

## **Campo acústico producido por un anillo segmentado**

Referencia PACS: 43.38.Hz, 43.35, 43.35.Bc, 43.60

O. Martínez; L.G. Ullate; M.A.G. Izquierdo; M. Parrilla  
Instituto de Automática Industrial (C.S.I.C.)  
Ctra. Campo Real, Km. 0,200  
28500, La Poveda, Arganda del Rey Madrid  
España  
Tel: 34-91-8711900  
Fax: 34-91-8717050  
e-mail: oscarm@iai.csic.es

### **ABSTRACT**

In order to generate 3D ultrasonic imaging, preliminary works have shown that apertures based on segmented annuli suppose an interesting alternative to reduce the amount of electronic resources associated to 2D-squared arrays. In this paper the acoustic field radiated by a segmented annulus is studied in order to evaluate its capability to generate volumetric ultrasonic images. Different aspects as main lobe resolution, side lobes and grating lobes are here analyzed.

### **RESUMEN**

A partir de trabajos preliminares se ha visto que las aperturas basadas en anillos segmentados constituyen una interesante alternativa a los tradicionales arrays matriciales, ya que permiten generar imagen ultrasónica 3D con un menor número de elementos. En este trabajo se estudia el campo ultrasónico producido por un anillo segmentado y su capacidad para generar imágenes volumétricas. Se analizan aspectos tales como la resolución del lóbulo principal, los lóbulos secundarios y los lóbulos de rejilla.

### **INTRODUCCIÓN**

Los arrays ultrasónicos permiten deflectar electrónicamente el haz principal lo que proporciona precisión y rapidez frente a los sistemas de barrido mecánico. Tradicionalmente los sistemas de imagen volumétrica se basan en los arrays matriciales cuadrados, sin embargo este tipo de aperturas presenta limitaciones a su desarrollo, fundamentadas principalmente en el gran número de elementos que precisan para producir un campo de buena calidad [1].

El campo ultrasónico producido por un anillo posee la peculiaridad de ser altamente directivo [2]. Si el anillo se divide a su vez en segmentos, la apertura puede ser utilizada como un array bidimensional capaz de generar imágenes tridimensionales. Desde esta perspectiva el anillo segmentado constituye una interesante alternativa para este tipo de aplicaciones, ya que permite reducir de forma importante el número de elementos de la apertura manteniendo un campo de buena calidad. La utilización de este tipo de arrays no es nueva. Concretamente, en [3] se propone una apertura bianular y comparan su funcionamiento frente al array lineal basados en datos empíricos.

En este trabajo se estudia el campo ultrasónico que produce un anillo segmentado, resaltando la influencia de la geometría de la apertura (en particular tamaño de los elementos) en la calidad del haz principal y en la generación de los lóbulos secundarios y de rejilla. En las computaciones se ha usado el método de la respuesta al impulso que proporciona un resultado exacto del campo producido por aperturas anulares [4]. Esta función se usa más tarde para realizar el análisis del campo en el plano focal, tanto en banda ancha como en onda continua.

**CAMPO DE UN ANILLO SEGMENTADO**

Cálculo del campo acústico

Si se considera un anillo formado por  $N$  elementos que vibran idealmente en tipo pistón, sobre un baffle rígido, la presión en un punto del espacio dado en coordenadas esféricas  $x(x_r, x_f, x_q)$  se calcula por superposición de los elementos:

$$P(\bar{x}, t) = \frac{dv(t)}{dt} * \sum_{i=1}^N h_i(\bar{x}, t - T_i) \tag{1}$$

donde  $v(t)$  es el pulso de excitación, que puede ser modelado como una onda continua o como un pulso de banda ancha,  $h_i(\bar{x}, t - T_i)$  es la respuesta al impulso [5] que para el caso del sector anular ha sido descrita en [4], y  $T_i$  es el retardo que debe ser aplicado sobre ese mismo elemento para deflectar el haz principal en una dirección determinada  $x^F(x_f, x_q)$ . Estos retardos se calculan como:

$$T_i = R \sin x_q^F (\cos x_{fi} \cos x_f^F + \sin x_{fi} \sin x_f^F) \tag{2}$$

donde  $(R, x_{fi})$  es la posición del centro del sector anular  $i$  del array. El array muestra el aspecto que se describe en la figura 1, donde un anillo de diámetro exterior  $D$  y diámetro interior  $d$  está dividido en  $N$  elementos de iguales dimensiones  $(e \times w) = ((D-d)/2 \times 2\pi R/N)$ .

