

Sobre el uso de inversión de polaridad o inversión de fase

(Jorge Petrosino)

Lo que defendemos básicamente es que el uso de "inversión de fase" puede que sea más "peligroso" para no especialistas y menos "práctico", pero está lejos de ser "incorrecto", cuando se lo entiende correctamente. Algunos puntos a considerar

Punto 1: Un retardo de medio ciclo en cada componente senoidal de una señal formada por frecuencias múltiplos de una fundamental no es equivalente a una inversión de fase de 180° en cada componente, y por lo tanto si el resultado de la superposición es diferente no se debe a que la inversión de fase no hace lo que se espera, sino a que no se está haciendo inversión de fase en ese caso.

Punto 2: La inversión de polaridad solamente tiene sentido para audio generado mediante altavoces y solamente cuando el cambio se realiza modificando algo en los altavoces (por ejemplo, intercambiando los cables en el dispositivo). Pero, existen más cambios que provocan inversión de fase en acústica sin ninguna intervención de parlantes. En esos casos el término inversión de fase mantiene su sentido pero el de inversión de polaridad no puede aplicarse.

Punto 3: Son muchos los próceres de la acústica que han utilizado preferentemente la expresión "phase reversal" o modos semejantes para referirse al tema (desde la acústica, no desde el audio). Como muestra copio al final tres fragmentos de Beranek (del último libro de 2012 que tuvo reedición en 2019, y que él mismo menciona como una ampliación y actualización de su clásico trabajo de mediados del siglo pasado).

Punto 1

Un retardo de medio ciclo en cada componente en una señal compuesta por frecuencias múltiplos no es lo mismo que una inversión de fase de toda la señal, excepto en el caso de utilizar componentes senoidales ideales sin comienzo ni fin.

Si se trata de una senoidal que comienza en un instante dado (¿qué otra cosa podría tener sentido que comenzar en algún momento?), un retardo de medio ciclo en cada componente no da por resultado lo mismo que una inversión de polaridad. Sin embargo, una correcta inversión de fase sí provoca ese resultado. Dicho en otras palabras, en cualquier senoidal con momento de inicio t_0 no es posible considerar que un retardo de medio período aplicado a cada componente sea equivalente a una inversión de fase de sus componentes.

Creo que lo que aquí está influyendo es el uso casi coloquial que suele darse en audio donde se le esquivo a hacer una distinción fina que resulta importante en un análisis más cuidadoso. Fase sin otra palabra adicional debería tener el sentido que tiene en la propuesta original de Steinmetz (o con la que usa Beranek, por ejemplo) y que aparece representada en las componentes complejas de la transformada de Fourier. La fase es el ángulo del fasor que representa a cada componente del espectro. Es verdad que un retardo temporal altera la fase. Pero un desplazamiento de una señal por un tiempo igual a medio período solamente equivale a una inversión de fase para una senoidal pura sin comienzo ni final.

El término "inversión de fase" (sin otra aclaración debería interpretarse en sentido estricto como un cambio angular, como algo equivalente a "desplazamiento de 180° "). Al aplicar este cambio a todos los componentes del modo correcto lo que se provoca es exactamente equivalente a multiplicar la señal por menos uno.

Se puede argumentar entonces que tiene poco sentido hacer tanto despelote para reemplazar una simple multiplicación (por menos uno) entregando a cambio una interpretación sumamente complicada. Pero, volvemos a la cuestión inicial. Una cosa es que en ciertas áreas resulte poco conveniente y otra es que se lo tache de "incorrecto" (que no es siempre el caso, pero lo hemos escuchado en muchas oportunidades).

La fase angular es el ángulo del fasor complejo que representa a una onda senoidal pura. En el caso de una onda compleja su representación de Fourier no es otra cosa que el conjunto de fasores que corresponden a cada componente de frecuencia. Esto corresponde a una función compleja

$$Y(\omega) = \underbrace{|Y(\omega)|}_{\text{modulo}} \cdot e^{j\theta(\omega)}$$

donde la fase es $\theta(\omega)$.

