EFECTOS NO LINEALES EN LA FUERZA DE RADIACIÓN GENERADA POR HACES FOCALIZADOS DE AMPLITUD MODULADA

Nuria González-Salido, Noé Jiménez, Javier Redondo, Bernardino Roig, Rubén Picó, Víctor Sánchez-Morcillo, Francisco Camarena

ÍNDICE

- *Introducción*
  - *Fuerza de Radiación*
  - *Propagación ultrasonidos*
  - *Efectos no lineales*
  - *Objetivos*
- *Método numérico*
- *Resultados*
  - *Efectos no lineales en la localización del máximo*
  - *Efectos no lineales en el módulo*
  - *Efectos de la modulación*
- *Conclusiones*
- *Aplicaciones*
- *Referencias*

INTRODUCCIÓN

- **Fuerza de radiación**: Promedio, en un periodo, de la fuerza ejercida por un haz sonoro sobre el medio en el que se propaga
  - Si la dimensión transversal del haz << longitud de absorción:

$$F_z = \frac{b}{c_0^5 \rho_0^3} \left(\overline{\frac{\partial p}{\partial t}} \right)^2$$

  - En el caso de pequeña señal (baja potencia):

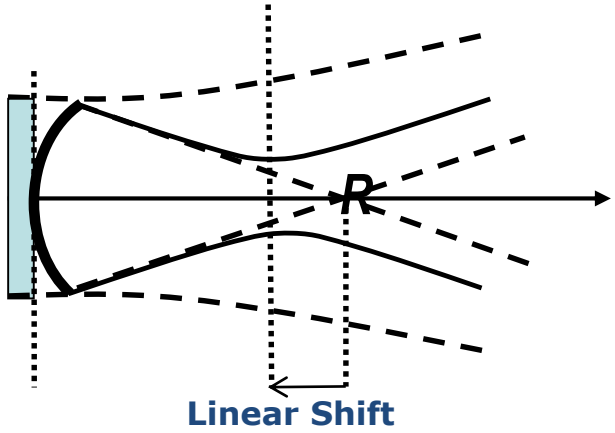
$$F_z = \frac{\alpha p_0^2}{c_0^2 \rho_0^2} = \frac{2\alpha I}{c_0 \rho_0}$$

  - Aplicaciones: Técnicas de imagen ultrasónica :HMI (Transductor focalizado + señal AM): Consigue una fuerza oscilatoria constante muy localizada.

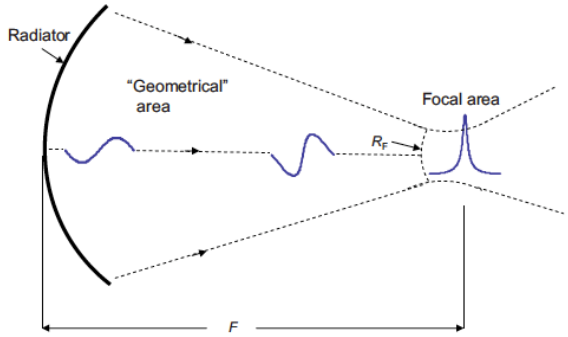
INTRODUCCIÓN

1 Introducción
2 Método numérico
3 Resultados
4 Conclusiones
5 Aplicaciones
6 Referencias

- **Propagación ultrasonidos**
  - Régimen lineal: difracción + focalización= shift lineal