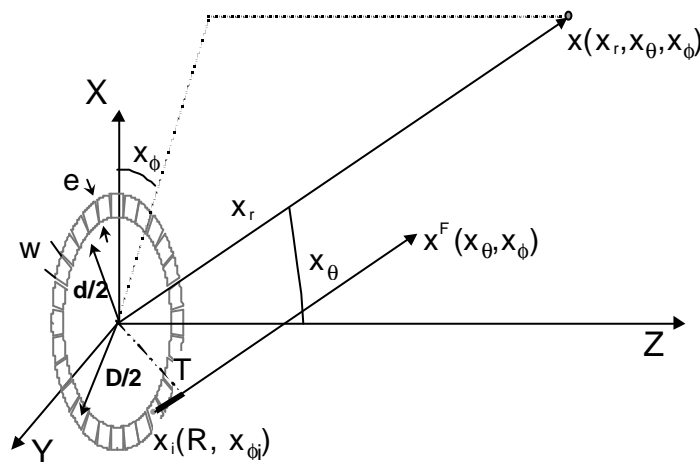


Figura 1: Geometría de un anillo segmentado.

Descripción del campo producido por un anillo segmentado

En este apartado se describen las características principales del campo acústico para un anillo segmentado de 60 elementos cuyas dimensiones (relativas a  $\lambda$ ) son  $(e \times w) = (1 \times 1)$  y  $D=20.1$ . El análisis se basa en varios ejemplos excitando el array en banda ancha y banda estrecha, y modificando el ángulo de deflexión  $x_q^F$  entre 0 y 30°. En la figura 2 se presentan los resultados para banda estrecha.

