

LOCALIZACIÓN ACÚSTICA EN APLICACIONES MÉDICAS CON HACES DE PROTONES

PACS: 43.35.Zc

Jorge Enrique Otero Vega, Miguel Ardid Ramírez, Iván Felis Enguix, Juan Antonio Martínez Mora Universidad Politécnica de Valencia C/ Paranimf 1, 46730 Grao de Gandia, Valencia. España Tel: (+34) 963 870 000 Ext. 43681 Fax: (+34) 962 849 309 E-Mail: jorotve@epsg.upv.es

Palabras Clave: Localización, fotoacústica, termoacústica, haz de protones.

ABSTRACT

Over the last years, different acoustic techniques have been using for diagnostic techniques or medical therapies. In this respect, processes associated to the interaction between particles and matter, give way, among others, to temperature fluctuations and mechanical waves in the medium which can be studied through the so-called thermo-acoustic or ion-acoustic effect. This article presents our first simulation and experimental results for acoustic monitoring in hadrontherapy. For this purpose, we present acoustic location results from different sorts of acoustic and thermoacoustic sources (emitting different kinds of signals). Firstly, localization is studied using piezoelectric transducers to detect an acoustic source emitting tone and sweep signals. Secondly, the thermos-acoustic pulse resulting from exciting electrically a graphite bar by discharging a capacitor is studied. Finally, numeric simulation is carried out the thermos-acoustic effect. For the individual case of three proton beams of 20, 80 and 100 MeV, obtaining the resulting acoustic signal in different spatial points. The results of the localization of the acoustic sources present accuracies of the order of a millimetre or less, so approaching to the accuracy needed for hadrontherapy monitoring.

RESUMEN

Durante los últimos años, diferentes técnicas acústicas se han ido abriendo paso, como técnicas de diagnóstico ó terapias médicas. En este sentido, procesos asociados a la interacción de partículas con la materia dan lugar, entre otras, a perturbaciones térmicas y ondas mecánicas en el medio que pueden estudiarse mediante el llamado efecto termoacústico o ionoacústico. En este artículo se presentan los primeros resultados experimentales presentados por el grupo de Acústica Aplicada a la Detección de Astropartículas en monitorización acústica para hadronterapia. Para ello se presentan los resultados de la localización acústica de distintos tipos de fuentes acústicas y termoacústicas (emitiendo distinto tipo de señales), aproximándonos en cada caso a la localización de la energía depositada por un haz de protones en agua. En primer lugar, se trabaja con transductores piezoeléctricos como fuente acústica que emite señales armónicas tipo seno y sweep. En segundo lugar, se estudia el pulso termoacústico resultante de excitar eléctricamente una barra de grafito mediante la descarga de un condensador. Por último, se realizan simulaciones numéricas del efecto termoacústico para el caso concreto de tres haces



de energías de 20, 80 y 100 MeV obteniendo la señal acústica resultante en distintos puntos del espacio. Los resultados de la localizaron de las fuentes acústicas presentan una precisión del orden del milímetro e inferior, cada vez más cerca a la precisión necesaria en monitorización de hadronterapia.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos por los cuales se localiza una fuente, registrando las señales de propagación recibidas en varios sensores y analizándolas de manera pertinente, se conoce como localización de una fuente [1]. La localización de fuentes acústicas se emplea en innumerables aplicaciones, desde la localización de fuentes sonoras en ambientes con elevados niveles de ruido para aplicaciones militares, en acústica ambiental como la localización de diferentes especies animales para el estudio de su comportamiento, en detectores de partículas como por ejemplo la localización de eventos en cámaras de burbujas para la detección de materia oscura, entre otros.