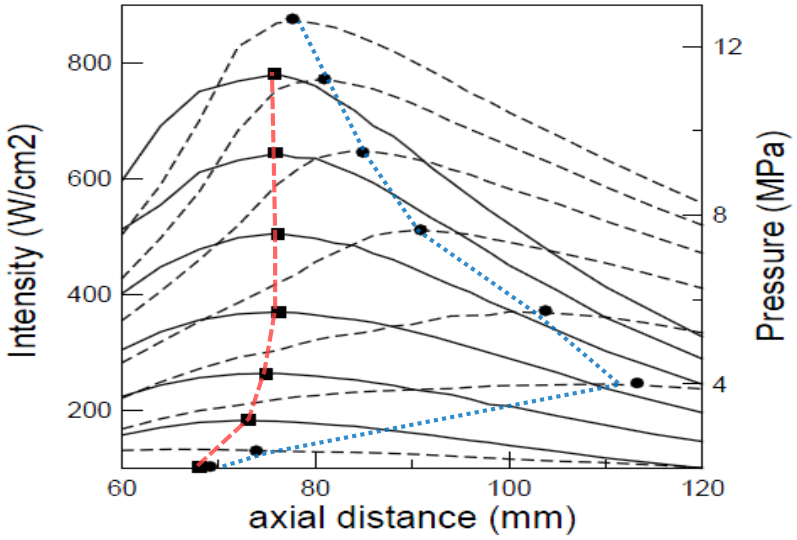


  - Régimen no lineal: Distorsión del perfil temporal



INTRODUCCIÓN

- **Efectos no lineales**
  - Baja régimen no lineal: Aparecen armónicos superiores de la frecuencia de trabajo
  - Alto régimen no lineal: : Desarrollo frentes de choque en la forma de onda: Absorción no lineal de armónicos superiores



Objetivos

- Estudio numérico de los efectos de la propagación no lineal de haces ultrasónicos en agua sobre la fuerza de radiación y la localización de sus máximos

MÉTODO NUMÉRICO

- **Modelo numérico:**
  - Resolución de la ecuación de onda parabólica no lineal KZK para haces sonoros axisimétricos:

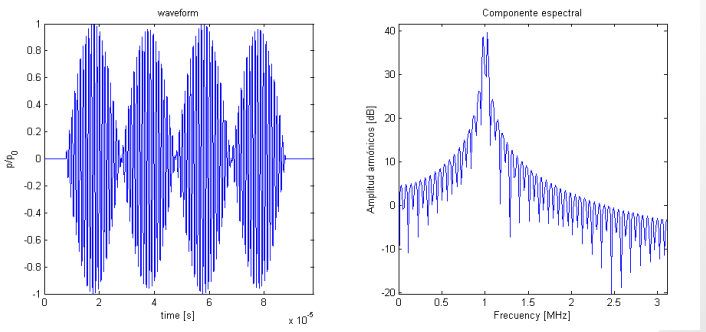
$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial t'} = \underbrace{\frac{c_0}{2}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}\right)}_{\text{Difracción}} + \underbrace{\frac{\delta}{2c_0^3}\frac{\partial^3 p}{\partial t'^3}}_{\text{Absorción}} + \underbrace{\frac{\varepsilon}{2\rho_0 c_0^3}\frac{\partial^2 p^2}{\partial t'^2}}_{\text{No linealidad}}$$

$t' = t - z_0$ Tiempo retardado

  - Señal de excitación AM:

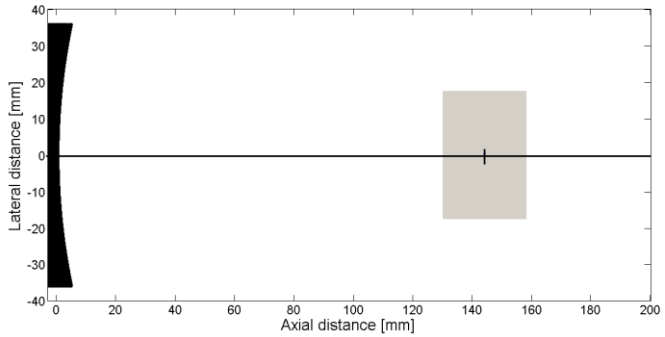
$$p = p_0 \exp\left[-\left(\frac{\omega_0 t}{80\pi}\right)^{2000}\right]\left[1 + m\sin(2\pi f_m t)\right]\sin(2\pi f_0 t)$$