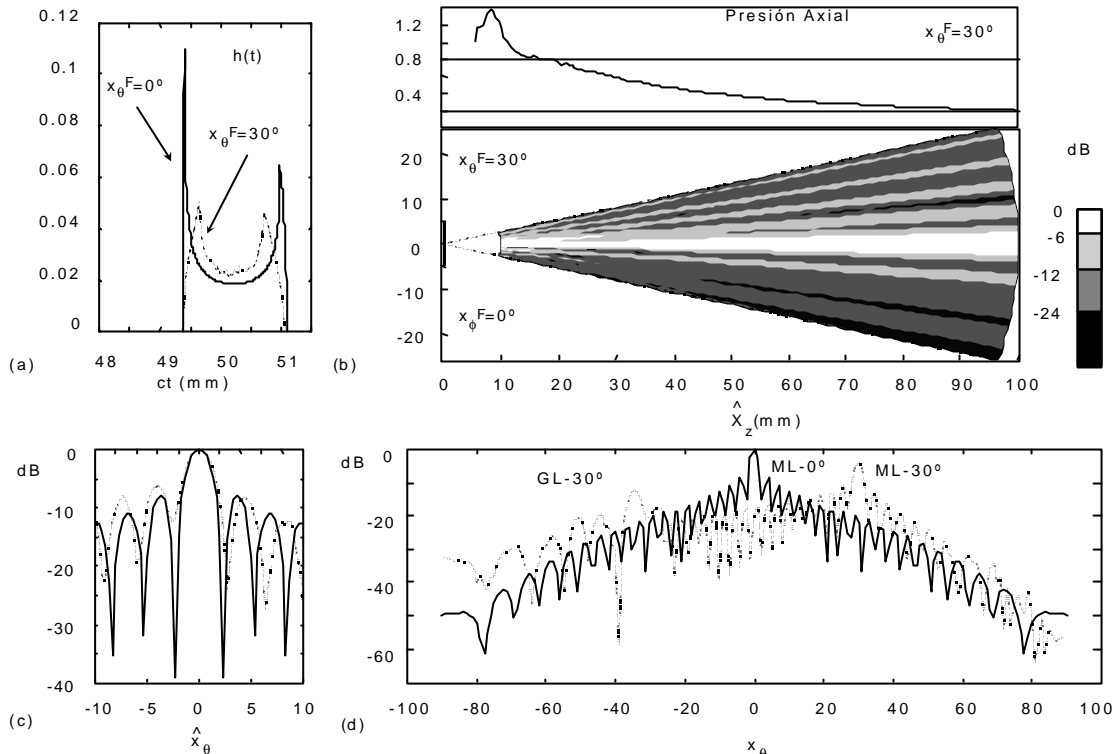


Figura 2. (a) Respuesta al impulso de un array sin deflectar (línea plena) y deflectando el haz 30°, evaluadas sobre el plano focal a 10° del foco. (b) Plano en profundidad del campo de presiones deflectando 30°. (c) Detalle del haz principal para  $x_{\theta}^F = 0$  y 30°. (d) Respuesta lateral para ambas deflexiones, donde se destacan los lóbulos de rejilla producidos al deflectar el haz.

Si comparamos la forma de la respuesta al impulso para ambos casos (figura 2a) se observa que ambas presentan la forma de *canoas*, característica del anillo, lo que explica que el anillo segmentado con deflexión produzca un campo con las mismas características que un elemento anular de las mismas dimensiones. Debido a la forma de canoa de la respuesta al impulso se producen dos pulsos réplica de diferente signo cuya distancia temporal determina la posición de los mínimos y máximos en el campo, determinando la resolución del haz principal y la posición de los lóbulos secundarios. Respecto a un transductor circular con el mismo diámetro exterior, el anillo presenta las siguientes propiedades:

- Una reducción de la anchura del haz principal, alcanzando un valor máximo teórico:

$$\Delta x_{qmin} = 2 \operatorname{asin} \frac{I}{D} \quad (3)$$

- Un acercamiento y un aumento en el nivel de los lóbulos secundarios, que como mínimo se sitúan en:

$$x_{qmax} = \operatorname{asin} \frac{(2m-1)I}{D} \quad (4)$$

- Por último, un acercamiento del campo lejano:

$$x_{rCL}^A = x_{rCL}^C (1 - (d/D)^2) \quad (5)$$

donde  $x_{rCL}^C$  es el campo lejano de la apertura circular. Este efecto hace que p.e. en la figura 2b la profundidad a la cual produce el máximo estrechamiento del haz se encuentra alrededor de 10mm de distancia, lejos de los 50mm que corresponderían a la apertura plena.

Por otro lado, la deflexión introduce una reducción virtual de la apertura ( $D_q = D \cos x_q^F$ ) que produce como consecuencia un aumento de la anchura del haz principal y un alejamiento de los lóbulos secundarios respecto a la radiación normal (figura 2c). Este resultado puede ser predicho a partir la figura 2a donde los picos que presenta la respuesta al impulso, y que dan origen a los impulsos réplica, se acercan entre sí con la deflexión.

Por otro lado el campo con deflexión presenta dos fenómenos: por un lado, una asimetría en lo que respecta al nivel que alcanzan sus lóbulos secundarios alcanzando valores más altos aquellos que se sitúan más cerca del eje de la apertura (figura 2c), y por otro, una pérdida de amplitud en el haz principal (figura 2d). Ambos hechos están asociados a la influencia del diagrama de radiación del elemento.

Por último, y no menos importante, hay que destacar la aparición de lóbulos de rejilla sobre el campo deflectado (figura 2d). Estos lóbulos se producen debido a las distancias entre los elementos y los retardos de focalización (ec. 6). Para una dirección determinada  $x_f$  la distancia virtual entre elementos viene dada por la proyección de los elementos en un eje orientado en esa dirección (array lineal equivalente), de tal manera que la máxima distancia entre elementos puede ser aproximada por  $w$ , presentando la apertura lóbulos de rejilla a partir de

$$x_{qGL} = -\text{asin}\left(\frac{I}{w} - \sin x_q^F\right) \quad (6)$$

Estos lóbulos, debido a la simetría de la apertura se distribuyen equidistantes alrededor del haz principal. Sobre el campo se producen otros lóbulos debidos a otras distancias que resultan menos significativos y se expanden por posiciones más alejadas. Un aspecto importante de este tipo de aperturas es que no todos los elementos contribuyen conjuntamente en la formación de los lóbulos de rejilla, por lo que presenta lóbulos de menor amplitud que una apertura matricial con igual distancia entre elementos [6]. En este sentido, un factor que contribuye a mejorar la calidad del campo es el tamaño de la apertura  $D$ , que conforme aumenta disminuye el porcentaje de elementos que colaboran en la formación de los lóbulos de rejilla.

