

REVISIÓN DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE RADIACIÓN APLICADOS EN ACÚSTICA SUBMARINA

PACS: 43.40.Rj

Rodrigo-Saura, F. J.¹; Carbajo-San Martín, Jesús²; Poveda-Martínez, Pedro²; Ramis-Soriano, Jaime²

¹Sociedad Anónima de Electrónica Submarina. Carretera de la Algameca, s/n, 30205, Cartagena, Murcia, España. f.rodrigo@electronica-submarina.com

²Universidad de Alicante. Carretera San Vicente del Raspeig, s/n, 03080, San Vicente del Raspeig, España {jcarbajo, pedro.poveda, jramis}@ua.es

Palabras Clave: Eficiencia de radiación; reciprocidad.

ABSTRACT

In this work a review on some of the methods and experimental techniques used to determine the radiation efficiency of plates that are part of the hull of a ship is made. In addition, we study the impact of uncertainty in determining this parameter in the calculation of the acoustic power radiated by the ship.

RESUMEN

En este trabajo se realiza una revisión sobre algunos de los métodos y las técnicas experimentales utilizadas para determinar la eficiencia de radiación de placas que forman parte del casco de un buque. Además, se estudia la repercusión de la incertidumbre en el cálculo de este parámetro en el cálculo de la potencia acústica radiada por el buque.

1. INTRODUCCION Y PLANTEAMIENTO

Los cascos de los barcos son estructuras muy complejas que radian sonido en un amplio rango frecuencial. El cálculo de la vibración y radiación del casco por un método simple es prácticamente imposible. Para afrontar y comprender el problema es necesario dividir el espectro en varios rangos frecuenciales, Si llamamos L a la longitud del barco y R al radio medio del cilindro medio de la parte central del barco [1]:

- Desde 1 Hz hasta longitudes de onda del orden de $L/2$ (muy baja frecuencia), todo el casco del barco está involucrado. Se producen los movimientos de sólido rígido de traslación y vibración, los modos de flexión de viga y los modos acordeón.
- Desde longitudes de onda desde R hasta frecuencias mayores (alta frecuencia), la radiación está originada por terminaciones de rigidizadores, placas más pequeñas, etc.
- Finalmente, desde longitudes de onda de $L/2$ a R , se producen las resonancias importantes, las vibraciones de los compartimentos y modos típicos de una lámina cilíndrica en un baffle cilíndrico a su vez. Esta es la zona en la que estamos interesados en este trabajo.

Un parámetro relevante para abordar el problema de determinar o predecir la potencia radiada por una estructura compleja es el denominado eficiencia de radiación, que se define como la relación entre la potencia acústica radiada de una placa. Matemáticamente:

$$\sigma_{RAD} = \frac{W_{RAD}}{W_{VIB}} = \frac{W_{RAD}}{\rho_0 c_0 A \langle [u]^2 \rangle} \quad (1)$$

$\langle [u]^2 \rangle$ es la velocidad espacialmente promediada y A es el área de la placa.

En este trabajo se realiza una breve revisión de las técnicas y métodos para determinarla. En primer lugar, se llevará a cabo una revisión de los conceptos básicos siguiendo la revisión mencionada.

2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1. Potencia radiada en función de la frecuencia para el modelo de pistón en pantalla infinita.

El modelo más simple para describir la radiación de una superficie es el llamado de pistón plano, que consiste en una superficie circular en la que todos los puntos vibran en fase. La presión radiada por un pistón montado en pantalla infinita se puede expresar en la forma [2].

$$p(r, t) = j \frac{U_{\text{omax}} ck \rho_o}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \frac{2J_1(ka \text{ sen } \theta)}{ka \text{ sen } \theta} \quad (2)$$

$$U_{\text{omax}} = \sqrt{2} U_{\text{ef}}$$

$$U_{\text{ef}} = \pi a^2 u_{\text{ef}}$$

Siendo: U, la fortaleza de la fuente; U_{ef} , es valor eficaz complejo de la velocidad de los puntos de la periferia de la fuente; a, el radio del pistón en metros; ρ_o , la densidad del aire en Kg/m³; c, la velocidad del sonido en el aire en m/s; $J_1(x)$, la función de Bessel de primera especie y orden 1; $K_1(x)$, la función de Kelvin de orden 1.