m = 50 índice de modulación



MÉTODO NUMÉRICO

- **15 Simulaciones:**

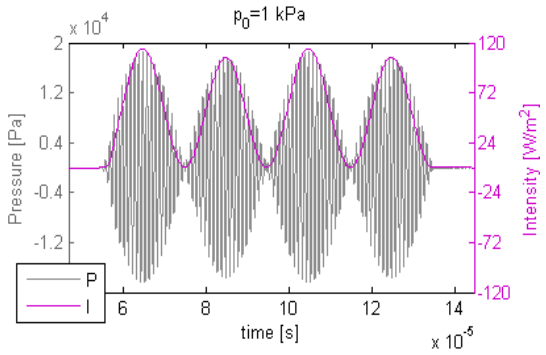


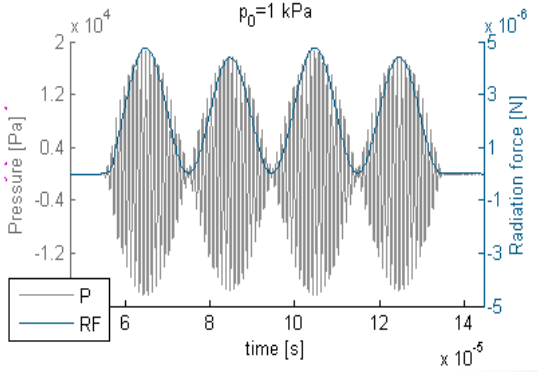
Linear focusing gain G	**18**
f-number	2.06
Fundamental Frecuency f_0	1 MHz
Carrier Frecuency f_m	25 kHz
Focal length d	144 mm
Radius of sound source	35 mm
Source pressure amplitud p_0	1-300 kPa

- **Procesado:**

$$I = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T p^2(t)dt}{c_0\rho_0}$$

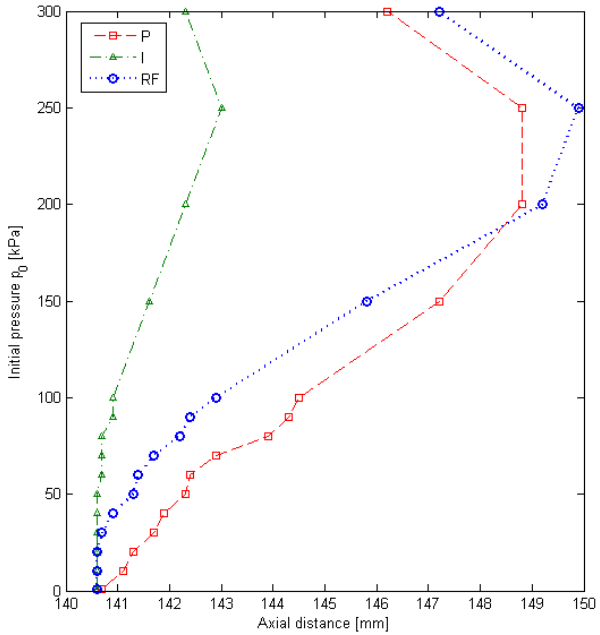
$$F_z = \frac{b}{c_0^5\rho_0^3}\left(\frac{\overline{\partial p}}{\partial t}\right)^2 \qquad F_z^{LIN} = \frac{2\alpha I}{c_0\rho_0}$$





RESULTADOS

- **Efectos no lineales en la localización del máximo:**
  - Régimen lineal: Presión, intensidad y RF focalizan en el mismo punto
  - Régimen no lineal: Auto-refracción de la onda



