

Acústica no-lineal. Macrosonidos

J.A.Gallego*; L. Gaete; G. Rodríguez; E.Riera; C. Campos; L. Elvira
Departamento de Sistemas, Señales y Tecnologías Ultrasónicas
Instituto de Acústica, CSIC c/Serrano,144 Madrid Spain
Tel. 34 91 561 88 06
Fax. 34 91 411 76 51
web: www.ia.csic.es

* Coordinador de la recopilación y redacción del trabajo

PACS: 43.25

Resumen

Este artículo pretende recoger sintéticamente la actividad desarrollada por el Instituto de Acústica en el campo de la Acústica No-Lineal y Macrosonidos durante los 25 últimos años. Esta actividad ha estado en su mayor parte relacionada con la generación y propagación de campos sónicos y ultrasónicos de alta intensidad, y la aplicación de alguno de sus efectos. Se han estudiado así fenómenos ligados tanto a ondas progresivas como estacionarias, en medios fluidos y en sólidos, desarrollando trabajos experimentales y tratamientos analíticos y numéricos.

Abstract

This article deals with a synthesis of the activity developed in Nonlinear Acoustics and Macrosonics by the Instituto de Acústica, during the last 25 years. This activity has been mainly related to the generation and propagation of high-intensity sonic and ultrasonic fields and to the application of their effects. Nonlinear progressive and standing waves in fluids and solids were studied by using experimental, analytic and numerical means.

Introducción

En las ondas acústicas de baja intensidad las magnitudes que definen el campo son, en general, muy pequeñas (infinitesimales) en comparación con las magnitudes estáticas. En estos casos, se aplican las ecuaciones lineales de la mecánica de los medios continuos. Por el contrario, cuando se trabaja con campos acústicos de alta intensidad las magnitudes acústicas alcanzan amplitudes elevadas (finitas) que no pueden considerarse despreciables frente a sus homólogas estáticas y, por consiguiente, hay que tener en cuenta los términos de segundo orden (o superiores) que aparecen en las ecuaciones de los medios continuos.

Otra causa de no linealidad es el propio medio de propagación, que se comporta no linealmente tal como se manifiesta en la ecuación de estado.

Los efectos no-lineales más relevantes relacionados con los campos ultrasónicos de alta intensidad son: distorsión de la onda, saturación acústica, presión de radiación y corrientes acústicas. Además, en el caso de los líquidos hay que mencionar la cavitación y en los sólidos la formación y movimiento de dislocaciones.

El desarrollo de esta línea dentro del Instituto de Acústica (IA) ha estado en su mayor parte ligado a la generación y propagación de campos sónicos y ultrasonidos de alta intensidad (macrosonidos) y a la aplicación de sus efectos. De hecho se han estudiado temas relativos a: ondas progresivas y estacionarias en medios gaseosos, con especial énfasis en el análisis de la generación de armónicos y en la saturación de la onda; vibraciones resonantes extensionales y flexiona-

les en sólidos, orientadas a la caracterización no-lineal de materiales empleados en la construcción de transductores y a la determinación de la fatiga ultrasónica de los mismos y, finalmente, cavitación y otros efectos no-lineales, para su aplicación en procesos. El análisis e interpretación de estos temas se ha basado en el trabajo experimental complementado con modelos analíticos y numéricos. En este aspecto hay que destacar el desarrollo original y muy novedoso de algoritmos y códigos por elementos finitos para el tratamiento de los problemas no-lineales.

Describiremos a continuación de forma muy sintética los principales problemas afrontados y las soluciones conseguidas, resaltando las aportaciones más importantes.