La expresión para la intensidad de radiación es:

$$I = \frac{|p|^2}{2\rho_o c} = \frac{U_{\text{ef}}^2 ck^2 \rho_o}{4\pi^2 r^2} \left[\frac{2J_1(ka \text{ sen } \theta)}{ka \text{ sen } \theta} \right]^2 \quad (3)$$

La impedancia mecánica de radiación que tiene su origen en la fuerza de reacción del medio viene dada por las expresiones:

$$Z_{MR} = \pi a^2 \rho_o c \left[1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right] + j \frac{\pi \rho_o c}{2k^2} K_1(2ka) = R_{MR} + jX_{MR} \quad (4)$$

Haciendo uso de un desarrollo en serie se puede aproximar en la zona de frecuencias bajas, $ka \ll 1$. Se puede considerar como límite $ka < 0,5$:

$$R_{MR} \cong \frac{\pi a^2 \rho_o ck^2 a^2}{2} = \frac{\pi a^4 \rho_o \omega^2}{2c} \quad (6)$$

$$X_{MR} \cong \frac{8}{3} \rho_o c k a^3 = \frac{8}{3} \rho_o a^3 \omega = M_{MR} \omega \quad (7)$$

R_{MR} es proporcional al cuadrado de la frecuencia y X_{MR} se puede asociar a una masa, M_{MR} , independiente de la frecuencia.

Para frecuencias altas, $ka \gg 1$, se puede llegar a:

$$R_{MR} = \rho_o c \pi a^2 \quad (8)$$

$$X_{MR} = \frac{4\rho_o c a}{2k} = \frac{4\rho_o c^2 a}{2\omega}$$

El valor de X_{MR} se puede observar que tiende a cero si la frecuencia es muy alta. Luego vemos que a estas frecuencias tan sólo predomina R_{MR} que es donde se disipa toda la potencia. La potencia acústica radiada se puede obtener mediante:

$$W_R = R_{MR} u_{ef}^2 = \pi a^2 \rho_o c \left[1 - \frac{2J_1(2ka)}{2ka} \right] u_{ef}^2 \quad (9)$$

que en altas frecuencias toma la expresión:

$$W_R = \pi a^2 \rho_o c u_{ef}^2 \quad (10)$$

y en bajas frecuencias:

$$W_R = \frac{\pi a^4 \rho_o \omega^2}{2c} u_{ef}^2 \quad (11)$$

La eficiencia de radiación se puede escribir en función de la resistencia mecánica de radiación:

$$\sigma_{RAD} = \frac{R_{MR}}{\rho_o c_0 A} \quad (12)$$

2.2. Función de transferencia velocidad/Fuerza.

Si se asume un modelo simplificado de un grado de libertad para el pistón, con una masa m , una rigidez k y una resistencia mecánica b , cuando el pistón está sometido a una fuerza F , en aire o en vacío, la relación entre la citada fuerza y la velocidad que genera viene dada por la ecuación:

$$\frac{u}{F} = \frac{1}{j\omega m + b - j\frac{k}{\omega}} \quad (13)$$

Cuando el pistón carga sobre un fluido pesado, la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{u}{F} = \frac{1}{j(\omega m + X_{MR}) + (b + R_{MR}) - j\frac{k}{\omega}} \quad (14)$$

2.3. Frecuencia de coincidencia.

La frecuencia de las ondas de flexión para la que la velocidad coincide con la velocidad del fluido circundante se denomina frecuencia de coincidencia. A esta frecuencia, la radiación es máxima. Por debajo de esta frecuencia, la carga del fluido es imaginaria (y de tipo inductivo –o tipo más) y por encima se tiene una parte real de la impedancia mecánica de radiación.

$$\omega_c = 2\pi f_c = c_0^2 \frac{\rho_s}{\sqrt{B_p}} = \frac{\sqrt{12}c_0^2}{hc_p} \quad (15)$$

$$k_c = \sqrt{12} \frac{c_0}{c_p h}$$

2.4. Carga de fluido.

Cuando la estructura vibrante carga sobre un fluido pesado se añaden tres efectos:

- Hay una carga “tipo masa” adicional que influye en los movimientos de vibración. El efecto es que cambian las frecuencias naturales y los números de onda.
- Aumenta el amortiguamiento, reduciendo la eficiencia de radiación.
- Aparecen términos de acoplo entre las diferentes particiones lo cual implica que la placa no puede ser considerado un conjunto con el baffle.

