



Observación experimental de fenómenos no lineales en haces ultrasónicos focalizados

V. Espinosa^a, J. Ramis^a, F Camarena^a, V. J. Sánchez-Morcillo^a, Y.N. Makov^b
and J.Alba^a

^a *Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica Superior de Gandia, Universidad Politécnica de Valencia, Crta. Nizaret-Oliva, s/n, 46730 Grau de Gandia, Spain, vespinos@fis.upv.es*

^b *Department of Acoustics, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow 119992, Russia*

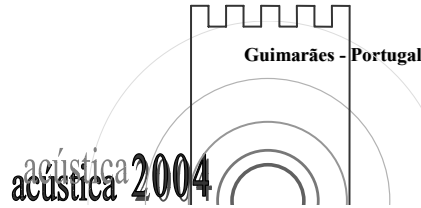
RESUMEN: Se ha iniciado el estudio experimental de las soluciones exactas de la ecuación de Khokhlov-Zabolotskaya (KZ), para el caso de transductores ultrasónicos focalizados, centrándonos en la aparición de las diferentes formas de onda asintóticas (onda en forma de U o de N), así como de los estados auto-atrapados del sonido. Se ha diseñado y construido un sistema de medida automatizado que ha permitido demostrar cualitativamente la existencia de ambos tipos de forma de onda. Asimismo se ha conseguido un sistema de visualización en tiempo real de la estructura transversal del haz acústico, que permite identificar cambios en la divergencia-convergencia del mismo, basados en la técnica de campo oscuro.

ABSTRACT: An experimental study on the exact solutions to the Khokhlov-Zabolotskaya (KZ) equation has been initiated for the case of focalised ultrasonic transducers, centring ourselves on the conditions for different asymptotic waveforms (both U- and N-type) as well as the rising of self-trapped sound states. We have designed and constructed an automated system that has already shown qualitatively the existence of both waveform types. We have also achieved a real-time schlieren visualisation system for the transversal structure of the acoustical beam, which allows realising about changes in its focusing or defocusing properties.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los efectos no lineales en la propagación de los ultrasonidos (US) de alta intensidad no debe considerarse en ningún caso un objetivo de interés puramente académico. La evolución y mejora de su aplicación en campos tan dispares como la medicina, la oceanografía o el tratamiento de materiales, depende de manera fundamental del conocimiento exacto de las condiciones de formación de ondas de choque o de la generación de armónicos durante la propagación, fenómenos de carácter no lineal. En particular, la evolución de la forma de la onda juega un papel crucial en el efecto de los US sobre la materia o los tejidos orgánicos, a través de la diferente acción mecánica sobre la estructura de los materiales o sobre las unidades celulares, y de la influencia que en la absorción tiene el diferente contenido espectral de las ondas no lineales.

Nuestro grupo aborda esta problemática en el caso de los transductores focalizados, tanto desde el punto de vista del estudio teórico, mediante la investigación analítica y numérica de las soluciones de la ecuación de ondas no lineal en la aproximación parabólica, o ecuación de Khokhlov-Zabolotskaya (KZ), como de su comprobación experimental. En el presente trabajo



se da cuenta del dispositivo experimental diseñado para el estudio de haces focalizados, su caracterización mediante medidas acústicas y su visualización mediante técnicas ópticas, así como algunos resultados preliminares en el estudio de la transición entre distintos tipos de soluciones de la ecuación KZ.

Este trabajo forma parte de los objetivos de la línea de investigación en acústica no lineal iniciada por el grupo DISAO (Dispositivos y Sistemas Acústicos y Ópticos) del Campus de Gandia de la Universidad Politécnica de Valencia en el marco del proyecto “*Dinámica espacio-temporal en sistemas acústicos y ópticos no lineales. Analogías acusto-ópticas*”-BNF2002-04369-C04-04, financiado por la DGCYT, y que se desarrolla en especial colaboración con el Departamento de Acústica de la Universidad Estatal de Moscú.

2. OBJETIVOS Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Caracterización de soluciones asintóticas de la ecuación KZ.