RESULTADOS

1 Introducción

2 Método numérico

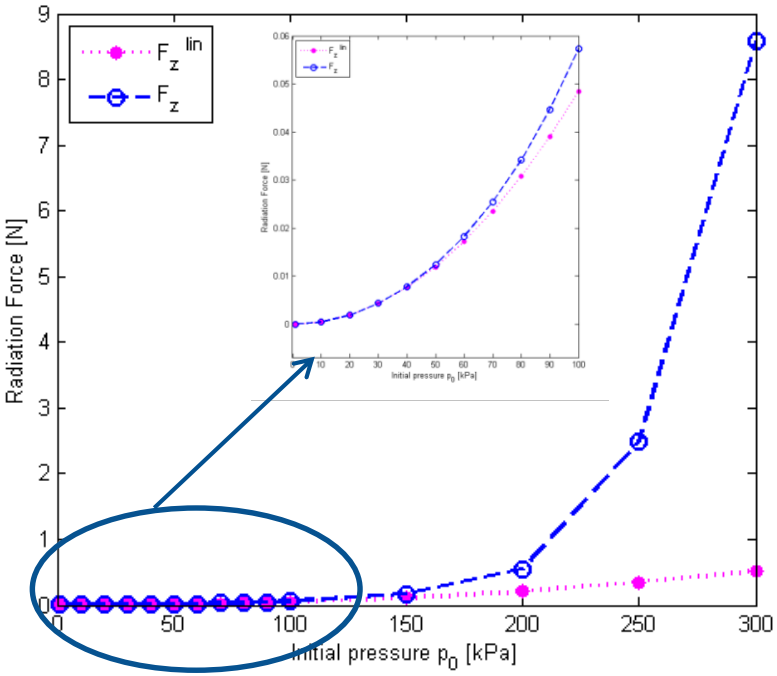
3 Resultados

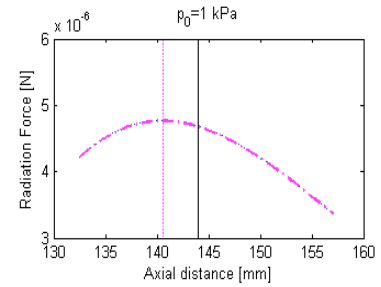
4 Conclusiones

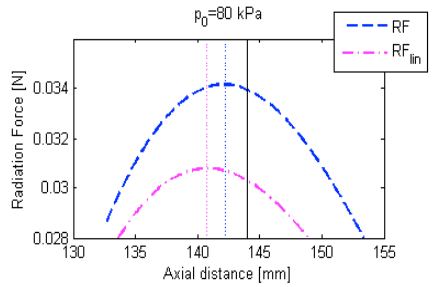
5 Aplicaciones

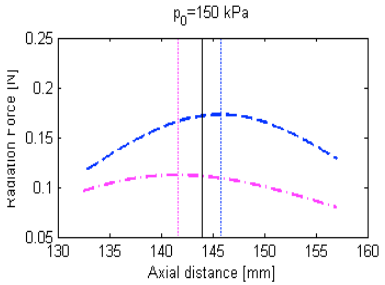
6 Referencias

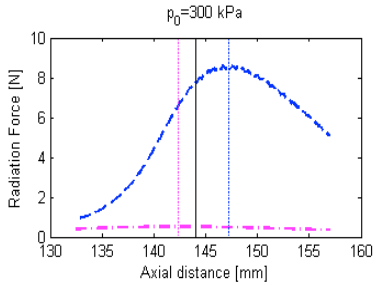
- **Efectos no lineales en la amplitud de la RF:**
  - La aproximación lineal subestima el valor real de la RF