Por debajo de la frecuencia de coincidencia, $k_o < k_f$, la relación entre la presión y el desplazamiento de una placa viene dado por [1]:

$$p = \frac{\rho_o \omega^2}{\sqrt{k_f^2 - k_o^2}} w \quad (16)$$

Esto tendrá el efecto de añadir una masa adicional que se puede cuantificar mediante el parámetro ϵ que viene dado por:

$$\epsilon = \frac{\rho_o}{\rho_s \sqrt{k_f^2 - k_o^2}} = \frac{\rho_o}{\rho_p h k_f \sqrt{1 - \left(\frac{k_f}{k_o}\right)^2}} = \frac{\rho_o c_p}{\sqrt{12} \rho_p c_o M_f \sqrt{1 - M_f^2}} \quad (17)$$

3. METODOS DE DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE RADIACIÓN.

De la definición de eficiencia de radiación, se desprende que son necesarias dos tipos de medidas bajo las mismas condiciones de excitación: medidas de potencia acústica y el promediado espacial de la velocidad de vibración. Aunque también es posible medir la fuerza y la movilidad promediada espacialmente. En muchos casos, para la medida de la movilidad de la estructura bajo estudio se utiliza un shaker de tipo electrodinámico provisto con un transductor de fuerza y unos sensores de velocidad o de aceleración en la superficie de la placa. Para realizar las medidas acústicas existen varios métodos directos que permiten obtener la potencia acústica radiada. También se pueden utilizar métodos relacionados con el principio de reciprocidad, en

los que la estructura se excita acústicamente con una fuente sonora externa y se mide la vibración inducida en la estructura.

3.1. Métodos basados en medidas convencionales.

Existen numerosos métodos para determinar la potencia radiada, incluyendo aquellos basados en medidas de presión sonora como el método de campo libre [3], el reverberante [4] o el método de intensidad sonora [5]. Sin embargo, cada uno de estos métodos presenta ciertas limitaciones. Si se utiliza un shaker de tipo electrodinámico, se debe prestar especial atención a la conexión de éste con la estructura, ya que la efectividad de la transmisión de la fuerza aplicada mediante la fuente de excitación decrece conforme aumenta la frecuencia, especialmente cuando se usa un puntero. Este fenómeno se discute en profundidad en [6] y [7]. Del mismo modo, debe vigilarse en todo momento que el ruido generado por el propio shaker no contamine el sonido que se pretende medir. El ruido producido por el excitador es una cuestión especialmente importante en aquellas estructuras con baja radiación sonora. A pesar de que es posible utilizar medidas de intensidad sonora y minimizar este efecto, puede ser necesario aislar la fuente de excitación, por ejemplo, mediante una carcasa. Asimismo, se plantea un problema para ciertas configuraciones experimentales donde resulta difícil acceder para instalar la fuente de ruido.

3.2. Métodos basados en la aplicación del principio de reciprocidad.

Los métodos de reciprocidad presentan menos restricciones que los directos, ya que en ausencia de shaker, la estructura puede situarse en su posición habitual, incluyendo zonas próximas a superficies reflectantes. Asimismo, es mucho más conveniente y fácil de instalar una fuente de ruido que un excitador. Por el contrario, en el método de reciprocidad, la medición de la respuesta de vibración de la estructura debido a la excitación acústica puede estar sujeta a errores. Por ejemplo, estructuras con una respuesta baja requieren sensores con mayor sensibilidad, capaces de medir niveles bajos de vibración con suficiente precisión. Además, debe tenerse cuidado de no cargar la estructura con la masa de los transductores. El transductor no debe ser sensible a la excitación acústica.

La idea de emplear reciprocidad en acústica fue propuesta por Lord Rayleigh [8], quien demostró que la presión sonora producida en un punto A de un fluido por una fuente puntual, omnidireccional y tonal, con cierta velocidad volumétrica, y situada en un punto B del fluido, es la misma que la presión que produciría en B la misma fuente localizada en el punto A. Esta afirmación es válida independientemente de las condiciones de contorno del fluido. El principio de reciprocidad puede aplicarse también al comportamiento estructural, donde la posición de fuerza y respuesta de una estructura pueden intercambiarse.

