

USO DE FUENTES PARAMÉTRICAS EN EL DESARROLLO DE UN CALIBRADOR PARA DETECCIÓN ACÚSTICA DE NEUTRINOS

REFERENCIA PACS: 43.10.-a; 43.35.-c; 43.3.-k; 43.25.-x; 43.38.-p

Adrián Martínez, Silvia; Ardid Ramírez, Miquel; Bou Cabo, Manuel; Larosa, Giussepina; Martínez Mora, Joan; Espinosa Roselló, Víctor; Camarena Femenía, Francisco.

Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC).
Universidad Politécnica de Valencia.
C/Paraninf,1 46730, Grao de Gandía, Valencia. España.
Telf: 96 387 70 00 - Ext. 43681.
Fax: 96 284 93 09.
E-mail: siladmar@upvnet.upv.es

ABSTRACT

Acoustic parametric sources are based on a nonlinear acoustic effect that has been widely studied due to the importance of its applications in underwater acoustics, especially, to obtain directive sources. However, there are few studies and applications of this technique with transient signals with cylindrical and highly directive propagation. In this work we present an exhaustive study of this technique under these conditions in order to apply it for the development of an acoustic calibrator that mimics the neutrino signal (a short bipolar pulse with cylindrical propagation and highly directive). One of the main advantages of this solution is to obtain compact and operational devices, an essential characteristic to be used in submarines telescopes at large depths (Antares, KM3NeT), and therefore being able to test the feasibility of acoustic detection of neutrinos.

RESUMEN

La generación paramétrica, como efecto acústico no lineal, ha sido extensamente estudiada dada la importancia de sus aplicaciones en acústica submarina, especialmente, para obtener fuentes directivas, sin embargo pocos son los estudios y aplicaciones de esta técnica con señales transitorias con propagación cilíndrica y altamente directiva. En este trabajo se presenta un estudio exhaustivo de dicha técnica bajo estas condiciones con el fin de aplicarlo a la construcción de un calibrador acústico que imite la señal acústica emitida por el neutrino (esto es, un pulso bipolar corto con propagación cilíndrica y altamente directiva). Una de las principales ventajas de esta solución es la obtención de dispositivos mucho más compactos y operativos, característica esencial para poder ser usados en los telescopios submarinos a grandes profundidades (Antares, KM3NET), y así poder testear la viabilidad de la detección acústica de neutrinos.

1. INTRODUCCIÓN

La acústica va tomando un papel cada vez más importante dentro de los grandes telescopios de neutrinos. A las tareas ya desarrolladas de posicionamiento acústico se unirán próximamente las tareas de detección acústica de neutrinos. En la actualidad, la detección acústica está en la fase de desarrollo, se están diseñando los dispositivos y evaluando su viabilidad. Para ello es esencial disponer de un calibrador que permita reproducir de forma controlada la señal acústica que emite el neutrino al interactuar con el agua [1].

Los neutrinos son partículas subatómicas con carga neutra de tipo fermiónico. El neutrino lo propuso por primera vez Wolfgang Pauli en 1930 para verificar la conservación de la masa y el momento lineal en la desintegración β de los neutrones. $p \rightarrow n_e + e^+ + \nu_e$. Según Pauli, la masa y la energía se conservarían si una partícula (neutrino) participase en la desintegración incorporando las cantidades perdidas. Dicha partícula no debería ni tener masa ni carga, además tendría una sección eficaz ínfima $\sigma \approx 10^{-44} \text{ cm}^2$.

La generación de neutrinos está asociada tanto a fenómenos naturales como a fenómenos de origen "artificial". Como origen natural los rayos cósmicos son una importante fuente de neutrinos que se generan en la cascada derivada de la interacción de un núcleo primario con un átomo atmosférico. También el sol emite $2 \cdot 10^{38}$ neutrinos por segundo de los que $4 \cdot 10^{10}$ por segundo y cm^2 los recibe la tierra. Se conoce como fuente "artificial" a los reactores de las centrales nucleares. Durante el proceso de fisión nuclear del combustible utilizado (uranio enriquecido) se produce la división del núcleo en dos o más núcleos además de partículas α , β y γ . Una central nuclear puede llegar a emitir $5 \cdot 10^{20}$ neutrinos por segundo.