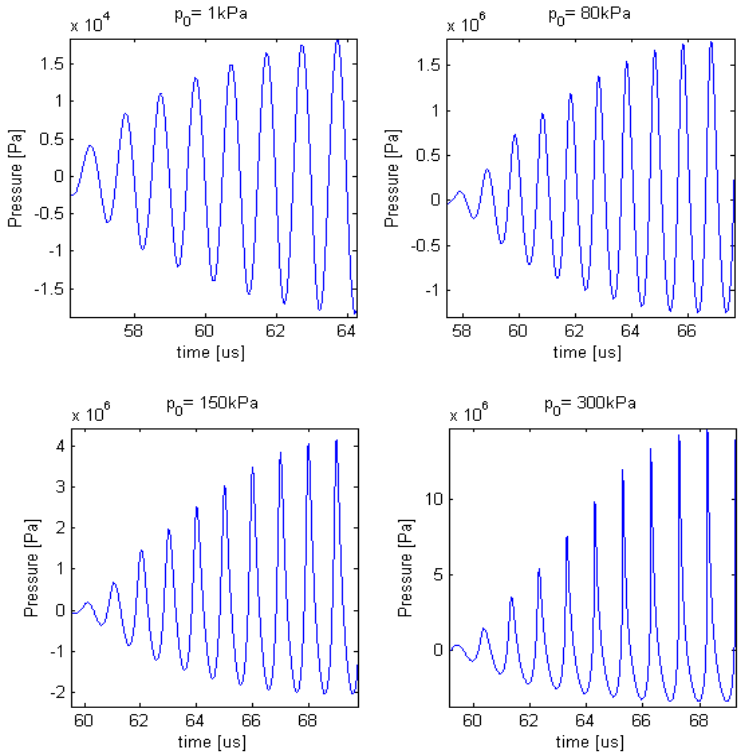






RESULTADOS

- **Efectos de la modulación**
  - Señal AM: Distorsión no lineal de los periodos centrales de máxima amplitud