En [9], los autores realizan una completa revisión de la teoría y aplicación del principio de reciprocidad, incluyendo sistemas mecánico-acústicos del tipo que nos ocupa.

El principio de reciprocidad acústica fue extendido por Lyamshev [10] y [11] al caso del comportamiento vibroacústico de una estructura elástica. El autor demostró la relación entre la presión acústica en un punto B debido a la vibración de una estructura sujeta a una fuerza armónica en un punto A y la situación recíproca, es decir, en ausencia de excitación mecánica, la velocidad de vibración producida en el punto A de la estructura debido a la excitación acústica generada por una fuente puntual situada en el punto B del fluido.

Fahy presentó una revisión del estado del arte en 1997 [12] y más tarde en 2003 [13]. En ellas, por medio de una descripción histórica del principio de reciprocidad en vibroacústica, discutió diferentes aplicaciones. Estos trabajos representan una visión general del principio de reciprocidad en vibroacústica y proporcionan una buena base. Una extensión del método de

reciprocidad que incluye la vibración de estructuras, tal y como demostró Lyamshev, también se discute en [11]. Otras aplicaciones son detalladas por Verheij en [14] y [15].

El principio de reciprocidad empleando una matriz de monopolos fue aplicado por Zheng et al. en [16] para medir la presión sonora radiada por un motor de combustión interna. La superficie del motor se dividió en regiones discretas, demostrando que la presión media al cuadrado en el punto de recepción podía hallarse a partir de la potencia sonora de cada una de las sub-áreas y de la función de transferencia entre la presión superficial del motor y la velocidad volumétrica de una fuente tipo monopolo. Es este trabajo se realizó un muestreo de la intensidad sonora para medir la potencia sonora del motor en funcionamiento. La función de transferencia fue obtenida por el método de reciprocidad entre la fuerza aplicada por una fuente tipo monopolo y la presión sonora medida con un micrófono situado muy cerca del motor apagado.

La reciprocidad de Lyamshev ha sido empleada para la resolución de diferentes problemas en vibroacústica. Un ejemplo claro es el estudio del ruido inducido en el interior del vehículo por el neumático realizado en [17] y [18]. Mason and Fahy [19] propusieron esta técnica para obtener la función de transferencia entre una fuerza puntual actuando en el exterior del fuselaje de un avión y la presión sonora generada dentro de la cabina. La misma técnica fue empleada por MacMartin et al. [20] en un avión real. La comparación con el método directo fue presentada con buenos resultados.

En general, las técnicas de reciprocidad requieren menos recursos y tiempo de ejecución, por lo que resultan convenientes y en ocasiones más precisas que su equivalente en medición directa. Sin embargo, en términos de caracterización de la fuente sonora y medición de la potencia sonora de maquinaria en funcionamiento, los estándares internacionales se centran en las técnicas directas como el método de campo libre [3], el método de cámara reverberante [4] y el método de intensidad sonora [5]. Otra importante técnica de medición directa para obtener el campo de intensidad sonora y por tanto, cuantificar la potencia, es la holografía acústica de campo cercano (Nearfield Acoustic Holography, NAH) [21] y su extensión al sonido radiado en un ambiente cerrado, denominado fonoscopia [22]. Estas técnicas se utilizan en aplicaciones destinadas a localizar fuentes de ruido, proporcionando un alto grado de precisión. Sin embargo, hacen uso de un gran número de sensores, lo que limita en gran medida su uso.

Crocker y Price en [23], muestran como el análisis estadístico de la energía (Statistical Energy Analysis, SEA) puede usarse de forma satisfactoria para determinar las propiedades vibroacústicas de un panel. Los autores llevan a cabo una comparación entre la predicción SEA y las medidas reales llevadas a cabo sobre un panel en cámara reverberante. Del mismo modo realizan medidas con el panel situado entre dos cámaras adyacentes para establecer la resistencia de radiación y las pérdidas por transmisión. Para obtener estos parámetros se adoptaron técnicas de medida directa, mientras que para otros parámetros SEA, como el factor de acople o la densidad modal, se utilizaron técnicas de reciprocidad.

4. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA DE RADIACIÓN

En 1962, Maidanik [24] propuso una fórmula aproximada para la eficiencia de radiación de una placa en pantalla infinita en diferentes regiones. Davies [25] extendió los resultados de Maidanik para el rango frecuencial en que la longitud de onda es comparable con las dimensiones de la placa rectangular. Por otro lado, Wallace en [26] presentó expresiones integrales para la eficiencia de radiación modal de frecuencias arbitrarias, tomando como punto de partida la expresión de la intensidad en campo lejano. Leppington et al. [27] obtuvieron expresiones aproximadas de la eficiencia de radiación modal cerca de la frecuencia crítica. Li en [28] obtuvo una solución analítica para las resistencias de radiación mutuas en forma de series de potencias de una constante de propagación unidimensional, resultando más eficiente que los métodos de integración numérica. En [29,30], Uchida et al, proponen una ecuación para la eficiencia de radiación que es utilizada en [31].

En [32] se lleva a cabo un completo estudio sobre la eficiencia de radiación. En este trabajo para la zona por debajo de la frecuencia crítica se propone:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{4S}{c_0^2} f^2 & f < f_{1,1} \\ \frac{4\pi^2 D}{c_0^2 S m_s} & f_{1,1} < f < f_e \quad f_e = \frac{3c_0}{P} \\ \frac{\rho c_0}{4\pi^2 S f_c} \frac{(1-\alpha^2) \ln \frac{(1+\alpha)}{(1-\alpha)} + 2\alpha}{(1-\alpha^2)^{3/2}} & f_s < f < f_c \quad \alpha = \sqrt{f/f_c} \end{cases} \quad (18)$$

Donde P es el perímetro de la placa, $f_{1,1}$ es la primera frecuencia de resonancia de la placa, f_e es la frecuencia para la que se acaba la región controlada por modos tipos corner y f_c es la frecuencia crítica.

En [33], la eficiencia de radiación media de una placa rectangular sumergida en un fluido y excitada de forma puntual se estudió por medio de dos métodos: análisis determinístico y aproximación estadística. El primero de ellos, el efecto de la impedancia mutua del agua cargando en la velocidad de la placa se ilustró analíticamente por medio de una suma modal. Las contribuciones intermodales a la eficiencia de radiación media de la placa se obtuvieron promediando los resultados para todas las posiciones posibles de excitación. En este mismo trabajo se obtuvo la ecuación (19), válida para placas rectangulares por debajo de la frecuencia crítica:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{4S}{c_0^2} f^2 & f < f_{1,1} \\ \frac{2\pi^2 D}{c_0^2 S m_s + \rho_0/k_p} & f_{1,1} < f < f_e \quad f_e = \frac{3c_0}{P} \\ \frac{\rho c_0}{4\pi^2 S f_c} \frac{(1-\alpha^2) \ln \frac{(1+\alpha)}{(1-\alpha)} + 2\alpha}{(1-\alpha^2)^{3/2}} & f_s < f < f_c \quad \alpha = \sqrt{f/f_c} \end{cases} \quad (19)$$

Donde $k_p^4 = \frac{m_s \omega^2}{D}$.

Por último, en el mismo trabajo se obtuvo la ecuación (20) para cuando la placa está rigidizada mediante un número "T" de barras.

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{1,1}}{i} f^2 & f < f_{1,1} \\ \frac{4S f^2}{m^2 c_0^2} & f_{1,1} < f < f_{1,2} \\ T \frac{1}{4\pi^2 L_x} \frac{2\lambda_c \left[2\alpha + (1-\alpha^2) \ln \frac{(1+\alpha)}{(1-\alpha)} \right]}{(1-\alpha^2)^{3/2}} & f_{1,2} < f < f_c \quad \alpha = \sqrt{f/f_c} \end{cases} \quad (20)$$

En esta expresión, i corresponde al número de modos dominantes que contribuyen a la velocidad cuadrática media por debajo de la primera frecuencia de resonancia y m, al índice de modos en la dirección x.

En la figura 1 se representa la ecuación para el caso de una placa con las siguientes características: $c_0 = 1500$ m/s, $E = 2.1 \times 10^{11}$ Pa, $h = 20 \times 10^{-3}$ m, $L_x = L_y = 1$ m, $\rho_0 = 1000$ kg/m³; $\rho_p = 7800$ kg/m³; $\nu = 0.3$.

