ingeniero de sonido, dándole la libertad para presentar su propio sonido al público. En aplicaciones de música clásica, el sonido puede ser perfectamente reproducido sin alteraciones.

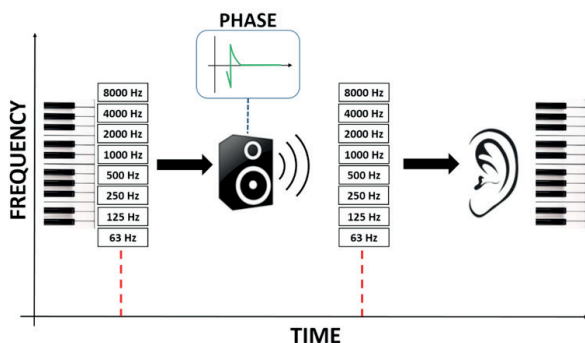


Fig.2 - Ejemplo visual ideal de un Sistema lineal

El problema de la onda cuadrada

Un altavoz con fase de 0° entrega al oyente todas las frecuencias al mismo tiempo, sin delays relativos, con el resultado de una verdadera reconstrucción del sonido original. Unos de los efectos más relevantes y audibles en la transición entre la “No en 0° fase” y “fase de 0°” es la reconstrucción óptima de las transientes. Pensemos en un redoblante o una cuerda de guitarra tocada: mucha energía y frecuencias en muy poca cantidad de tiempo. Si las frecuencias del redoblante o de la cuerda no llegan juntas al oído, si no un poco distribuidas en el tiempo, el impulso pierde energía, dinámica y detalle. Esto puede ser entendido usando una onda cuadrada que es la suma de la fundamental de una onda

sinusoidal y una cantidad de sus armónicos impares en frecuencias superiores.

Si los armónicos son retrasados con respecto a la fundamental, la reconstrucción falla.

	Señal de onda cuadrada original en la entrada del altavoz.	
(a)	Señal de onda cuadrada reconstruida por el altavoz con armónicos fuera de fase.	
(b)	Señal de onda cuadrada reconstruida por el altavoz con armónicos en fase.	

Table.1 - Visual example of a square wave reconstruction from (a) a phase-distorted system and (b) a phase-coherent system

El altavoz no sólo está hecho de transductores, sino también de filtros de crossover y de ecualización que juegan un rol fundamental en el resultado final. Filtros analógicos o filtros digitales IIR producen distorsiones de fase alrededor de la frecuencia en que actúan, añadiéndolas a las que ya están presentes en los transductores.

Filtros FIR para alineación de fase

Los DSPs modernos permiten una pre-compensación de estas distorsiones de fase para poder transmitir una señal de fase 0°. La manera más eficaz y poderosa es utilizar filtros FIR (Finite Impulse Response filters / Filtros de Respuesta de Impulso finita). Un filtro FIR no es más que un conjunto de coeficientes, representable como una respuesta al impulso (IR) en el dominio del tiempo. La señal digital del audio es filtrada y por lo tanto modificada con el FIR por medio de una operación matemática llamada “convolución”. Éste tipo de filtro introduce un delay con el tiempo necesario para que la señal pase toda la longitud del filtro. Afortunadamente, el tiempo de delay es igual para todas las frecuencias (sin delays relativos entre frecuencias): en este caso en particular son llamadas fase lineal. Un filtro FIR de fase lineal puede manipular la ecualización de amplitud de una señal sin distorsionar su fase, puede actuar como un banco de filtros IIR sin sus

efectos secundarios en la fase de la señal. Por ejemplo, los filtros FIR pueden ser usados por un filtro de crossover en vez de un filtro IIR común de Pasa Bajas y Pasa Altas, alcanzando pendientes muy elevadas sin modificaciones en la fase.

Problemas de Delay en filtros FIR

Desafortunadamente, no todo lo que brilla es oro: también hay un costo que pagar por el uso de filtros FIR. La frecuencia más baja controlada por el filtro (su resolución) es proporcional a la longitud del filtro en términos de muestras y por lo tanto a la latencia que se introduce en la cadena DSP. Como es mostrado en la Tabla 2, la menor longitud de un filtro necesaria para el manejo de todas las frecuencias audibles introduce un delay de 21ms (a 48kHz de frecuencia de muestreo), delay no aceptable para presentaciones en vivo. El uso de este tipo de filtros se convierte en un compromiso entre resolución y latencia.

Considerando el costo en términos de latencia, los filtros FIR pueden ser usados para corregir gran parte de la desviación de fases desde 0° creando una especie de delta de Dirac (All Pass filter): un impulso que no afecta al espectro de amplitud de la señal, sino que modifica la fase para poder alinear en tiempo los componentes de frecuencia del sonido.