Como adelantaba Pauli, los neutrinos poseen una muy pequeña probabilidad de interactuar con la materia, esto, por un lado, genera grandes dificultades para su detección a la vez que se convierte en un gran desafío en cuanto a la construcción de infraestructuras dedicadas a ello. Por otro lado, el hecho de que el neutrino sea una partícula tan elusiva es la clave para comprender por qué se persigue su detección. Como se observa en la Figura 1, en los procesos nucleares estelares se generan partículas cargadas, núcleos, fotones, neutrinos...entre otras partículas. Las partículas con carga sufren desviaciones en su trayectoria debidas a la presencia de campos magnéticos, además los fotones pueden ser absorbidos por la materia o interactuar con el fondo de microondas, sin embargo, los neutrinos que llegan a la tierra ni han interactuado ni han sufrido desviaciones, lo que implica que ofrecen información acerca de la localización de la fuente que los ha generado y permiten "observar" procesos en ambientes densos donde los campos gravitatorios, electromagnéticos, son muy intensos. Por todo ello y pese a la dificultad que conlleva la detección de neutrinos se considera que son buenas partículas "mensajeras".

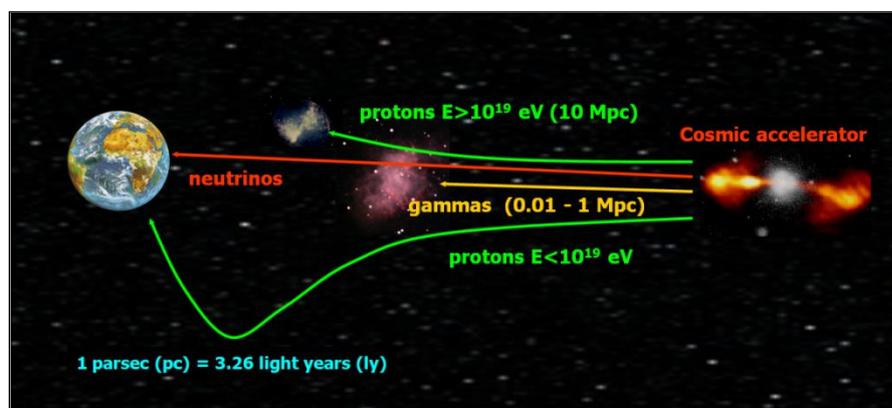


Figura 1. Esquema de la interacción de las distintas partículas

Un telescopio de neutrinos es un dispositivo diseñado para detectar las partículas que se generan por la interacción del neutrino con la materia. Las características comunes de la mayoría de los telescopios, los que están contruidos y los que están en fase de desarrollo, son el gran volumen necesario para la detección (por la pequeña probabilidad de interacción del neutrino con la materia) y la necesidad de disponer de un sistema de detección óptica muy sensible a la señal luminosa generada de la interacción con la materia.

La mayor parte de los telescopios de neutrinos están contruidos en agua o hielo ya que es posible disponer de grandes volúmenes, además en ambos medios las partículas generadas viajan a velocidad mayor que la de la luz y, por tanto, emiten luz de Cherenkov. Por este hecho, la detección más desarrollada hasta hoy ha sido la detección óptica. Cuando una partícula cargada atraviesa un medio material a una velocidad mayor a la de la luz, en dicho material, tiene lugar la emisión de una luz azulada característica llamada luz de Cherenkov. Esta radiación electromagnética se emite debido a la rápida polarización que sufren las moléculas del medio al interactuar con la partícula cargada. Esta luz característica es detectada mediante fotomultiplicadores repartidos en grandes estructuras formando "arrays". La amplitud de la señal recibida permite conocer la energía de la partícula detectada, así mismo, a partir de las coincidencias en la detección de un suceso entre distintos fotomultiplicadores puede reconstruirse la trayectoria de la partícula detectada. Uno de los mayores inconvenientes que presenta la detección óptica es la rápida atenuación de la luz en el medio (50 m en agua, 100 m en hielo) lo cual hace necesario disponer de gran cantidad de fotomultiplicadores para obtener un volumen de detección considerable.