Las figuras 2, 3 y 4 muestran un estudio paramétrico de tres zonas antes de la zona de influencia de la frecuencia de coincidencia. En la figura 2 se varía el parámetro “i” que afecta la zona de baja frecuencia. En la figura 3 se repite la operación para la zona de frecuencias medias variando el parámetro “m” que es relevante en esta zona. Por último, en la figura 4 se muestra el efecto de variar el parámetro T.

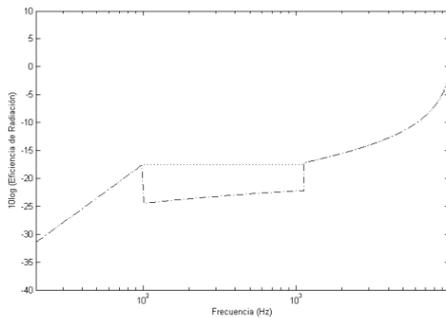


Figura 1. Eficiencia de radiación de una placa.

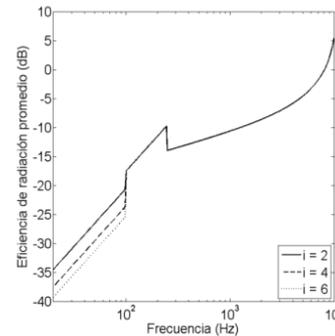


Figura 2. Efecto de la variación del parámetro ‘i’ sobre la eficiencia de radiación promedio.

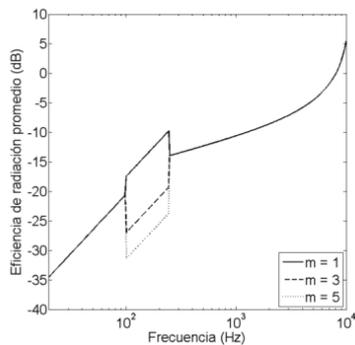


Figura 3. Efecto de la variación del parámetro ‘m’ sobre la eficiencia de radiación promedio.

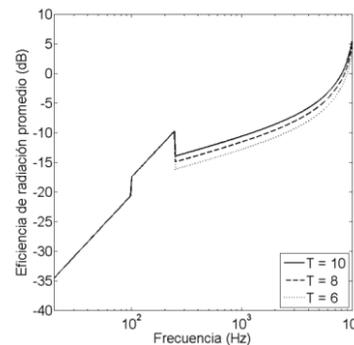


Figura 4. Efecto de la variación del parámetro ‘T’ sobre la eficiencia de radiación promedio.

Asimismo, cabe citar los trabajos de Rumerman [34], Cheng et al [35] y de otros autores que en esta brevísima revisión no se han podido abordar.

5. CONCLUSIÓN

Se ha llevado a cabo una breve revisión de modelos y líneas de trabajo para estudiar la eficiencia de radiación de placas aplicadas en acústica submarina. Estos modelos abren el camino para comparar con medidas experimentales y utilizando técnicas de optimización, conseguir resultados más precisos para determinar la potencia acústica radiada por un buque.

REFERENCIAS

- [1] Ross, D. (1976). Mechanics of underwater noise. New York: Pergamom Press Inc.
- [2] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, Wiley, 1999.
- [3] Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure precision method for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms (ISO 3745:2012), International Standard Organization.