En este contexto, para una señal de forma de onda arbitraria (incluyendo las que son periódicas con componentes armónicos pero no limitándose a ellas), la inversión de fase o desplazamiento de la fase en 180° implica modificar la fase de todos los componentes que corresponden a su espectro. A todos ellos sumarle o restarle 180° ($\pm\pi$)

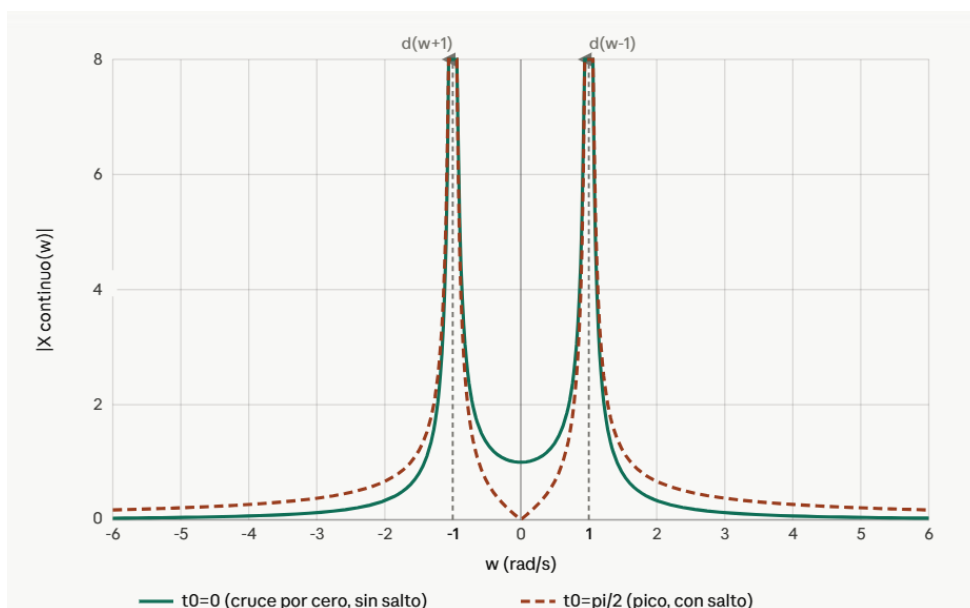
$$Y_{fase_invertida}(\omega) = |Y(\omega)| \cdot e^{j(\theta(\omega)+\pi)} = \underbrace{|Y(\omega)| \cdot e^{j\theta(\omega)}}_{Y(\omega)} \cdot \underbrace{e^{j\pi}}_{-1} = -Y(\omega)$$

Con lo que la inversión de fase correctamente entendida no es otra cosa que multiplicar por -1 todo el espectro, y al antitransformar equivale a multiplicar por -1 a toda la señal. Tal como lo que sucede con la inversión de polaridad en audio.

Como ya dijimos, el retardo de medio ciclo en cada componente solamente coincide con inversión de fase solamente cuando ese procedimiento se aplica a ondas matemáticas ideales periódicas sin comienzo ni fin. Cuando se considera un componente senoidal que tiene un inicio, su transformada ya no es la de una senoidal pura. El retardo de medio período hace una cosa y la inversión de fase hace otra cosa distinta.

Una senoidal que vale cero hasta un instante y a partir de ese momento es constante, es una senoidal multiplicada por un escalón de Heaviside. Lo que significa que su transformada es en realidad un espectro continuo (que tiene un máximo en la frecuencia de la senoidal, pero que agrega una sábana de componentes laterales). Si se aplica un cambio de 180° a cada componente de toda esa transformada (esto es, a todos los componentes de la sábana que se genera a los lados), lo que se consigue es que la onda tenga la misma forma de onda, pero quede multiplicada por menos uno (sin ninguna clase de desplazamiento temporal). Claramente esto es algo que puede hacerse de modo sencillo con procesamiento de señales (no sólo en el dominio continuo ideal matemático, sino también en el dominio discreto del audio digital), pero resulta prácticamente imposible con operaciones analógicas disponibles en equipamiento de audio analógico.

Si se toma una senoidal con escalón (que vale cero antes de un tiempo t_0) y se compara su espectro con el espectro de esa misma señal desplazada en el tiempo por medio período, la diferencia de fases entre sus componentes respectivos no es 180°, sino que hay un cambio gradual dependiente de la frecuencia que solamente vale 180° para la frecuencia fundamental, pero que es diferente de 180° para todo el resto de componentes de la "sábana" provocada por el escalón de Heaviside.