RESULTADOS

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

1 Introducción

2 Método numérico

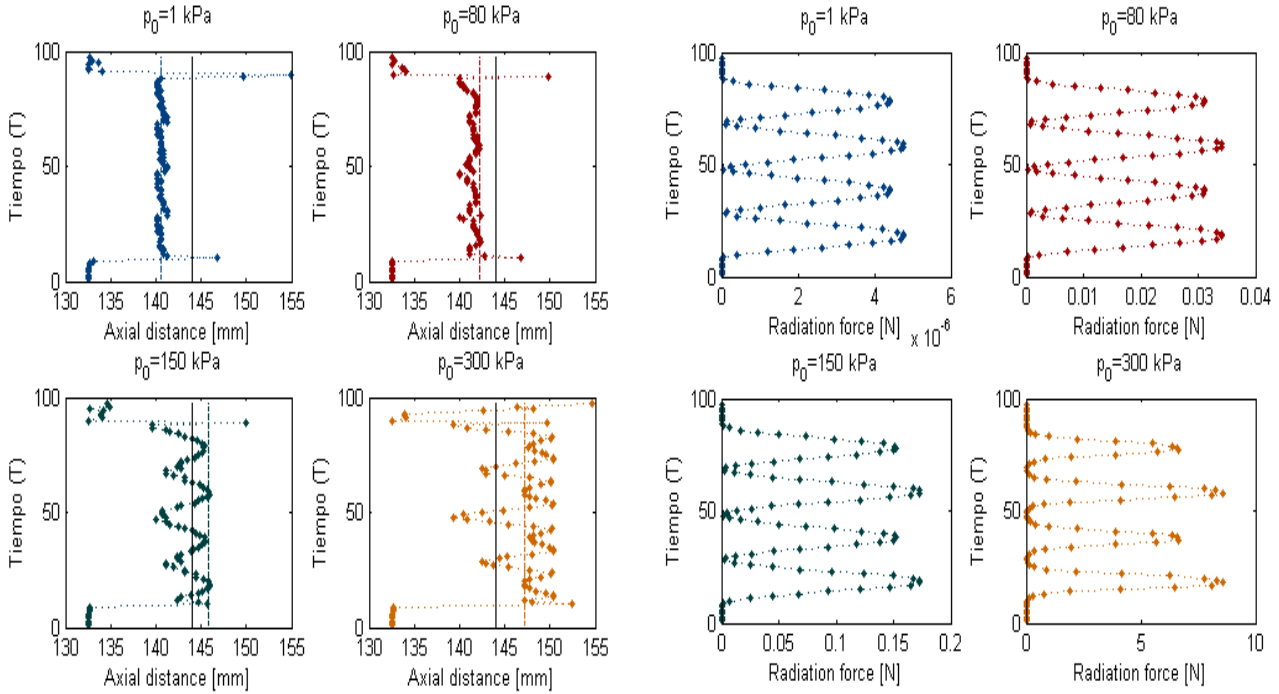
3 Resultados

4 Conclusiones

5 Aplicaciones

6 Referencias

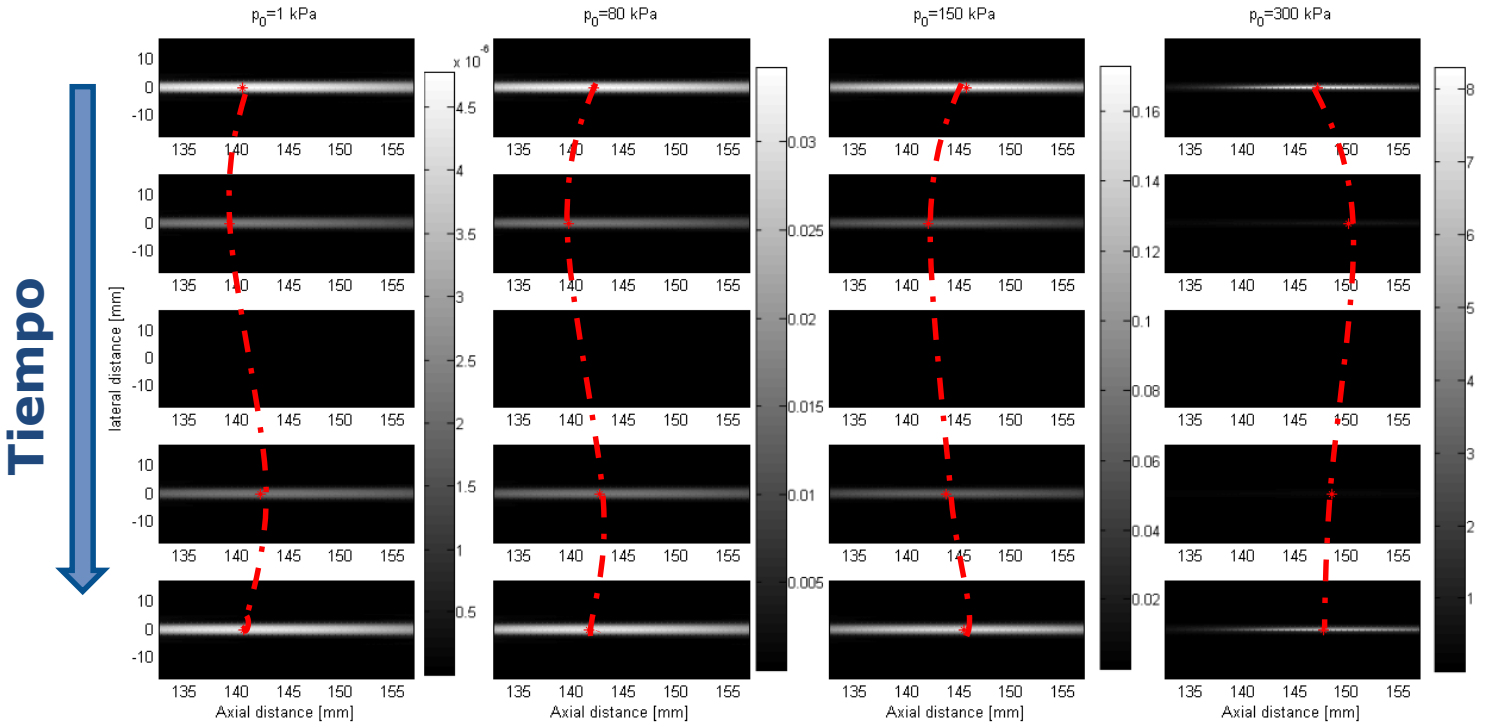
- **Efectos de la modulación:**
  - Fuerza de radiación dinámica
  - Desplazamiento no lineal de la focal a lo largo de cada periodo