Se parte de la base de la detección de señales en medios homogéneos haciendo uso de transductores acústicos que siguen las leyes de la piezoelectricidad [2]. Los transductores piezoeléctricos pueden ser utilizados de acuerdo a la finalidad del estudio a realizar. Dichos elementos son utilizados en modo activo (emisión) como fuentes generadoras de señales de alta frecuencia para aplicaciones de eco-impulso, haces focalizados de alta potencia, cavitación, imagen, entre otros. Los transductores piezoeléctricos también se pueden emplear en modo pasivo (recepción), que es el caso que ocupa en esta investigación, y serán empleados para el monitorización y captura de señales producidas por diversos eventos como la deposición de energía de un protón en un determinado medio. Existen diferentes métodos para la localización de una fuente. Métodos como el DOA (Direction Of Arrival) [3] que hace la estimación de la posición de la fuente a partir de la información de la fase presente en la señal recibida por los transductores, TDOA (Time Diference Of Arrival) [4] que determina los tiempos de llegada de la señal procedente de una fuente evaluando el retardo en cada combinación entre los sensores. Esta técnica es más práctica debido a la simplicidad del método, sus buenos resultados en entornos reverberantes y con la ventaja adicional de un bajo coste computacional.

2. MÉTODO DE LOCALIZACIÓN

El tiempo de propagación en una dirección de una señal que viaja entre una fuente y un receptor se conoce como tiempo de llegada TOA [5]. Este tiempo es a su vez multiplicado por una velocidad de propagación, proporcionará la distancia entre la fuente y los receptores. Dado que no se tiene una referencia temporal de la fuente, se hace necesario determinar el tiempo de llegada de la señal (TDOA). Para estimar los tiempos de llegada de la señal, se hace uso de técnicas basadas en la correlación cruzada y generalizada (GCC) [6] dado su coste computacional y la precisión de los resultados [7]. Para tener una mejor estimación del TDOA $\hat{\tau}$, conviene filtrar la señal antes de su integración como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Esquema para la obtención de TOA



La correlación cruzada $R_{x_ix_j}$ entre las señales x_i y x_j filtradas por los filtros H_i y H_j , se expresa en función de la densidad espectral de potencia $G_{x_ix_i}$ como:

$$R_{x_i x_j}^{GCC}(t') = \int_{-\infty}^{+\infty} H_i(f) H_j^*(f) G_{x_i x_j}(f) e^{i2\pi f t'} df = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi^{GCC}(f) G_{x_i x_j}(f) e^{i2\pi f t'} df$$
(1)

Donde {.* } indica complejo conjugado y $\varphi^{GCC}(f)$ es una función de peso dependiente de la frecuencia [7]. Dado que las observaciones de las señales son infinitas solo se puede obtener una estimación de $G_{x_ix_j}(f)$, por lo tanto, para estimar el TDOA se hará uso de la siguiente expresión:

$$\hat{R}_{x_{i}x_{i}}^{GCC1}(t') = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi^{GCC}(f) \hat{G}_{x_{i}x_{i}}(f) e^{i2\pi f t'} df$$
(2)

Para cada par de sensores el TDOA se estima como el retardo temporal que maximiza la correlación cruzada entre las señales filtradas de ambos sensores $\hat{\tau}_{ij}^{GCC} = argmax_{t'} \{\hat{R}_{x_ix_j}^{GCC1}(t')\}$. Para obtener la localización de la fuente, se parte conociendo la posición espacial (x_i, y_i, z_i) de un determinado número de sensores N (i = 1, 2, ..., N). Sea $(x_s, y_s, z_s,)$ la posición de la fuente que se desea localizar, la distancia entre la fuente y el sensor i-ésimo será:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2}$$
(3)

Cada una de estas distancias se puede referir a un sensor de referencia, en este caso el sensor 1, de modo que la diferencia de la distancia entre el sensor de referencia y el sensor i vendrá dada por:

$$d_{i1} = d_i - d_1 = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} -\sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2}$$
(4)

La diferencia de distancias d_{i1} es proporcional a la diferencia de tiempos de llegada d_{i1} por la velocidad de propagación del sonido en el medio *c*, definida como: $d_{i1} = c \cdot \tau_{i1}$. Existen distintos métodos para resolver este tipo de sistemas de ecuaciones. El método empleado consiste en testear un conjunto de posiciones en el miembro de la derecha de la ecuación (4) de modo que nos quedamos con aquella que minimice la diferencia entre ambos miembros de la ecuación. En concreto se testean puntos separados 1 mm en cada una de las direcciones X, Y, Z. La estimación por mínimos cuadrado no lineales de la posición de la fuente será:

$$\left(\hat{x}_{s}, \hat{y}_{s}, \hat{z}_{s} = \arg\min_{\hat{x}_{s}, \hat{y}_{s}, \hat{z}_{s}} \sum_{i=2}^{N} \left(d_{i1} - h(x_{s}, y_{s}, z_{s}; x_{i}, y_{i}, z_{i}; x_{1}, y_{1}, z_{1};) \right)^{2} \right)$$
(5)