La ecuación KZ describe la propagación de un haz intenso de sonido en un medio disipativo, sin dispersión y teniendo en cuenta los efectos de la difracción. En términos de variables normalizadas se expresa:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \tau \partial z} = \frac{N}{4} \nabla_{\perp}^2 V + \frac{\partial}{\partial \tau} \left(V \frac{\partial V}{\partial \tau} \right) \quad (1)$$

donde $V = u / u_0$, es la velocidad de las partículas del medio normalizada a su valor máximo u_0 , y N es el parámetro de Khokhlov, que representa la influencia relativa de los efectos no lineales y de la difracción, y que se define como.

$$N = \frac{z_{sh}}{z_d} = \frac{c_0^2 / \varepsilon \omega u_0}{\omega a^2 / 2c_0} \quad (2)$$

siendo z_{sh} la distancia de formación de discontinuidades u ondas de choque, z_d la distancia de Rayleigh (distancia característica de difracción), c_0 es la velocidad del sonido en el medio, ε es el parámetro de no linealidad del mismo, a es el radio de la apertura del haz en el transductor, ∇_{\perp}^2 es el operador Laplaciano que actúa sobre las coordenadas transversales (normalizadas a a), ω es la frecuencia característica de la fuente y $\tau = \omega (t - z/c_0)$ es el tiempo adimensional retardado.

La ecuación (1) posee dos tipos de soluciones exactas analíticas de carácter asintótico, esto es, soluciones hacia las que el campo acústico evoluciona en su propagación independientemente de las condiciones iniciales. Estas soluciones exactas poseen una forma de onda de perfil hiperbólico y pueden tener una discontinuidad cada ciclo (ondas de choque de perfil en N), si predominan los efectos no lineales sobre la difracción, o no tenerla (ondas de perfil en U), si predominan los efectos difractivos sobre los no lineales [1]. El resultado de esa competición vendrá predeterminado por los parámetros descritos anteriormente, así como de la intensidad

y del radio de curvatura iniciales del campo (radio de curvatura del transductor, distancia focal en régimen lineal).

El sistema experimental propuesto para verificar la existencia de dichas soluciones y analizar las condiciones que dan paso de un tipo a otro, es el que se describe en la Figura 1, y que incorpora un controlador Hewlett-Packard de tecnología PXI con la tarjeta de control de sistemas de posicionamiento NI-PXI7334 y la tarjeta digitalizadora NI5620, de frecuencia de muestreo de hasta 65 GHz. El controlador PXI gobierna además, a través de una conexión GPIB, el generador de funciones programable Agilent 33220, cuya señal es amplificada a través de un amplificador de alta potencia de banda ancha (ENI 240L (40 w, +30 dB) ó ENI500 (500 w, +60 dB)), lo que permite excitar el transductor piezoeléctrico con señales de hasta 750 Vpp libres de distorsión. Los transductores piezoeléctricos de alta potencia han sido fabricados por la empresa Valpey-Fisher, y el sistema de focalización es el acoplamiento de un lente acústica a una cerámica planoparalela: inicialmente contamos con dos transductores, de 3 y de 6 cm de apertura, de frecuencia de trabajo de 1 MHz y radio de curvatura de 11,7 cm. El campo acústico emitido se mide mediante un hidrófono de membrana NTR/Onda Corp. MH2000B de respuesta frecuencial plana entre 1 y 20 MHz, especialmente indicado para registrar la forma de onda. El tanque de 25x25x50 cm³ en el que se realizan las medidas es de metacrilato de alta calidad óptica, y contiene agua destilada introducida en régimen laminar directamente desde el destilador, para evitar la formación de burbujas que puedan interactuar con el campo.