En la actualidad la acústica está integrada en todos los telescopios de neutrinos submarinos realizando tareas de posicionamiento y se está trabajando para utilizarla en tareas de detección. Askaryan en 1957 [2] fue el primero en proponer la posibilidad de la detección acústica de neutrinos. La idea se basa en que cuando un neutrino interactúa en un medio adecuado (agua, hielo o sal) se produce una cascada hadrónica depositando alrededor del 25% de la energía que posee el neutrino en un pequeño volumen de agua con forma cilíndrica de unos 10 m. de longitud y unos pocos centímetros de radio. La gran deposición de energía en tan pequeño volumen hace que el medio se caliente de forma casi instantánea lo cual deriva en una expansión macroscópica del medio. La rápida expansión provoca una onda de choque perpendicular al eje de la cascada generando un pulso acústico de forma bipolar (ver Figura 2) con un fuerte pero corto pico de compresión seguido por un pico de rarefacción. Las características del pulso bipolar vienen marcadas por su generación. Debido a la gran anisotropía de la fuente (10 m. de largo y unos pocos cm. de ancho) la emisión es muy directiva, de aproximadamente 1º, lo que se conoce como directividad en "pancake" y se produce en todas las direcciones ortogonales al eje de la cascada hadrónica. Este pulso de presión está relacionado con la segunda derivada de la temperatura en el medio y la frecuencia típica de esta señal se encuentra en torno a 20 kHz. La amplitud de la señal está relacionada con las propiedades del medio en que se produce, es proporcional a β (coeficiente de expansión térmica del medio) e inversamente proporcional a C_p (capacidad calorífica del medio).

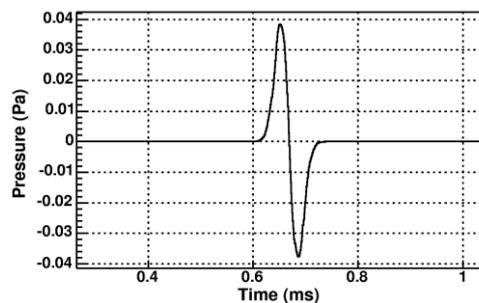


Figura 2. Pulso acústico bipolar asociado al neutrino

Una de las ventajas de la detección acústica de neutrinos es que, debido a que el pulso acústico generado tiene una longitud de atenuación del orden del kilómetro, permite disponer

de un mayor volumen de detección que en el caso de la detección óptica ya que los hidrófonos pueden situarse a mayor distancia unos respecto de otros haciendo accesible, en términos de coste, la construcción de arrays de hidrófonos que cubran un mayor volumen. Además, la detección acústica permite detectar Ultra High Energy “UHE” neutrinos (el UHE neutrino posee una $E > 10^{10}$ GeV), este tipo aún no han sido detectados y su estudio puede tener repercusiones importantes en el modelo estándar de física de partículas, mientras que la detección óptica tiene, en la práctica, como límite superior 10^8 GeV, dejando imposibilitada la detección de UHE neutrinos.

2. FUENTES ACÚSTICAS PARAMÉTRICAS

La generación acústica paramétrica [3] es un efecto no lineal muy conocido ya que ha sido extensamente estudiado debido a las importantes aplicaciones dentro de la acústica submarina, especialmente para obtener fuentes acústicas directivas. Este efecto se observa, por ejemplo, cuando dos haces intensos monocromáticos de frecuencias cercanas viajan juntos por un medio. Bajo esas circunstancias, y en régimen no lineal, aparecen haces secundarios de frecuencia suma, diferencia y dobles frecuencias de los primarios, así como los armónicos de éstos.

A altas frecuencias es fácil obtener haces directivos, al contrario que a baja frecuencia. El hecho de que el haz secundario, en la generación paramétrica, mantenga la directividad del primario es una de las grandes ventajas que presenta esta generación: permite obtener haces directivos de baja frecuencia (frecuencia diferencia). Así, mientras las componentes de alta frecuencia del haz son rápidamente absorbidas la baja frecuencia queda disponible para aplicaciones a larga distancia. En resumen, las fuentes acústicas paramétricas permiten obtener estrechos patrones de directividad a baja frecuencia y con transductores de pequeñas dimensiones, de ahí la popularidad que han alcanzado dentro del campo de la acústica submarina (SONAR, posicionamiento...)