	Frecuencia de muestreo 48 kHz		Frecuencia de muestreo 96 kHz	
Numero de muestras	Resolución (Hz)	Delay (ms)	Resolución (Hz)	Delay (ms)
32	1500	0.33	3000	0.17
256	188	2.7	375	1.3
1024	47	11	94	5.3
2048	23	21	47	11
4096	12	43	23	21

Table.2 - Delay introducido por el filtro FIR

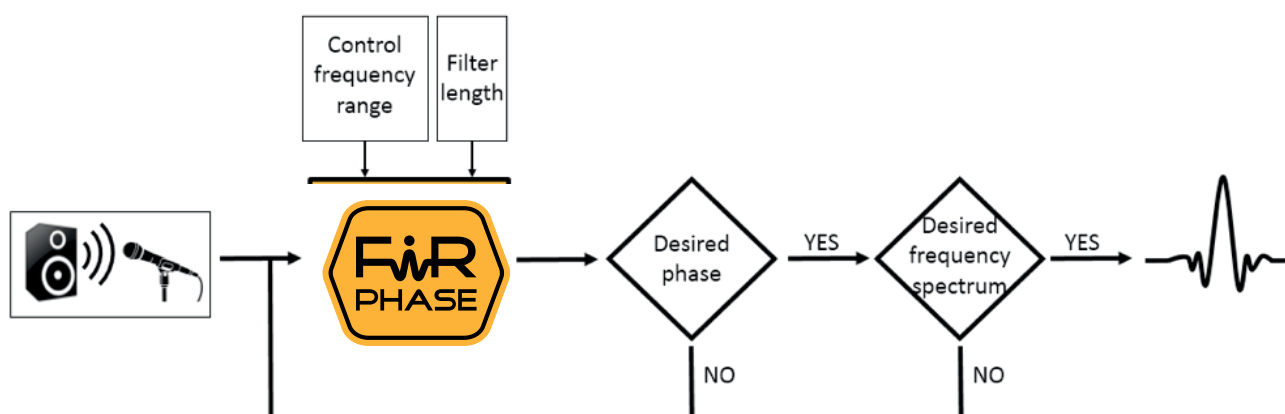
La alineación en tiempo de los componentes de frecuencias es claramente visible en términos de mediciones de Respuestas de Impulso. La alineación de fase incrementa la dinámica de la señal reproducida por el altavoz, porque la energía es concentrada alrededor del mismo tiempo y no distribuida como en el caso donde no está el filtro FIR. El diseño del filtro FIR para este propósito específico debe iniciar con una medición precisa de la fase del altavoz.



Fig.3 - suma de la fase del filtro FIR con la fase del altavoz

FiRPHASE

El procesamiento RCF FIRPHASE utiliza esta medición e intenta invertir la fase del parlante sin tocar la ecualización de amplitud. El corazón de esta técnica avanzada utilizada por FIRPHASE es un método recursivo (método de mínimos cuadrados), combinado con un algoritmo propiedad de RCF que calcula el mejor grupo de coeficientes del filtro FIR según la amplitud y las constantes de fase. El algoritmo corrige la fase y la amplitud (si es necesario) tomando en consideración los puntos débiles de los transductores y de las resonancias o cancelaciones debido a la caja del altavoz. Esta técnica permite al diseñador un profundo control de la fase en frecuencias medias-bajas con filtros relativamente pequeños, alcanzando una mayor resolución que la que la teoría sugiere.