Este gráfico muestra el espectro de una senoidal que vale cero antes de un tiempo t_0 . Si ese tiempo t_0 coincide con el inicio de un ciclo nuevo de la función seno no hay "salto" en la función y el espectro es el de la línea verde continua. Si, en cambio, el tiempo t_0 (que "enciende" a la senoidal) coincide con el valor máximo de la función seno (hay salto), y el espectro es el de la línea de puntos roja. Si a toda esta función compleja se le cambia la fase en forma gradual utilizando una función lineal (mayor cambio de fase cuanto mayor es la frecuencia), lo que hago es desplazarla en el tiempo. El pico del componente principal cambia en 180° pero todas las demás partes de la "sábana" cambian con otros valores de fase, siguiendo una ley de proporción lineal. Esto es lo que sucede cuando desplazo medio período a una senoidal que no es pura (vale cero hacia la izquierda y es senoidal hacia la derecha). Ese cambio de fase lineal es lo que se observa en el SMAART como líneas que serían rectas en una escala lineal de frecuencias, y que pueden

corregirse aplicando un delay. Cada delay corresponde a una pendiente de recta de cambio de fases con diferente pendiente. Un retardo de medio ciclo es aplicar un cambio de fase mediante una función lineal con pendiente tal que justo en la frecuencia de la senoidal coincide con 180° .

Ahora, si a esta misma función compleja le modifico la fase de modo de sumar a todos sus componentes un valor fijo de 180° (π , en realidad), lo que hago es "darla vuelta patas para arriba". Simplemente queda invertida en signo. Lo que era positivo en la función temporal real se vuelve negativo y viceversa.

Al desplazar cada componente medio ciclo se genera una hermosa ensalada de fases que da cualquier cosa como resultado, ya que estoy desplazando cada componente de la senoidal con escalón mediante un delay distinto (una función lineal con distinta pendiente).

Nuevamente, podría considerarse terriblemente impráctico ir por el camino de inversión de fases en el sentido de aplicar la transformada, sumar 180° a la fase de cada componente y luego volver a antitransformar para terminar obteniendo algo equivalente a multiplicar la señal por menos uno. Pero, **impráctico e incorrecto** son nociones diferentes.

Lo importante que queremos resaltar aquí es que una prueba desplazando medio ciclo cada componente no resulta suficiente como argumento en contra del uso de la expresión "inversión de fase", porque en realidad no se está aplicando el concepto de "inversión de fase" de manera correcta. Da mal porque se hizo otro tipo de operación con las señales.

Punto 2: La expresión *inversión de polaridad* solamente se aplica cuando existe algún dispositivo electromecánico o electrónico en el sistema. Este no siempre es el caso en acústica y por eso tiene sentido que la gente del audio prefiera "polaridad" pero la gente que trabaja en acústica en aspectos más generales de la misma prefiera "fase" (como Beranek, por ejemplo)

¿Cuáles podrían ser ejemplos de acústica sin nada electromecánico ni electrónico?

- a) Una onda generada por cualquier medio no electrónico en el fondo de una pileta, o lago, o mar, (un cuerpo que golpea a otro bajo el agua o un animal marino que genera algún tipo de sonido bajo el agua). Cuando esa onda alcanza la superficie que separa el agua del aire se enfrenta con un cambio de impedancia característica (pasa de un valor alto en el agua a un valor bajo en el aire), lo que provoca una reflexión de la onda con "inversión de fase". Esto se da en un contexto donde no existe nada que pueda darle sentido a la expresión "inversión de polaridad".
- b) Al tomar en cuenta el análisis transitorio de la onda de presión que se genera en el extremo de un tubo (de un instrumento musical de viento, por ejemplo) y se dirige hacia otro extremo abierto. Al llegar al extremo abierto se enfrenta con un cambio de impedancia. Pasa de un cierto valor de impedancia dentro del tubo a otro valor menor que corresponde al aire libre fuera del tubo. Esto provoca una reflexión con "inversión de fase". Nuevamente esto se da en un contexto en el que la expresión "inversión de polaridad" no parece demasiado adecuado.
- c) La misma ecuación diferencial de ondas que usamos en acústica tiene mucha utilidad en sismología donde las fuentes son fenómenos geológicos. Nuevamente en esta área no hay polaridad que invertir en este campo donde también se presentan casos de reflexiones "con inversión de fase" y se utiliza esa terminología.