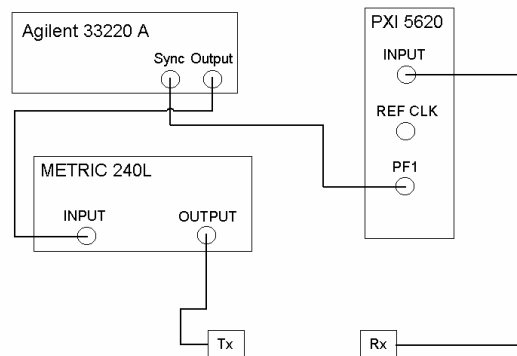
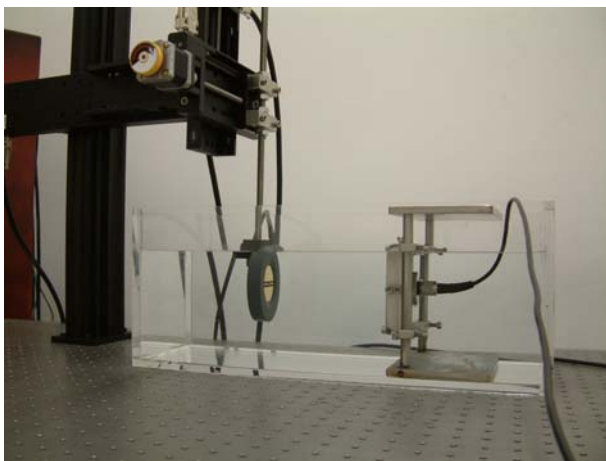


Figura 1 – El sistema de posicionamiento permite desplazar los hidrófonos (en la imagen el de membrana, cuya apertura sensible es de 0,2 mm) con una precisión de 10 μm , así como automatizar la toma de medidas acústicas. El diagrama muestra el esquema de conexión del sistema generador-amplificador-tarjeta de adquisición gobernado por el controlador de tecnología PXI, que incorpora también el posicionamiento.

El controlador PXI permite programar en LabView la generación de un sólo pulso del número deseado de ciclos y su captura sincronizada a través del hidrófono y la tarjeta de adquisición, siendo posible trabajar en un muy bajo régimen de potencia media, lo que previene posibles daños en el hidrófono.

Los primeros resultados obtenidos confirman cualitativamente la existencia de los dos tipos de soluciones asintóticas obtenidas en [1], en función de la intensidad de la onda acústica. Las Figuras 2 y 3 muestran las medidas de la forma de onda en la zona focal realizadas con el transductor de 3 cm de apertura.

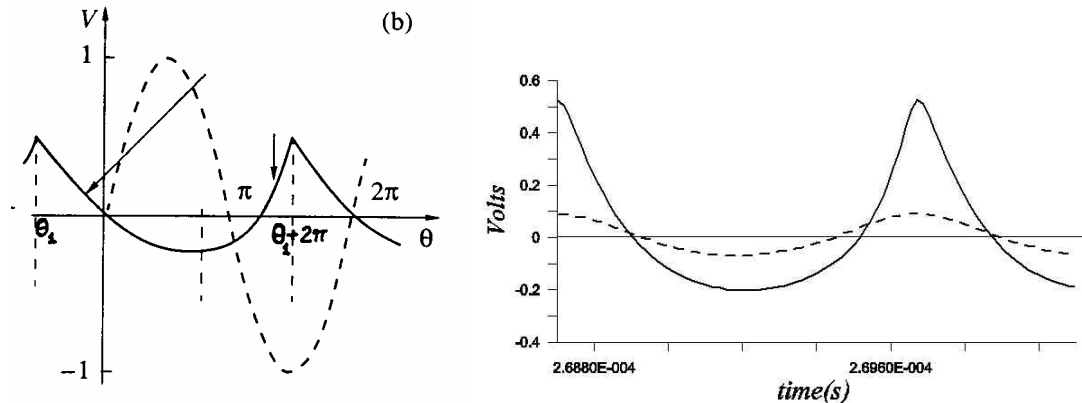


Figura 2 – Solución hiperbólica en U: predominio de la difracción sobre la no linealidad, zona focal en el eje. Izquierda: forma de onda analítica – Derecha: forma de onda medida, amplitudes máximas 0,45 (discontinua), y 2,6 MPa (continua).