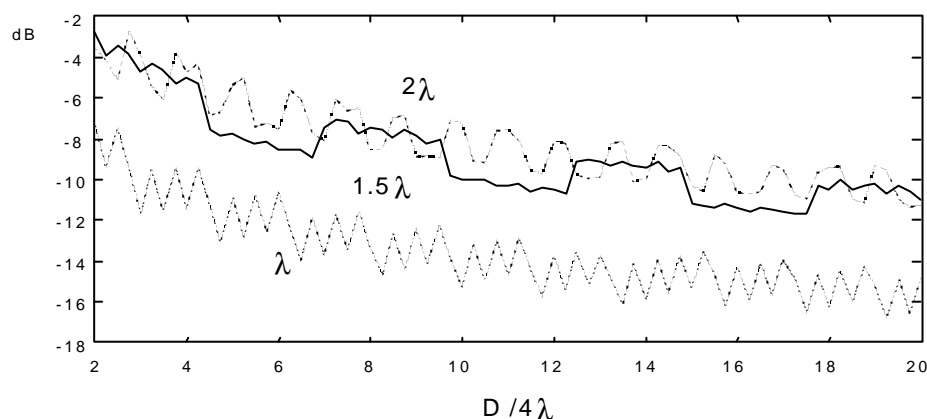


Figura 3. Nivel de los lóbulos de rejilla para  $w=2I$ ,  $1.5I$  y  $I$  en función del diámetro total de la apertura, calculado mediante la aproximación del factor de array.

En la figura 3 se muestra el nivel de los lóbulos de rejilla para tres aperturas con valores fijos de  $w$  ( $2I$ ,  $1.5I$  y  $I$ ) conforme se aumenta el diámetro. Los resultados han sido obtenidos tomando los elementos como emisores puntuales (factor de array), eliminando así el patrón de radiación del elemento, y evaluando el campo en una dirección determinada  $x_f$ . Estas curvas muestran el grado de colaboración de los elementos en la generación de los lóbulos de rejilla. De la figura se deduce que un aumento de la apertura, con el consecuente aumento del número de elementos, supone una reducción del porcentaje de elementos que colaboran en la formación de los lóbulos de rejilla, y por tanto, una disminución del nivel de los mismos. Las curvas muestran una tendencia asintótica que para lados mayores que  $1.5I$  se acerca al 25% de la apertura, mientras que para  $w=I$  ésta disminuye al 15%. El aspecto dentado de las curvas se corresponde con el hecho de que las aperturas estén formadas por un número par o impar de elementos.

La relación de aspecto del elemento ( $R_a=w/e$ ) constituye otro parámetro importante del diseño. Por un lado, interviene en la distancia de campo lejano ( $d/D=1-2/pNR_a$  en Ec. 5) y en consecuencia en el perfil 2D en profundidad del campo acústico. Pero, también interviene en la respuesta lateral en elevación que está determinada fundamentalmente por la respuesta lateral

de los elementos del array [7]. Fijado el valor de  $w$  que determina la posición de los lóbulos de rejilla para una dirección de deflexión dada (Ec. 6), vamos a estudiar la influencia de la anchura e del anillo sobre la respuesta lateral del array.