Ondas planas y esféricas progresivas y estacionarias de amplitud finita en medios gaseosos. (1,2,3,4)

Aunque existen numerosos estudios sobre la propagación de ondas planas y esféricas de amplitud finita, los trabajos experimentales realizados han sido escasos, especialmente a altas frecuencias sónicas y ultrasónicas donde, sin embargo, los efectos no-lineales son más relevantes. El desarrollo de un nuevo tipo de transductor ultrasónico direccional con alta capacidad de potencia, llevado a cabo en el IA (transductores de placa escalonada) en los años 70 y sucesivos, permitió afrontar el estudio experimental completo del proceso evolutivo de la propagación no-lineal de ondas en campo libre, hasta entonces limitado por las dificultades que planteaban los experimentos a bajas frecuencias que requerían espacios libres muy grandes. Este estudio, iniciado en la segunda mitad de los años 70, básicamente consistió en la medida de la amplitud del fundamental y de los tres primeros armónicos de la onda, generada por los transductores antes mencionados en una cámara anecoica, para diferentes potencias de la fuente acústica y a varias distancias en el campo lejano. Al mismo tiempo se registraron los oscilogramas y los diagramas de directividad. Los resultados sirvieron para confirmar la validez del modelo de propagación, conocido como de "choc que débil", en lo que se refiere al comportamiento del fundamental. Se vió, sin embargo, que para el segundo armónico existía una pequeña desviación que, no obstante, desaparecía si se tenían en cuenta los efectos de absorción acústica. Se observó asimismo muy claramente el fenómeno de la saturación acústica que fue perfectamente cuantificado y contrastado con el modelo teórico.

Un trabajo similar se llevó a cabo para las ondas planas que se generaron en un tubo de radio (r) tal que la condición de onda plana ($2\pi r < 1.841$) resultaba satisfecha. Los resultados obtenidos confirmaron la validez del modelo teórico de Rudnick para el fundamental, pero mostraron también

la falta de un modelo teórico para justificar los valores de los armónicos más elevados.

Se realizaron, asimismo, estudios de ondas estacionarias en tubos, detectándose, por primera vez, fenómenos de saturación en onda no progresiva.

Vibraciones resonantes extensionales y flexionales de amplitud finita en materiales metálicos. (5,6,7,8,9,10,11,12)

El desarrollo de los nuevos transductores de potencia, a los que anteriormente nos hemos referido, requería un conocimiento profundo del comportamiento de los materiales que los constituyen cuando están sometidos a vibraciones de alta amplitud. Es decir, se precisaba la caracterización no-lineal de estos componentes y no existía ningún procedimiento establecido para ello en el rango de las frecuencias de interés (bajas frecuencias ultrasónicas) y bajo las condiciones de trabajo requeridas (vibraciones resonantes). Se inició así, al final de los años 80, un estudio teórico-experimental sobre las vibraciones extensionales y flexionales en barras metálicas de sección circular y rectangular. El estudio teórico se llevó a cabo resolviendo la ecuación unidimensional de segundo orden por el método de las aproximaciones sucesivas y aplicando el principio de superposición para la solución de ondas estacionarias. El estudio experimental consistió en el análisis armónico de la vibración con probetas de forma escalonada. Estas probetas se excitan linealmente en su sección más gruesa, obteniéndose desplazamientos no-lineales en la sección más delgada. La vibración se midió con vibrómetro láser.

Este estudio sirvió como base para el posterior desarrollo de un método no-destructivo para determinar la deformación límite de los metales y su comportamiento a fatiga ultrasónica. Este método se basa en la medida de las pérdidas internas que se producen en probetas escalonadas sometidas a distintas excitaciones. Como consecuencia de las altísimas deformaciones que se pueden generar en la sección más delgada de las probetas, se puede estudiar la evolución de la atenuación con la deformación en las regiones lineal, no-lineal y pre-destructiva. Si se desea, se puede llegar incluso a la rotura por fatiga. El método ha supuesto un avance muy novedoso en la caracterización no-lineal de materiales y ha permitido contrastar en aleaciones de titanio, la gran incidencia de la microestructura en la resistencia a la fatiga ultrasónica.

Cavitación y otros efectos no-lineales en fluidos. (13,14,15)

Las aplicaciones de alta intensidad en líquidos están básicamente ligadas al fenómeno de la cavitación acústica, que

esencialmente consiste en la formación e implosión de burbujas muy pequeñas en el seno de un líquido por la acción de un campo acústico. La implosión de las burbujas produce ondas de choque y altísimas temperaturas muy localizadas que pueden ser convenientemente utilizadas en diversas aplicaciones. Este importante y típico fenómeno no-lineal ha sido objeto de nuestra atención tanto desde el punto de vista aplicativo como para el conocimiento de sus complejos mecanismos. Uno de nuestros resultados en este último aspecto ha sido el descubrimiento experimental y la justificación teórica de la existencia de dos tipos de cavitación (débil y fuerte) en la masa de un líquido, así como el establecimiento de un procedimiento para su detección.