La forma de onda observada evoluciona, para valores crecientes de la amplitud máxima de la presión, desde el régimen lineal con un perfil sinusoidal al régimen no lineal, en el que la forma de onda presenta una clara asimetría respecto del cero (Figura 2) y se acentúa la presencia de los armónicos superiores.

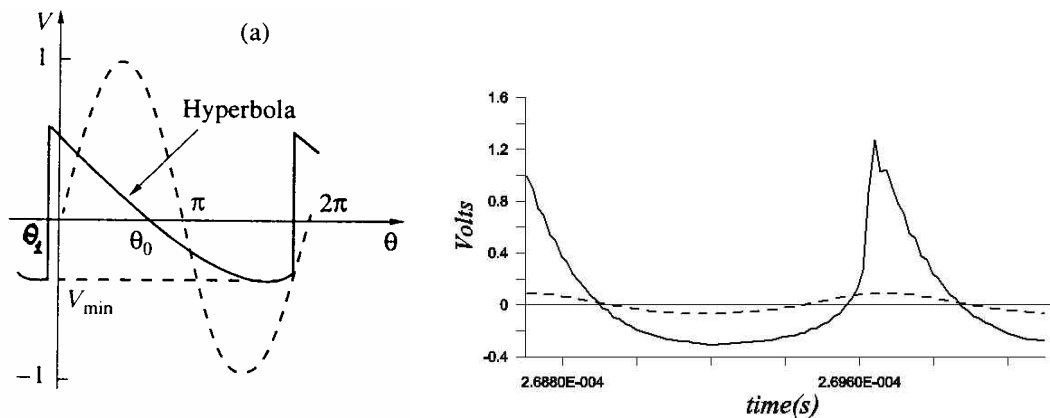


Figura 3 – Solución hiperbólica en N: predominio de la no linealidad sobre la difracción, zona focal en el eje. Izquierda: forma de onda analítica – Derecha: onda medida lineal presión máxima 0,45 (discontinua,) y ondas de choque, 6,2 MPa (continua).

El valor umbral de la presión máxima para el que se produce la aparición de ondas de choque (Figura 3) está en buena correspondencia con los valores obtenidos en la integración numérica de la ecuación KZ: ~ 4 MPa en el foco, 0,5 MPa en la superficie del transductor.

2.2 Estudio de haces auto-atrapados.

El estudio teórico de la ecuación (1), imponiendo la condición de que la derivada de la coordenada de propagación sea nula, revela la existencia de soluciones de los haces de sonido conocidas como estados auto-atrapados. Estos estados se caracterizarían por no variar las características de la forma de onda (tanto en su forma de U como de N) así como la estructura transversal del haz. Resulta particularmente interesante la realización experimental de los haces que una vez focalizados no divergen de nuevo, manteniendo constante la estructura transversal. Su existencia está condicionada a la satisfacción de la condición [2]:

$$N / Y_0 = \frac{z_{sh}}{z_d Y_0} = \frac{2c_0^3}{Y_0 \omega^2 a^2 \varepsilon u_0} \approx 8.14 \quad (3)$$

donde Y_0 es la amplitud máxima del haz. Con el fin de disponer de una herramienta experimental de visualización de la estructura transversal del haz que permita detectar de manera inmediata la propagación de un estrado auto-atrapado, hemos construido un sistema de visualización de variaciones de densidad en tiempo real, a partir de la conocida técnica del campo oscuro o *schlieren* [3]. El sistema (ilustrado en la Figura 4) está formado principalmente por una fuente luminosa puntual que situada en el foco del un espejo parabólico genera un haz plano (rayos paralelos) que ilumina transversalmente el haz acústico. Cualquier variación de densidad introducida por el US produce una desviación de los rayos luminosos, que tras reflejarse en un segundo espejo parabólico ya no pasan necesariamente por el foco del mismo. Situando un filtro espacial que elimine la luz del foco podemos obtener una imagen sobre campo oscuro del perfil transversal del haz (Figura 5).