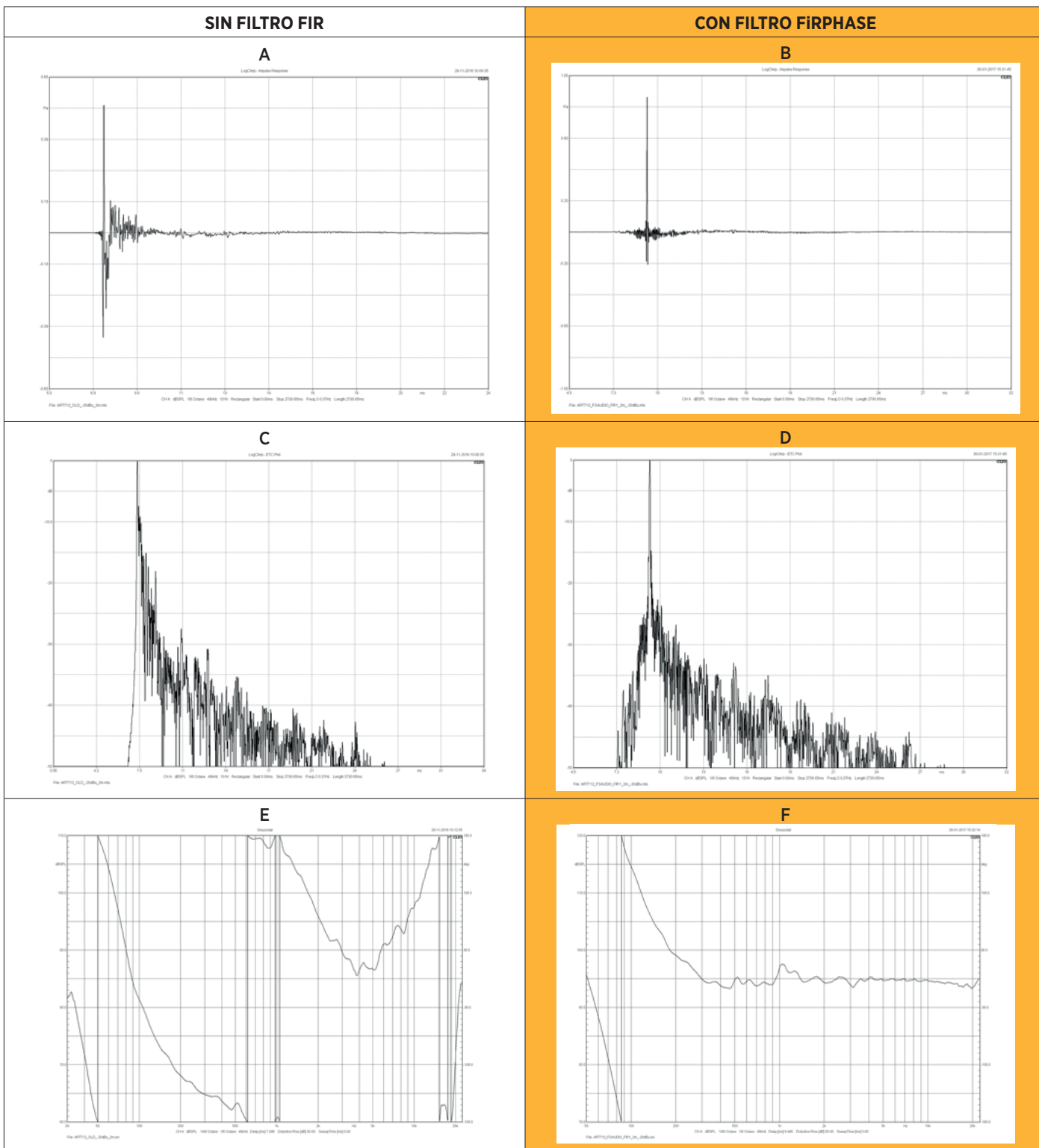


Fig.4 A – Respuesta de impulso, sin FIR; B – IR después del filtrar con FIR; C – Gráfica de la curva de energía y tiempo, sin FIR; D – Gráfica ETC después del filtro FIR; E – Gráfica de fase sin FIR; F – Gráfica de fase después del filtro FIR.

REFERENCES

Alcántara, J. I., Holube, I., & Moore, B. C. (1996). Effects of phase and level on vowel identification: data and predictions based on a nonlinear basilar-membrane model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(4 Pt 1), 2382–92. <https://doi.org/10.1121/1.417948>

Breebaart, J., Nater, F., & Kohlrausch, A. (2010). Spectral and spatial parameter resolution requirements for parametric, filter-bank-based HRTF processing. *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, 58(3), 126–140.

Chappel, R., Schwerin, B., & Paliwal, K. (2015). Phase distortion resulting in a just noticeable difference in the perceived quality of speech. *Speech Communication*, 81, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2016.04.005>

Griesinger, D. (2010). Phase coherence as a measure of acoustic quality part 1. *Proceedings 20th International ICA*, (August), 1–7.

Hopkins, K. (2008). The role of temporal fine structure information in the perception of complex sounds for normal-hearing and hearing-impaired subjects. (November).

Johansen, L. G., & Rubak, P. (1996). The Excess Phase in Loudspeaker / Room Transfer functions: Can it be Ignored in Equalization Tasks? 100th Audio Engineering Society Convention.

Kohlrausch, a., & Sander, A. (1995). Phase effects in masking related to dispersion in the inner ear. II. Masking period patterns of short targets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), 1817–1829. <https://doi.org/10.1121/1.413097>

Koya, D. (n.d.). Aural Phase Distortion Detection Presented by Daisuke Koya In Fulfillment of the Master's of Science Thesis Requirement.

Kraus, G. J. (2006). Advantages of FIR Filters in Digital Loudspeaker Controllers. *Aes*.

Lipshitz, S. P., Pockock, M., & Vanderkooy, J. (1982). On the Audibility of Midrange Phase Distortion in Audio Systems. *J. Audio Eng. Soc.*, 30(9), 580–595. Retrieved from <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3824>

Lokki, T., Pätynen, J., Tervo, S., Siltanen, S., & Savioja, L. (2011). Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), EL223–L228. <https://doi.org/10.1121/1.3579145>

Mowlae, P., Saiedi, R., & Stylianou, Y. (2016). Advances in phase-aware signal processing in speech communication. *Speech Communication*, 81, 1–29. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.specom.2016.04.002>

Plomp, R., & Smoorenburg, G. (1970). Frequency analysis and periodicity detection in hearing. *Perception*, 1–6. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Frequency+Analysis+and+Periodicity+Detection+in+Hearing#0>

Pobloth, H., & Kleijn, W. B. (1999). On phase perception in speech. 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. *Proceedings. ICASSP99 (Cat. No.99CH36258)*, 1, 29–32 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ICASSP1999.758054>

Turner, R. S. (1977). The Ohm-Seebeck dispute, Hermann von Helmholtz, and the origins of physiological acoustics. *British Journal for the History of Science*, 10(34 Pt 1), 1–24. <https://doi.org/10.1017/S0007087400015089>

Welti, T. (2015). Factors that Influence Listeners' Preferred Bass and Treble Balance in Headphones.