3. ESTUDIOS Y RESULTADOS

3.1 Simulación acústica

Para comprobar el algoritmo de localización descrito, se simula la reconstrucción de la localización de una fuente tipo pulso gaussiano de 50 us de ancho a mitad de pulso a partir de la recepción de 4 sensores ubicados en la superficie lateral de distintos cilindros de altura l y radio a. En la figura 2 se muestra a manera de ejemplo uno de los modelos simulados, así como las posiciones de tres puntos de fuente y la disposición de los puntos de los sensores. En estas simulaciones la fuente emisora del pulso gaussiano siempre se encuentra a una altura dentro de la posición de los 4 sensores.





Figura 2. Simulación de 4 sensores en una vasija de 6 cm de radio y 24 cm de altura.

	S1	S2	S 3	S4	F1	F2	F3
Х	а	-a	0	0	0	-20	30
Y	0	0	а	-a	0	25	-30
Ζ	l/4	l/4	l/2	l/2	50	60	90
Tabla 1. Ejemplo del modelo geométrico para la simulación de localización y las coordenadas de los sensores y las fuentes							
simuladas. Unidades en mm							

Para comprobar el algoritmo de localización, se han simulado 4 volúmenes del cilindro, modificando la relación de altura y radio. Los resultados de la reconstrucción de la posición real simulada para las 4 posiciones de fuente, se muestran en la tabla 2.

	Posición	Localización estimada [mm]				
	Real [mm]	a/h = 30	a/h = 0.46	a/h = 0.56	a/h = 0.63	
Х	0	-0.8±0.5	0±0.8	-0.3±0.5	0.8±0.5	
Y	0	-0.1±1.0	-0.5±0.6	0±0.8	0.3±1.0	
Z	50	51.2±1.3	49.0±1.4	50.8±1.5	51.2±1.3	
Х	-20	-20.2±0.8	-20.3±1.0	-20.3±1.0	-19.8±0.5	
Y	25	25.7±0.6	24.3±0.5	24.8±0.5	24.8±0.5	
Ζ	60	59.7±1.4	61.5±2.4	59.0±1.4	61.7±2.1	
Х	30	29.7±0.5	30.5±0.6	30.5±0.3	30±2.0	
Y	-30	-28±0.2	-30.2±0.1	-30.5±0.6	-30±2.0	
Z	90	90.5±4.1	92±2.4	91.7±3.2	90±2.0	
Ta	Tabla 2. Localización real y estimada de las tres fuentes simuladas para					

cuatro posiciones de sensores

En la tabla 2 se muestra además la desviación de la posición de la fuente simulada respecto a la posición real de la fuente. Dicha posición reconstruida no supera en 1.2 mm la posición real para todos los casos estudiados. Una vez obtenidos resultados satisfactorios del algoritmo de localización simulando diferentes puntos de fuente en posiciones de sensores conocidas, se ha evaluado de manera experimental el método de localización como se describe a continuación.



3.2 Localización de señales armónicas

Cerámicas piezoeléctrica tipo PIC255 [8], con diferentes geometrías de disco, han sido pegadas sobre una vasija de cristal con pegamento epoxi (CW2400) conductor para facilitar la transmisión de las señales producidas en el interior de la vasija, en la figura 2 se pueden ver las características de la vasija y la posición de los sensores. Para estas medidas se tiene en cuenta el espesor de la vasija y las diferentes capas de adaptación matching layer [9] que influirán sobre el tiempo de llegada de la onda acústica desde el emisor a la cerámica receptora. Dado que la velocidad de propagación del sonido en estos materiales es conocida, se hará una corrección para cada la señal capturada en cada sensor.