El mismo efecto puede darse cuando la señal primaria es una señal transitoria. Mediante un pulso corto de alta frecuencia sometido a una “modulación especial” se puede obtener la señal suma o diferencia de su contenido espectral tras la interacción del pulso con él mismo en el medio. Estudios teóricos y experimentales [4] demuestran que la forma de onda de la señal secundaria es básicamente la segunda derivada de la señal primaria, donde la amplitud es proporcional al cuadrado de la amplitud del primario y depende, entre otros parámetros del medio, del parámetro de no linealidad B/A . La forma de onda del haz secundario viene dada por:

$$p(x, t) = \left(1 + \frac{B}{2A}\right) \frac{P^2 S}{16 \pi \rho c^4 \alpha x} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[f \left(t - \frac{x}{c} \right) \right]^2 \quad (1)$$

donde P es la amplitud de presión del haz primario, S el área del transductor (superficie vibrante), $f(t-x/c)$ es la función que describe la envolvente de la señal primaria, x la distancia, t el tiempo, B/A el parámetro de no linealidad del medio, ρ la densidad, c la velocidad del sonido y α la absorción en el medio.

Como ya se comprobó en estudios previos con transductores planos [5], siendo conocida la forma de la señal acústica emitida por la interacción del neutrino (pulso bipolar), es decir $p(x,t)$, se precisa conocer la envolvente de la señal primaria $f(t-x/c)$ que proporcionará, por generación paramétrica, dicho pulso. Como describe la Ecuación 1 el pulso está relacionado con la segunda derivada de la envolvente del primario, análogamente éste estará relacionado con la segunda integral de un pulso bipolar, y para ello utilizamos la integral de una gaussiana.

3. EVALUACION DE LA TÉCNICA PROPUESTA

En este trabajo se presenta el estudio realizado en laboratorio para obtener la señal acústica del neutrino mediante un transductor cilíndrico usando el efecto paramétrico. Se obtuvieron resultados positivos en trabajos previos [5] con transductores planos, el objetivo será evaluar la técnica con transductores cilíndricos para obtener una emisión similar a la que produce la fuente real (interacción de un UHE neutrino). Este estudio permite evaluar la viabilidad de la técnica y sentar las bases del diseño final de un calibrador usando la técnica paramétrica.

3.1. Dispositivo Experimental

El estudio experimental para evaluar la generación paramétrica de la señal acústica del neutrino se ha llevado a cabo en un tanque de agua de dimensiones $1.10 \times 0.85 \times 0.80 \text{ m}^3$. Como emisor se ha utilizado un transductor Free Flooded Ring “FFR” de simetría cilíndrica cuya resonancia se encuentra a 10 kHz que será excitado a 380 KHz (a dicha frecuencia también presenta un pico de resonancia más débil). Enfrentado al emisor se sitúa el receptor, un ITC-1042 cuya máxima sensibilidad está por debajo de los 100 kHz, es decir, es más sensible al pulso bipolar (10 kHz-30 kHz) que al haz primario (380 kHz). El receptor está anclado a un sistema de microposicionamiento (Owis GmbH) que permite realizar movimientos en las tres direcciones ortogonales del campo acústico con una precisión de 10 μm . El rango de trabajo del receptor resulta muy adecuado para los objetivos que se persiguen ya que es suficientemente sensible al haz primario para las tareas de alineación y sobretodo es mucho más sensible a la baja frecuencia para el estudio de la señal paramétrica. El movimiento del receptor así como la generación y recepción se lleva a cabo desde un controlador diseñado en Labview. El emisor es alimentado mediante un generador PCI-5412 (National Instruments) cuya señal es amplificada previamente usando un amplificador RF ENI 1040L (400W, +55dB, Rochester, NY). La señal recibida es registrada mediante un digitalizador PCI-5102 (National Instruments). Los datos son procesados y analizados en Matlab.

3.2. Análisis y Resultados

Aplicando los conocimientos sobre generación paramétrica con señales transitorias [4] y conociendo las características de la señal secundaria que se pretende obtener [1] la señal emitida presentará la forma de onda representada en la Figura 3. Se representa el haz primario a 380 KHz antes de ser amplificado (tras amplificación alcanza 210 V).