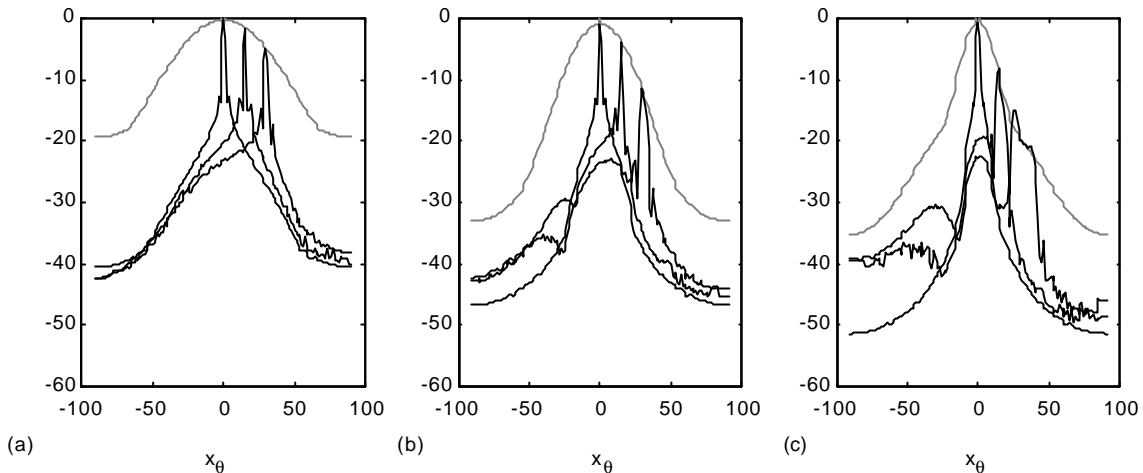


Figura 4. Corte lateral de presión en banda ancha deflectando a  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $30^\circ$ . En gris, la amplitud en el eje de propagación ( $x_r=200\text{mm}$ ) para cada elevación. (a) para  $R_a=1$  ( $e=w=I$ ). (b) para  $R_a=0.5$  ( $e=2w=2\lambda$ ) y (c) para  $R_a=0.25$  ( $e=4w=4I$ ).

En la figura 4 se presentan cortes laterales del campo en distintas direcciones de deflexión, para aperturas con  $R_a=1$ ,  $0.5$  y  $0.25$ . De las gráficas pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La amplitud en el haz principal cae más rápidamente con la deflexión conforme más pequeña es la relación de aspecto, p.e. el corte a  $-6\text{dB}$  corresponde a una deflexión de  $34^\circ$  para  $R_a=1$ ,  $20^\circ$  para  $R_a=0.5$  y  $10^\circ$  para  $R_a=0.25$ .
- La anchura del lóbulo principal aumenta con la deflexión (debido a la reducción de la apertura virtual), y también aumenta cuando  $R_a$  se separa de la unidad.
- Sobre el eje de la apertura aparece un lóbulo que se hace más evidente cuando disminuye la relación de aspecto  $R_a$ .
- La posición de los lóbulos de rejilla depende de  $w$ , por lo que se sitúan desviados alrededor de  $60^\circ$  respecto del lóbulo principal para todas las aperturas consideradas.

Al cambiar la relación de aspecto también cambia la forma del haz en un plano perpendicular al eje de propagación acústica. Este efecto se puede observar en la figura 5, donde se produce una fuerte asimetría cuando la relación de aspecto se aleja de la unidad ( $R_a=0.25$ ). Teniendo en cuenta la forma de los elementos, la apertura se puede dividir en dos regiones: la región 1, donde la mayoría de los elementos orientan su dimensión más estrecha en la dirección de focalización; y la región 2 donde la dirección más estrecha se orienta en la dirección perpendicular al foco. La acción de los elementos de la región 1 tiene un diagrama de radiación relativamente ancho en la dirección del foco, por lo que su contribución al campo en el foco con deflexión es importante; contrariamente los elementos de la zona 2, al tener un patrón de radiación más estrecho influyen en mucho menor grado. Para los puntos de campo con un desplazamiento en la dirección de elevación, los elementos de la zona 1 actúan como sendos arrays lineales con un tamaño de apertura reducida. Cuando el punto de campo se desplaza en la dirección perpendicular a la anterior, los arrays de la zona 1 no pierden su condición de focalización, actuando como dos elementos separados una distancia igual al diámetro medio del anillo. El campo en esa dirección, por tanto, se parece al que forman dos puntos emisores que están separados  $(D+d)/2$ .

Si los elementos tienen una relación de aspecto cercana a la unidad, todos ellos contribuyen de forma equivalente a la formación del campo en todas direcciones, de tal forma que se mantiene la simetría axial en el lóbulo principal (figura 5d).