En el estudio de otros fenómenos no-lineales hay que destacar la investigación teórica y experimental del efecto "estela acústica" en aerosoles que, por su incidencia en el fenómeno de la aglomeración de partículas, será tratado en el artículo correspondiente a esa temática.

Desarrollo y aplicación de métodos numéricos en el estudio de los campos no-lineales. (16,17,18,19,20,21,22)

El estudio experimental de las ondas de amplitud finita, tanto en campo libre como en tubos y cavidades realizado al inicio de los años 80, dejó clara la necesidad de un tratamiento teórico más general de estos problemas. Las dificultades analíticas que esto planteaba hicieron entonces inviable el avance. Sin embargo, el espectacular y constante desarrollo de la capacidad de los ordenadores de final de los años 80 y de los 90, ha propiciado una importante vía para la aplicación de los métodos numéricos a este complicado tipo de

problemas. De hecho, conscientes de esta posibilidad, abrimos una línea específica de trabajo que, sin duda, fue pionera en el desarrollo y aplicación de los métodos de elementos finitos (FEM) a campos acústicos no-lineales. En esta línea de trabajo, que se encuentra en pleno desarrollo, hay que destacar, por el momento, dos grandes consecuciones: el desarrollo y validación de un modelo tridimensional de elementos finitos para la propagación acústica no-lineal y su implementación en un código comercial (ATILA), y el desarrollo y validación de un algoritmo de elementos finitos para ondas estacionarias no-lineales y su aplicación al estudio unidimensional en tubos. Se ha realizado, además, un tratamiento tridimensional del campo acústico en cavidades que está en proceso de validación experimental. Al mismo tiempo se están explorando las posibilidades de otros métodos numéricos (elementos de contorno, métodos en el dominio del tiempo, etc.) para el análisis de estos problemas.

Perspectivas futuras

Para finalizar, queremos indicar que las perspectivas de trabajo que se presentan en esta línea son enormemente amplias, por lo que será preciso seleccionar temáticas. Sin embargo, se puede ya asegurar que seguiremos trabajando en la profundización de los métodos numéricos y en el perfeccionamiento de los procedimientos experimentales. Asimismo, parece clara la necesidad de tratar, junto a los problemas de los campos no-lineales, aquellos otros, aún más complejos, que se refieren a los efectos a ellos ligados, tales como la presión de radiación, el viento acústico y la cavitación en fluidos y la generación y movimiento de dislocaciones en sólidos.