- [4] Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure precision methods for reverberation test rooms (ISO 3741:2010), International Standard Organisation.
- [5] Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Part 3: Precision method for measurement by scanning (ISO 9614-3:2002), International Standard Organisation.
- [6] J. R. Wright, G. W. Skingle, On the direct or indirect measurement of force in vibration testing, in: 15th International Modal Analysis Conference, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1997.
- [7] McConnell, P. Cappa, Transducer inertia and stinger stiffness effect on FRF measurements, Mechanical Systems and Signal Processing 14 (4) (2000) 625–636.
- [8] J. W. Strutt Rayleigh, The Theory of Sound, 2nd Edition, Dover, 1945.
- [9] T. ten Wolde. Reciprocity Measurements in acoustical and mechano-acoustical measurements systems. Review of Theory and applications. NAG/DAGA 2009. Rotterdam
- [10] L. M. Lyamshev, A method for solving the problem of sound radiation by thin elastic shells and plates, Soviet Physics Acoustics 5 (1959), 122–124.
- [11] L. M. Lyamshev, A question in connection with the principle of reciprocity in acoustics, Soviet Physics Doklady 4 (1959) 406.
- [12] F. J. Fahy, The vibro-acoustic reciprocity principle and applications to noise control, Acta Acustica united with Acustica (1995) 544–558.
- [13] F. J. Fahy, Some applications of the reciprocity principle in experimental vibroacoustics, Acoustical Physics 49 (2) (2003) 217–229.
- [14] J. W. Verheij, Inverse and reciprocity methods for machinery noise source characterization and sound path quantification. Part 1: sources, International Journal of Acoustics and Vibration 2 (1997) 11–20.
- [15] J. W. Verheij, Inverse and reciprocity methods for machinery noise source characterization and sound path quantification. Part 2: transmission paths, International Journal of Acoustics and Vibration 2 (1997) 103–112.
- [16] J. Zheng, F. Fahy, D. Anderton, Application of a vibro-acoustic reciprocity technique to the prediction of sound radiated by a motored IC engine, Applied Acoustics 42 (4) (1994) 333–346.
- [17] G. J. Kim, K. R. Holland, N. Lalor, Identification of the airborne component of tyre-induced vehicle interior noise, Applied Acoustics 51 (2) (1997) 141–156.
- [18] B. S. Kim, G. J. Kim, T. K. Lee, The identification of tyre induced vehicle interior noise, Applied Acoustics 68 (1) (2007) 134–156.
- [19] J. M. Mason, F. Fahy, Development of a reciprocity technique for the prediction of propeller noise transmission through aircraft fuselages, Engineering Noise Control Journal 34 (1990) 43–51.
- [20] D. G. MacMartin, G. L. Basso, F. W. Slingerland, Aircraft fuselage noise transmission measurements using a reciprocity technique, Journal of Sound and Vibration 187 (3) (1995) 467–483.
- [21] J. D. Maynard, E. G. Williams, Y. Lee, Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH, The Journal of the Acoustical Society of America 78 (4) (1985) 1395–1413.
- [22] M. Villot, G. Chavérierat, J. Roland, Phonoscopy: An acoustical holography technique for plane structures radiating in enclosed spaces, The Journal of the Acoustical Society of America 91 (1) (1992) 187–195.
- [23] M. J. Crocker, A. J. Price, Sound transmission using statistical energy analysis, Journal of Sound and Vibration 9 (3) (1969) 469–486.
- [24] Maidanik G. Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields. J Acoust Soc Am 1962;34:809–26.
- [25] Davies HG. Sound from turbulent-boundary-layer-excited panels. J Acoust Soc Am 1971;49:878–89.
- [26] Wallace CE. Radiation resistance of a rectangular panel. J Acoust Soc Am 1972;51:946–52.
- [27] Leppington FG, Broadbent EG, Heron KH. The acoustic radiation efficiency of rectangular panels. Proc Roy Soc Lond A 1982;382:245–71.

- [28] Li WL. An analytical solution for the self- and mutual radiation resistances of a rectangular plate. *J Sound Vib* 2001;245:1–16
- [29] Uchida, S., Yamanaka, Y., Ikeuchi, K., Hattori, K. and Nakamachi, K., 1986, Prediction of Underwater Noise Radiated from Ship's Hull, *Bulletin of the Society of Naval Architectures of Japan*, No. 686, pp. 36-45
- [30] Han, H. S. and Lee, L. H., 2013, Estimation of the Underwater Radiated Noise of a Naval Vessel Using Hull Vibration, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 394-400.
- [31] Hyung-Suk Han, Kyung-Hyun Lee. Specification of the hull vibration to control underwater radiated noise by estimation with modified experimental sound radiation efficiency. *Journal of Mechanical Science and Technology*. September 2014, Volume 28, Issue 9, pp 3425–3432.
- [32] Xie G, Thompson DJ, Jones CJC. The radiation efficiency of baffled plates and strips. *J Sound Vib* 2005;280:181–209.
- [33] Z. Cheng, J. Fan, B. Wang and W. Tang, Radiation efficiency of submerged rectangular plates, *Applied Acoustics*, Vol. 73, 150-157, 2012
- [34] Rumerman, M.L. (2001). The effect of fluid loading on radiation efficiency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, volume 111, number 1, p. 75-79
- [35] Cheng Z, et al. *Sci China Tech Sci* November (2012) Vol.55 No.11