Figura 3. Vasija de cristal con la ubicación de los sensores y el transductor receptor (derecha)

En la figura 3 se muestra la configuración para el emisor FFR SX60 [10] con el que se emitieron seis señales tipo sweep con diferentes barridos. El primero de 10 a 250 kHz en intervalos de 25, 50 y 100 μ s, y un segundo barrido de 50 a 250 kHz con intervalos de 25, 50 y 100 μ s utilizando el método de la correlación cruzada para detectar el tiempo de inicio de la señal en los sensores. En la figura 3 se muestra la ubicación espacial del FFR dentro de la vasija tomando como sistema de referencia *X*, *Y* y *Z* el centro de la base de la vasija.





Posición 1 (mm): x=0 y=0 z=190 Figura 3. Ubicación de las dos posiciones del transductor FFR para la emision de las señales bajo estudio



Los resultados obtenidos en la localización de la fuente se muestran en la tabla 2 donde se puede observar la posición real del emisor, así como la posición resultante despúes de aplicar el algoritmo de localización.

	Posición	Localización estimada [mm]					
	real	Sweep de 50 a 250 kHz		Sweep de 10 a 250 kHz			
	[mm]	25 μs	50 μs	100 <i>μs</i>	25 μs	50 μs	100 <i>μs</i>
Х	0.0±5.0	-0.8±0.4	-0.6±0.1	-1.8±0.4	-0.2±0.8	-1.0±0.1	-0.2±0.1
Υ	0.0±5.0	0.2±0.4	-0.2±0.2	-0.3±0.3	1.2±0.2	0.1±0.2	0.2±0.2
Ζ	190.0±2.0	204.8±0.6	196.4±0.2	187.6±0.5	203.8±0.1	193.2±0.2	190.2±0.5
Х	55.0±5.0	58.2±0.8	54.0±0.1	51.2±0.4	57.0±1.8	58.0±4.5	60.0±0.1
Υ	-20.0±5.0	-19.4±0.5	-27.2±0.1	-22.2±0.7	-19.4±0.9	-19.2±3.9	-19.0±0.1
Ζ	200.0±2.0	208.0±1.3	203.0±0.1	202.0±0.5	207.0±1.8	218.0±1.1	218.0±0.1
	Tabla 2. Localización real y estimada de las tres fuentes simuladas para las dos						las dos
	posiciones de sensores						

3.3 Localización de señales impulsivas

Para simular el comportamiento del pico de Bragg [11] a gran escala, se emplea una señal impulsiva de corta duración haciendo uso de la descarga entre los bornes de un condensador de 2.2 mF en el interior de la vasija llena de agua destilada. En la figura 4 se muestra el montaje experimental para una de las posiciones de descarga.



Figura 4. Montaje experimental para la señal impulsiva dentro de la vasija

Debido a que la señal la señal es impulsiva y al no tener una señal de referencia que sea clara en todas las medidas, los tiempos de llegada se han calculado haciendo uso del algoritmo Pvar[12]. En la tabla 3 se muestran los resultados del algoritmo de localización para cada una de las tres posiciones de fuente dentro de la vasija. Se puede observar que la desviación de la posición de la fuente estimada es inferior a 6 mm, sin embargo, se debe tener en cuenta que el diámetro de la circunferencia donde se generaba la chispa es de 3 mm por lo que la posición de descarga para cada medida se encuentra dentro de un área de 7.06 um^2 de manera aleatoria.

	Posición real [mm]	Localización estimada [mm]
Х	0.0±3.0	5.8±0.4
Y	0.0±3.0	5.8±0.2
Z	131.0±3.0	127.7±0.1
Х	0.0±3.0	0.6±1.8
Y	-20.0±3.0	-27.0±0.5
Z	150.0±3.0	152.3±0.2



Х	10.0±3.0	5.0±0.7				
Y	20.0±3.0	19.0±0.2				
Z	40.0±3.0	40.5±0.4				
Tabla 3. Localización real y estimada de las tres						
fuentes impulsivas para 4 sensores						

3.4 Simulación termoacústico

A partir de un modelo termoacústico [13] implementado en Matlab para el comportamiento del pico de Bragg para deposición de diferentes energías de un haz de protones, se crea un modelado en 3 dimensiones para una deposición de energía de 20, 80 y 100 MeV simulando un haz de $2 \cdot 10^6$ protones. En la figura 5 se muestra a manera de ejemplo el volumen donde se recrea el comportamiento del pico de Bragg para una carga de 20 MeV y la posición de cada uno de los 8 sensores.