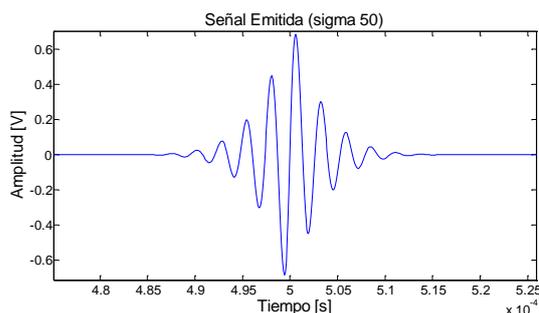


Figura 3. Señal emitida antes de la amplificación

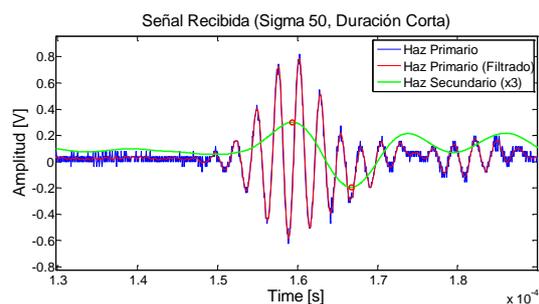


Figura 4. Señal recibida.

En la Figura 4 se observa la señal recibida (trazo azul), tras filtrado pasobanda ([250 450] kHz) el haz primario (trazo rojo). El haz primario se aprecia con claridad pero para distinguir el haz secundario, la señal paramétrica, es necesario un filtrado pasobanda [5-100] kHz. Tras éste ya se puede localizar el pulso bipolar (trazo verde).

Como se esperaba, la forma de la señal bipolar es aproximadamente la segunda derivada de la envolvente de la señal primaria. Se ha comprobado este hecho usando distintas señales de entrada. En este aspecto se han llevado a cabo dos estudios diferentes. En primer

lugar variando el parámetro sigma, de la función que genera la señal de entrada, que está relacionado con la pendiente de subida y bajada de la señal, por tanto influye en la duración de la misma. En segundo lugar, se ha estudiado, para una misma σ , diferentes duraciones de la señal, incorporando más ciclos en la zona entre la pendiente de subida y bajada.

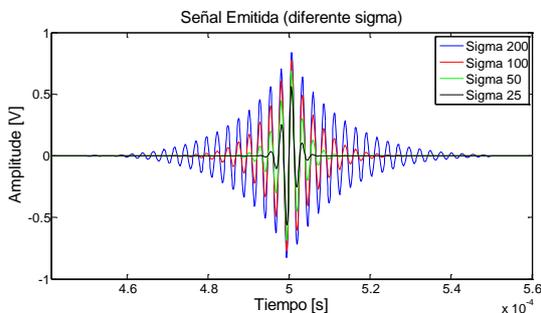


Figura 5. Señal emitida con distinto sigma

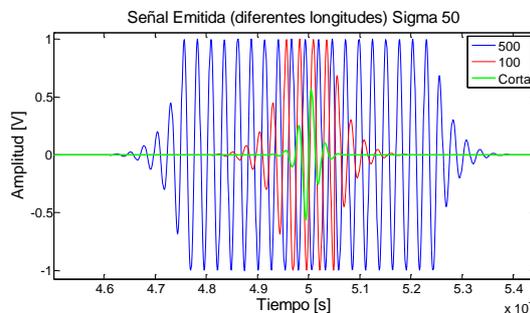


Figura 6. Señal emitida con distinta duración.

En ambos casos (ver Tabla 1 y Tabla 2) se observa como el pulso se ensancha (la duración Δt del pulso bipolar se mide desde el máximo al mínimo) a medida que la señal emitida se alarga en el tiempo. Con esto queda patente que se tiene cierto control en la señal paramétrica que se genera en el medio y así es posible adaptar la señal emitida a las necesidades requeridas en recepción.