Bibliografía

- 1.- J.A. Gallego, L. Gaete "Experimental study of non-linearity in free progressive acoustic waves in air at 20 kHz" *Journal de Physique*, 41 (1979) pp.336-340
- 2.- L. Gaete, J.A. Gallego "Acoustic saturation of finite-amplitude plane waves in air at 21 kHz" *Ultrasonic International* 81, pp. 210-214 IPC Science and Technology Press Ltd, Guilford, Surrey UK 1981
- 3.- J.A. Gallego, L. Gaete "Propagation of finite amplitude ultrasonic waves in air. I. Spherically diverging waves in the free field" *Journal of the Acoustic Society of America*. 73 (1983) pp.761-767
- 4.- L. Gaete, J.A. Gallego "Propagation of finite amplitude ultrasonic waves in air. II Plane waves in a tube" *Journal of the Acoustical Society of America*. 73 (1983) pp. 768-773
- 5.- C. Campos, J.A. Gallego "Behaviour of metals used in power ultrasonic transducers at high-strain amplitudes" *Ultrasonic International* 1991, Conference proceedings, Butterworth-Heinemann Ltd. , London, pp. 645-648
- 6.- C. Campos, J.A. Gallego "Experimental system for studying ultrasonic non-linear vibrations in metals" *Ultrasonics International* 93, Wien (Austria), July 93. UI 93 Conference Proceedings, Ed. Butterworth-Heinemann Ltd. (ISBN:0750618779), pp. 571-574
- 7.- C. Campos, J.A. Gallego "Nonlinear study of metallic materials for power ultrasonic transducers" *Proceedings of the 11th International FASE Symposium, Valencia* 15-17 Noviembre 94, pp. 77-80
- 8.- C. Campos, J.A. Gallego "Finite amplitude standing waves in metallic rods" *J.Acoustic. Soc. Am.*, Vol 97 (2), February 1995, pp. 875-881
- 9.- C. Campos, J.A. Gallego "Finite amplitude flexural vibrations at ultrasonic frequencies in metallic bars" *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 98 (3), Sept. 1995, pp. 1742-1750
- 10.- C. Campos, J.A. Gallego, P.T. Sanz, F. Montoya "Procedimiento y dispositivo para la caracterización elástica no lineal de materiales sólidos" *Patente española n° solicitud* 9502382, 1.12.95
- 11.- C. Campos, J.A. Gallego "Nonlinear effects in aluminum alloys subjected to high intensity ultrasound" *World Congress on Ultrasonics 95, Berlin, 3-7 Septiembre 95.* WCU Proceedings, ed. Gesellschaft fur angewandte Ultraschallforschung (GEFAU), Duisburg, (ISBN 3-9805013-0-2), pp. 191-194
- 12.- C. Campos, J.A. Gallego "Limiting strain of metals subjected to high intensity ultrasound" *Acustica united with Acta Acustica*, Vol. 82, n°6, 1996, pp. 823-828
- 13.- G. Rodríguez, J.A. Gallego "Cavitation effects in ultrasonic cleaning in textiles" *UI93 Conference Proceedings, Butterworth-Heinemann Ltd* pp. 703-706
- 14.- L. Gaete, Y. Vargas, R. Vargas, J.A. Gallego, F. Montoya "On the onset of transient cavitation in gassy liquids" *J. Acoust. Soc. Am.* 101 (5), Pt 1, May 1997, pp. 2536-2540
- 15.- I. González, T.L. Hoffmann, J.A. Gallego "Acoustic agglomeration: visualization of interactions between particles subjected to intense acoustic fields" *World Congress on Ultrasonic, 24-27 August 1997, Yokohama. Proceedings of WCU 97*, pp. 422-423
- 16.- L. Elvira, E. Riera "A finite element algorithm for the study of nonlinear standing waves" *J. Acoust. Soc. Am.* 103 (5), Pt 1, May 1998, 2313-2320
- 17.- C. Campos, B. Dubus, J.A. Gallego "Numerical analysis of high-intensity ultrasonic processing systems" *16th ICA/135th ASA, Seattle* 20-26 June 1998. *J. Acoust. Am*, Vol. 103, n°5, Pt. 2, May 1998n pp. 2871
- 18.- L. Elvira, E. Riera "Numerical and experimental study of finite amplitude standing waves in a tube at high sonic frequencies" *J. Acoust. Am.* 98 104 (2), Pt 1 August 1998, pp. 708-714
- 19.- C. Campos, B. Dubus, J.A. Gallego "Finite element analysis of the nonlinear propagation of high-intensity acoustic waves" *J. Acoust. Am.* Vol. 106 (1) July 1999, pp. 91-101
- 20.- L. Elvira, C. Campos "Experimental study of 3-D finite amplitude ultrasonic standing wave" *15th International Symposium on Nonlinear Acoustic, 1-4 Sept. 1999, Gottingen.* Book of Abstract, pp.32
- 21.- J. Linares, D. Gil "Modelización de campo acústico en aplicaciones macrosónicas mediante elementos de contorno en condiciones de impedancia" *Revista de Acústica* Vol. XXX, 1999
- 22.- C. Vanhille, C. Campos "A time-domain numerical algorithm for the analysis of nonlinear standing acoustic waves" *15th International Symposium on Nonlinear Acoustic, 1-4 Sept. 1999, Gottingen* (Proceedings to be published)