RESULTADOS

- **Efectos de la modulación:**

Lineal **POTENCIA** **No lineal**



Efectos no lineales en la fuerza de radiación generada por haces focalizados de amplitud modulada

CONCLUSIONES

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

1 Introducción

2 Método numérico

3 Resultados

4 Conclusiones

5 Aplicaciones

6 Referencias

- La fuerza de radiación está afectada por la propagación no lineal , tanto en módulo con en localización
- Como la intensidad y la presión, la fuerza se ve afectada por un desplazamiento no lineal del máximo:
  - ✓ Excede la focal geométrica: 5,5 mm
  - ✓ Retroceso de 2 mm
- Alcanzado el régimen no lineal, la fuerza deja de ser proporcional a la intensidad llegando a diferir en un orden de magnitud
- Este desplazamiento espacial se hace dinámico en el caso de señales AM

APLICACIONES DEL ESTUDIO

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

1 Introducción
2 Método numérico
3 Resultados
4 Conclusiones
5 Aplicaciones
6 Referencias

- *Experimental:*
  - Facilita el estudio en tejidos biológico

- *Aplicaciones médicas:*
  - Presión: Localización del máximo de rarefacción determina la zona donde se puede producir cavitación
  - Intensidad: Aplicaciones que requieren grandes concentraciones de energía en pequeñas zonas como la ablación
  - Fuerza de radiación: El conocimiento del módulo permite poder realizar un mapeado cuantitativo del módulo de elasticidad de los tejidos en las técnicas de imagen ultrasónicas (HMI, ARFI…)

REFERENCIAS

- L.A Ostrowsky "Radiation force in nonlinear, focused beams (L)". *Acoustic Society of America*, pp. 1404-1407 (2008)
- Y.A Pischalnikov, O.A. Sapozhnikov, and T.V. Sinilo, "Increase in the Efficiency of the Shear Wave Generation in Gelatin Due to the Nonlinear Absorption of a Focused Ultrasonic Beam". *Acoustical Physics,* Vol 48, No 2, pp. 241-219 (2002)
- N.S. Bakhavlov, Y.M. Zhilelkin, and E.A. Zabolotskaya, *Nonlinear Theory of Sound Beams* (Nauka, Moscow, 1982; AIP, New York,1987)
- C. Maleke and E. E. Konofagou, "Harmonic motion imaging for focused ultrasound (HMIFU): a fully integrated technique for sonication and monitoring of thermal ablation in tissues", *Physics in medicine and biology 53,* 2008 pp.1773-1793
- C. Maleke, M. Pernot and E. E. Konofagou, "Single-Element focused ultrasound transducer method for harmonic motion imaging", *Ultrasonic Imaging* 28, 2006**,** pp**.** 144-158 (2006)
- Y.N. Makov, V.J. Sánchez-Morcillo, F. Camarena, V.Espinosa, "Nonlinear change of on-axis pressure and intensity maxima positions and its relation with the linear focal shift effect" *Ultrasonics* 48.678-686 (2008)
- Y.S. Lee " Numerical solution of the KZK equation for pulsed finite amplitude sound beams in thermoviscous fluids" Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin, (1993)
- Rudenko, IEEE Ultrasonic Symposium 489-491 (1992)

EFECTOS NO LINEALES EN LA FUERZA DE RADIACIÓN GENERADA POR HACES FOCALIZADOS DE AMPLITUD MODULADA

Nuria González-Salido, Noé Jiménez, Javier Redondo, Bernardino Roig, Rubén Picó, Víctor Sánchez-Morcillo, Francisco Camarena