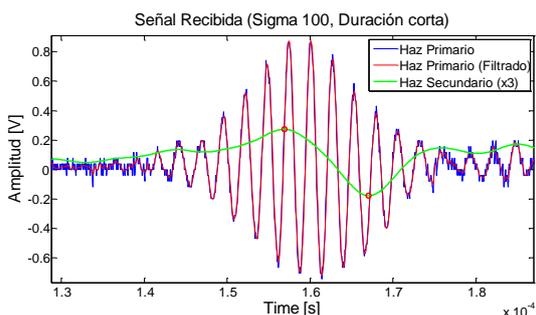


Figura 7. Señal recibida con sigma 100

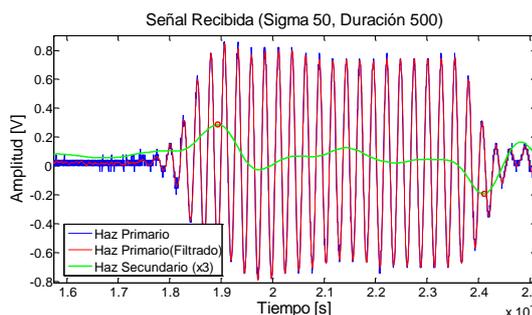


Figura 8. Señal recibida con duración 500.

Sigma de la Señal	25	50	100	200
Δt (μs)	7 – 8 *	7.4	10	11

Tabla 1. Variación de la duración del pulso bipolar en función del parámetro sigma en la señal emitida. *La medida con sigma 25 presenta dificultades por el pequeño contenido energético que presenta.

Duración de la Señal	Corta	100	500
Δt (μs)	7.4	9.9	52

Tabla 2. Variación de la duración del pulso bipolar en función de la duración de la señal emitida.

El siguiente estudio para evaluar la generación paramétrica tiene como objetivo corroborar el comportamiento no lineal del haz secundario. Para ello se toman medidas incrementando la tensión aplicada al emisor. El resultado puede observarse en la Figura 9. Existe una relación lineal entre la señal recibida proveniente del haz primario y la tensión de entrada. Sin embargo, la señal bipolar es proporcional al cuadrado de la señal de entrada aproximadamente, lo que demuestra la naturaleza no lineal del haz secundario.

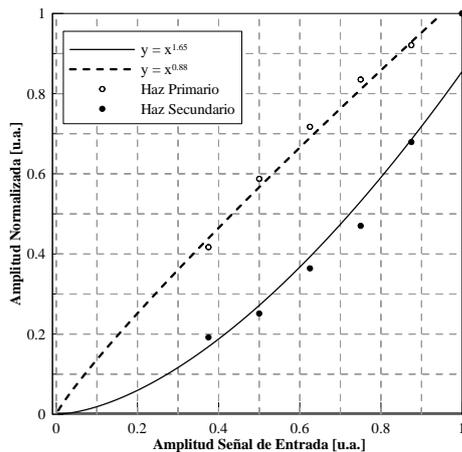


Figura 9. Relación de la amplitud de la señal recibida frente a la amplitud de entrada

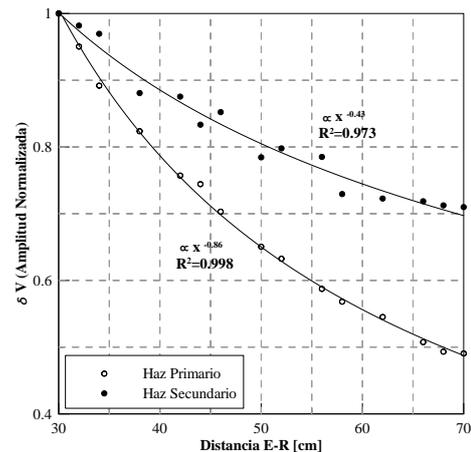


Figura 10. Decaimiento del haz primario y el secundario con la distancia.

Como ya se adelantaba, uno de los objetivos que se persigue con la generación paramétrica es conseguir haces directivos de baja frecuencia. Se ha comparado la directividad del haz primario con la del haz secundario (ver Figura 11) a varias distancias emisor-receptor y se puede ver cómo, pese a las diferencias en contenido espectral, ambos haces presentan un patrón de directividad muy similar.