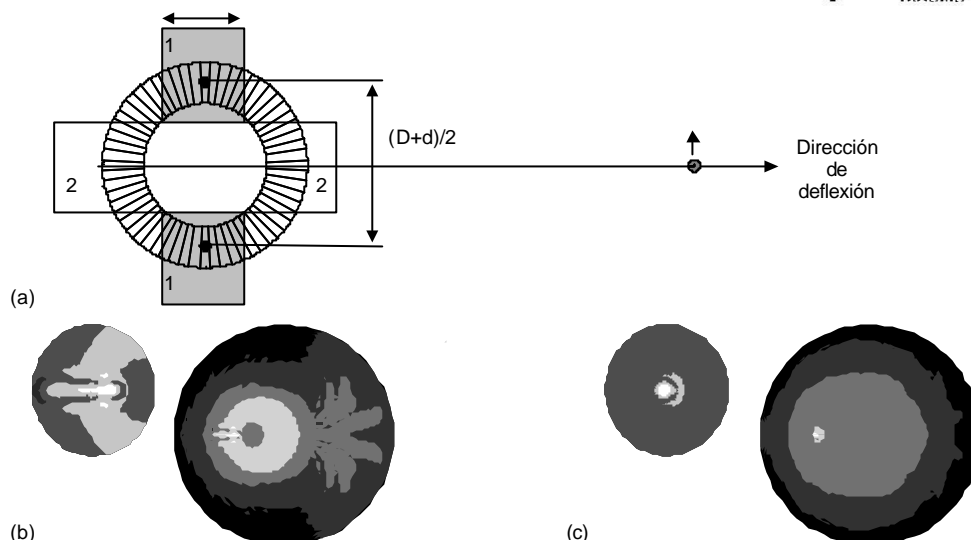


Figura 5. (a) Regiones de focalización en un anillo segmentado con  $R_a < 1$ . (b) Campo de presiones deflectando  $30^\circ$  en elevación y detalle del haz principal con cortes en  $\{-6\text{dB}, -12\text{dB}, -24\text{dB} \text{ y } 32\text{dB}\}$ , para  $R_a = 0.25$ . (c) idem. 5b para  $R_a = 1$ .

## CONCLUSIONES

Como conclusión principal se puede decir que el anillo segmentado puede resultar adecuado para generar imágenes volumétricas. Sobre su diseño deben de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Un anillo produce menores lóbulos de rejilla que un array lineal. La reducción del nivel de dichos lóbulos (para un tamaño de elemento dado) es más importante conforme más grande es el diámetro de la apertura.
- Para un área emisora dada, cuando la relación de aspecto de los elementos del array es cercana a la unidad se producen las condiciones óptimas de campo. Por un lado, existe mayor simetría en el lóbulo principal respecto al eje de propagación y la anchura del haz principal es mínima. Por otro lado, la respuesta del array en elevación focalizando en cada dirección es más alta y el nivel de los lóbulos de rejilla se reduce.
- El estudio del anillo segmentado constituye también una referencia para el estudio de aperturas más complejas compuestas por varios anillos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] D.H. Turnbull, F.S. Foster, *Beam Steering with Pulsed Two-Dimensional Transducer Arrays*. IEEE Trans. on UFFC, 38 (4), 1991 pp.320-333.
- [2] D. Vilkomerson, *Acoustic imaging with Thin Annular Apertures*. Acoustical Holography, vol. 5, Philip Green ed. Pp. 283-316 (Plenum Press, New York, 1974).
- [3] H.P. Schwarz, *Development of divided Ring Array for Three-Dimensional Beam Steering In Ultrasonic Non Destructive Testing*, IEEE Ultrasonic Symposium 1987. pp. 895-861.
- [4] O. Martínez, L.G. Ullate, P. Montero, *Computation of the ultrasonic field radiated by segmented-annular arrays*, Journal of Computational Acoustics. 2000 Pendiente de publicación.
- [5] P.R. Stepanishen, *Transient radiation from pistons in an infinite planar baffle*. JASA 49, 1971 pp. 1629-1638.
- [6] O. Martínez, L.G. Ullate, A. Ibañez, *Comparison of CW beam patterns from segmented annular arrays and squared arrays*. Sensors and Actuators A. 2000 Pendiente de publicación.
- [7] O. Martínez, *Arrays de Anillos Segmentados para la generación de imágenes ultrasónicas en 3D*. Tesis Doctoral 2000. UPM

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por CICYT y la CE (Fondos Feder), proyectos N°: 2FD97-2290 (TIC) y N° TAP99-0945