Punto 3: Citas de Beranek

Elegí a Beranek por ser una especie de prócer que además siguió publicando hasta poco antes de morir por lo que no es solamente una cuestión de un uso de términos que corresponde a costumbres del siglo pasado. Hay varios autores más (también muy grosos) que hacen un uso similar de la terminología.

Lo que sigue corresponde a la segunda edición (2019) del libro de Beranek-Mellow, "Acoustics: Sound Fields, Transducers and Vibration". Este libro es la segunda edición del libro de 2012 (publicado poco antes de su fallecimiento).

En pág. 46, al hablar de la reflexión de una onda ante un cambio de medio de alta impedancia a uno de baja impedancia en el cual la onda se refleja invertida dice:

"The first case produces maximum negative reflection (**that is, with reversed phase**), the second zero reflection, and the third maximum positive reflection"

Table 2.1 Termination impedances, standing wave ratios, and reflection coefficients for three types of tube termination

Quantity	Resilient termination	Anechoic termination	Rigid termination
Termination impedance (Z_T)	0	$\rho_0 c$	∞
Standing wave ratio (SWR)	∞	1	∞
Reflection coefficient (Γ)	-1	0	1
Absorption coefficient (α)	0	1	0

Of particular interest are the cases where (1) the pressure is zero at the termination (resilient termination), (2) the termination impedance is equal to the characteristic impedance of the tube (anechoic termination), and (3) the velocity is zero at the termination (rigid termination). All three cases are summarized in Table 2.1. The first case produces maximum negative reflection (that is, with reversed phase), the second zero reflection, and the third maximum positive reflection.

Y no es porque Beranek desconozca o reniegue del término "polaridad". Cuando lo tiene que aplicar a un objeto físico que es una fuente, lo hace sin problema. Pero separa el uso al hablar de la fuente, de lo que dice al referirse a la señal. En pág. 170 utiliza el término **polaridad**. "Polaridad" es algo que puede decirse de la fuente como elemento físico (inversión de cables de alimentación de un altavoz, por ejemplo) mientras que "Fase" es un término que se enfoca en la señal como representación. Aquí no habla de inversión de fase (pero utiliza el término "antiphase" como subíndice)

where the directivity function $D(\theta)$ is given by $D(\theta) = \cos k\Delta r$. Substituting Eq. (4.74) and $k = 2\pi/\lambda$ in Eq. (4.78) gives

$$D(\theta)_{in-phase} = \cos((\pi b/\lambda) \sin \theta). \quad (4.79)$$

Note that if we reverse the polarity of one of the sources, we obtain

$$D(\theta)_{antiphase} = j \sin((\pi b/\lambda) \sin \theta), \quad (4.80)$$

En pág. 181, al hablar de un dipolo que da lugar a una representación de campo emitido en figura de ocho, dice que "Este tipo de fuente consiste en dos fuentes puntuales monopulares vibrando con **180° de diferencia de fase**."

The ratio of the complex sound pressure $\tilde{p}_d$ produced by the dipole point source to the complex sound pressure $\tilde{p}_m$ produced by a monopole point source is found by dividing Eq. (4.114) by Eq. (4.71). This division yields

$$\frac{\tilde{p}_d(r, \theta)}{\tilde{p}_m(r, \theta)} = -\frac{b}{r} (1 + jkr) \cos \theta. \quad (4.115)$$

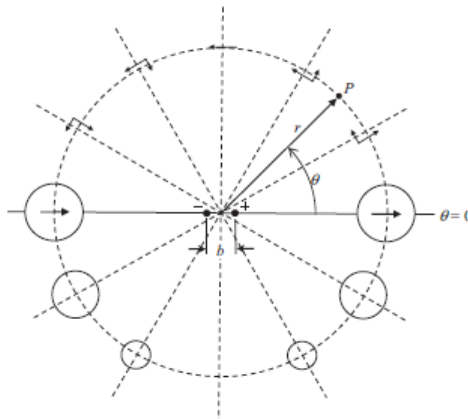


Figure 4.22 Dipole point source. This type of source consists of two monopole point sources vibrating 180 degrees out of phase. They are located a distance b apart and are at an angle θ and a distance r with respect to the observation point P . The lower half of the graph shows by the area of the circles the magnitude of the sound pressure as a function of angle θ . The upper half of the graph shows the variation of the radial and azimuthal components of the particle velocity as a function of angle θ .