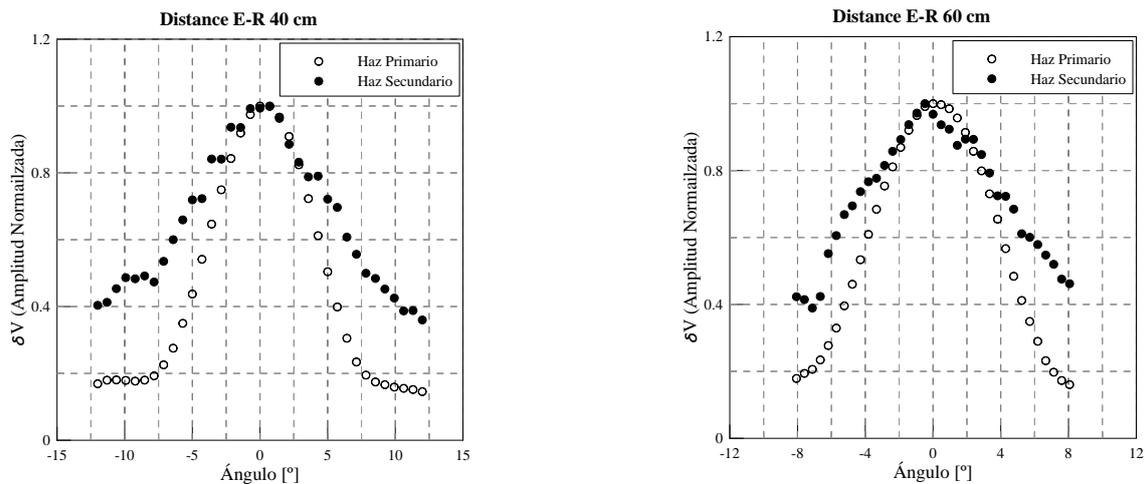


Figura 11. Comparativa de la directividad del haz primario y el secundario a 40 y 60 cm de distancia emisor-receptor.

Finalmente, y siendo otra de las ventajas de las fuentes paramétricas, se ha observado como decae la amplitud de ambos haces con la distancia (Figura 10). El haz secundario sufre una atenuación menor que el primario, la diferencia entre la absorción del secundario y el primario es de aproximadamente un factor 2. Este hecho posibilita el cubrir mayores distancias con el haz secundario utilizando un menor número de emisores.

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Como se ha comprobado, el uso de fuentes paramétricas parece una buena técnica para generar, de forma controlada, la señal acústica que emite el neutrino con directividad similar usando un transductor (o un array) cilíndrico.

Se necesita optimizar la eficiencia de la generación del pulso bipolar por ello se realizarán estudios con distintos transductores disponibles en el mercado buscando la situación

ideal: usar un único (y económico) transductor que permita reproducir de forma paramétrica el pulso acústico del neutrino y que, a su vez, pueda emitir baja frecuencia para realizar las tareas de posicionamiento que ya se llevan a cabo en los telescopios submarinos de neutrinos.

Por el momento se han realizado las pruebas en laboratorio, cuyas condiciones distan mucho de las reales, pero ya se está trabajando en el desarrollo de un transmisor compacto que genere una señal eficiente con directividad “pancake” de 1º y que será testeado in situ en uno de los telescopios el próximo año.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro de los proyectos con referencias FPA2007-63729, FPA2009-13983-C02-02 y ACI2009-1067, el proyecto Consolider-Ingenio Multidark (CSD2009-00064) y la Generalitat Valenciana (Prometeo/2009/26).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Ardid, *Calibration in acoustic detection of neutrinos*, Nucl. Instr. And Meth. A 604 (2009) S203.
- [2] G.A. Askaryan, *Hydrodynamical emission of tracks of ionising particles in stable liquids*, J. At. Energy 3 (1957) 921.
- [3] Peter J. Westervelt. *Parametric Acoustic Array*. J. Acoust. Soc. Am (1963). Vol. 35 nº4
- [4] M.B. Moffet, P.Mello, *Parametric acoustic sources of transient signals*, J. Acoust. Soc. Am 66 (1979) 1182
- [5] M. Ardid, M. Bou-Cabo, F. Camarena, V. Espinosa, G. Larosa, J.A. Martinez-Mora, M. Ferri. *Use of Parametric Acoustic Sources to Generate Neutrino-Like Signals*. Nucl. Instr. And Meth. A 604 (2009) S208.