Figura 5. Derecha. Volumen de simulación con los sensores para la localización de la fuente. izquierda. Volumen de deposición de un haz de protones para una deposición de 20 MeV. Unidades en milímetros.

En la tabla 4 se puede observar los resultados del algoritmo de localización para 3 diferentes deposiciones de energía (20, 80 y 100 MeV). En la columna de posición real no se muestran valores de desviación, pues las posiciones son exactas dentro del algoritmo. Para la localización estimada los valores de desviación corresponden a las diferentes iteraciones de las posiciones reconstruidas que ofrece el algoritmo debido al diferente conjunto de sensores.

	Posición Real [mm]	Localización estimada [mm]	Diferencia [mm]	[MeV]	
Х	0.0	0.0±0.1	0.0±0.1		
Y	0.0	0.0±0.1	0.0±0.1	20	
Z	4.3	2.8±1.5	1.5±1.5		
Х	0.0	0.0±0.2	0.0±0.2		
Y	0.0	0.0±0.2	0.0±0.2	80	
Z	50.8	50.8±0.1	0.0±0.1		
Х	0.0	0.0±0.1	0.0±0.1		
Y	0.0	0.0±0.1	0.0±0.1	100	
Z	75.7	76.2±0.4	0.5±0.4		
Tabla 4. Localización real, estimada y la diferencia de tres fuentes simuladas para 8 sensores					



4. Conclusiones

Con el método de localización descrito, se pueden obtener resultados precisos, por lo que la técnica de localización puede ser empleada para fuentes inferiores al milímetro como método complementario de la localización óptica en aplicaciones médicas.

Las desviaciones presentadas aquí para simulaciones, pueden ser mejoradas si se toman intervalos de tiempo y espacio menores, sin embargo, esto presenta un mayor coste computacional.

5. Referencias

[1] T. Kundu. Acoustic source localization. Ultrasonics 54 (2014) 25-38.

[2] B. Jaffe, W. R. Cook Jr, H. Jaffe. Piezoelectric Ceramics. 1971

[3] J. C. Chen, K. Yao, R. E. Hudson. Acoustic source localization and beamforming theory and practice. EURASIP journal on Applied Signal Processing 2003:4, 359-370. 2003

[4] F. Gustafsson, F. Gummarsson. Position using time difference of arrival measurements. Departament of Electrical Engineering.

[5] Ravindra. S, Jagadeesha. S. Time of arrival based localization in wireless sensor networks: A linear approach. Signal & processing: An international journal (SIPIJ) Vol.4, No.4, August 2013.

[6] C. H. Knapp, G. C. Carter. The generalized correlation method for estimation of time delay. IEEE transactions on acoustics, speech, and signals processing, Vol. ASSP-24, No.-4, August 1976.

[7] I. Felis. Tecnologías acústicas para la detección de materia oscura (Tesis doctoral). Cap. IV.2. Universidad Politécnica de Valencia. 2017

[8] J. Otero. Caracterización y simulación de cerámicas piezoeléctricas (tesis de master). Universidad Politécnica de Valencia. 2015

[9] J. Ferrer. Caracterización de sensores piezoeléctricos y capas de adaptación (matching layer) para detectores de partículas tipo PICO (tesis de master). Universidad Politécnica de Valencia. 2015.

[10] Sensor Technology. SX30 Free Flooded Ring Transducer. Especificaciones técnicas. http://sensortechcanada.com/custom-acoustic-transducers/free-flooded-ring/ultrasonic-free-flooded-ring/

[11] T. Bortfeld. An analytical approximation of the Bragg curve for therapeutic proton beams. Medical Physics 24(12):2024-2033. 1997

[12] A. Juodis. First difference transformation in panel VAR models. Robustness, estimation and inference. Econometric Reviews, DOI:10.1080/07474938.2016.1139559. 2016

[13] M. Ardid, I. Felis. J. Martínez. J. Otero. Acústica aplicada a la detección de haces de partículas para hadronterapia. A presentar en el 48 Congreso español de acústica encuentro ibérico de acústica. 2017