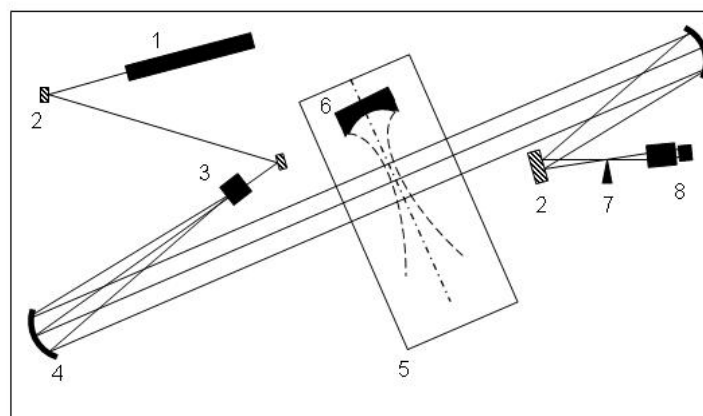


Figura 4 – Diagrama del montaje óptico para la visualización de variaciones de densidad causadas por el campo acústico. Elementos: 1. Láser He-Ne, 2. Espejos planos, 3. Objetivo convergente, 4. Espejos parabólicos, 5. Tanque de metacrilato, 6. Transductor focalizado, 7. Filtro espacial, 8. Objetivo y CCD.

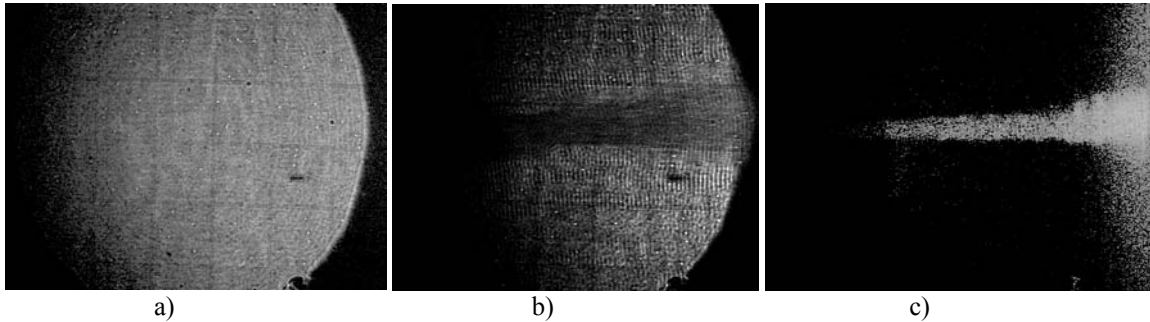


Figura 5 – Sección transversal en la zona post-focal del haz acústico. De izquierda a derecha: a) transductor inactivo, b) emitiendo en onda continua y c) imagen de campo oscuro al suprimir la iluminación no refractada en el haz.

3. CONCLUSIÓN

Se ha iniciado el estudio experimental de las soluciones exactas de la ecuación de Khokhlov-Zabolotskaya (KZ), para el caso de transductores ultrasónicos focalizados, centrándonos en la aparición de las diferentes formas de onda asintóticas (onda en forma de U o de N), así como de los estados auto-atrapados del sonido. Se ha diseñado y construido un sistema de medida automatizado que ha permitido demostrar cualitativamente la existencia de ambos tipos de forma de onda. Asimismo se ha conseguido un sistema de visualización en tiempo real de la estructura transversal del haz acústico, que permite identificar cambios en la divergencia-convergencia del mismo, basados en la técnica de campo oscuro.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la DGICYT en el proyecto BNF2002-04369-C04-04.

REFERENCIAS

- [1] Yu. N. Makov, *Continuous and discontinuous asymptotically universal waveforms for sound beams: exact solutions of KZ equation*. Proceedings of 16th International Symposium in Nonlinear Acoustics, vol 1 pp.109-112, Moscow, Russia, August, 2002
- [2] Yu. N. Makov, V.J. Sánchez-Morcillo; *On the different types of waveforms for self-trapped acoustical beams*. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 90 (2004) 8-12.
- [3] Gary S. Settles, *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media*, Springer-Verlag, Nov. 2001, 390 pages, Hardcover, ISBN 3-540-