

Antenas Leaky-Waves Acústicas Moduladas

María Campo-Valera^(1,2), Alejandro Fernández-Garrido⁽²⁾, José Luis Gómez-Tornero⁽¹⁾

maria.campo@upct.es, alejandrofg@uma.es, josel.gomez@upct.es

⁽¹⁾ Dpto. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 España.

⁽²⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga, 29010 España.

Abstract- This paper shows for the first time the ability of Acoustic Leaky-Wave antennas (ALWAs) to modulate the phase and the leakage rate of the constituent leaky mode. This feature is crucial to synthesize shaped acoustic beams, which can be scanned in the angular space by just sweeping the operational frequency. We provide examples of directive acoustic beams with reduced sidelobes level, sectorized broad beam patterns, and near-field focused acoustic spots. These types of acoustic beams can be used to improve the performance of novel and low-cost SONAR designs, based on ALWAs.

I. INTRODUCCIÓN

Las antenas leaky-wave (“leaky-wave antenna”, LWAs) existen desde la década de 1940 [1] y han sido ampliamente estudiadas y utilizadas en diversas aplicaciones radioeléctricas como el RADAR [2-4]. Su principal característica frente a otros tipos de antenas es que las LWAs permiten sintetizar de una forma sencilla diagramas de radiación con haces directivos que barren el espacio angular simplemente cambiando la frecuencia de operación. A diferencia de antenas con reflectores parabólicos o agrupaciones de antenas tipo “phased-array”, las LWAs se basan en la propagación de ondas de fuga a lo largo de guías de onda abiertas, que iluminan longitudes amplias mediante un alimentador único y sencillo, reduciendo así la complejidad y los costes de alimentadores voluminosos o de múltiples elementos. Por otro lado, tal y como se ha comentado, los haces radiados pueden ser escaneados sin necesidad de circuitos de control activos costosos, conmutadores, o motores. Estas características han hecho que recientemente se estén aplicando las LWAs como antenas inteligentes de bajo coste en el contexto de redes inalámbricas, para aplicaciones como la localización de móviles y sensores en el “Internet de las Cosas” [5-10].

Por otro lado, el concepto de las LWAs ha sido llevado del dominio electromagnético al dominio acústico muy recientemente, pudiendo encontrar algunas publicaciones de LWAs Acústicas (ALWAs) desde el año 2013 [11-18]. De nuevo el interés en las ALWAs respecto de otro tipo de radiadores acústicos radica en el hecho de que, usando un único transductor se puede alimentar una guía de onda acústica de tipo leaky-wave para emitir haces directivos que escanean el espacio simplemente cambiando la frecuencia de la señal acústica. Al igual que pasaba con el RADAR basado en LWAs, este tipo de ALWAs pueden ser usados para SONAR de bajo coste comparados con los diseños convencionales que requieren de multitud de transductores controlados electrónicamente usando técnicas de phased-array o barrido de fase [19].

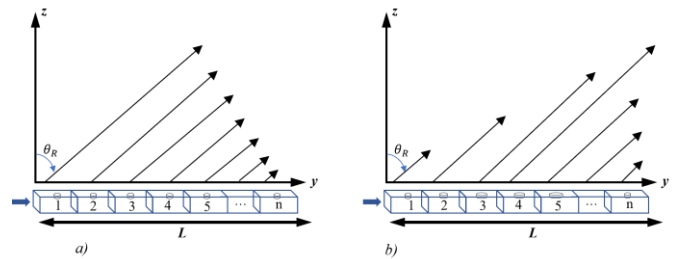


Fig. 1. Esquema de una LWA con longitud L radiando en el ángulo θ_R , compuesta por n celdas unitarias (a) LWA no modulada, (b) LWA modulada.

Como es bien conocido en el campo de las LWAs electromagnéticas [1], [20-22], éstas deben ser moduladas geoméricamente para controlar la distribución de amplitud y fase de la onda radiada a lo largo de la apertura de la antena, y así sintetizar diagramas de radiación con especificaciones que no se consiguen con LWAs no moduladas. Como ejemplo ilustrativo, la Fig. 1a muestra una LWA de longitud L compuesta por n celdas unitarias que radian al espacio superior a través de perforaciones circulares (slots) practicadas en la guía de onda. Esta LWA es alimentada desde el extremo izquierdo, de forma que la onda de fuga se propaga hacia la derecha (eje y), produciendo radiación continua a lo largo de la apertura con un ángulo de apuntamiento θ_R en el plano ZY . Al ser una LWA no modulada, la Fig. 1a ilustra mediante la longitud de los vectores de Poynting como la intensidad decrece exponencialmente conforme avanza la onda de fuga. Como se mostrará posteriormente en el apartado de resultados, este tipo de radiación produce una fuerte difracción en los extremos de la antena, que se traduce en un nivel de lóbulos secundarios respecto del haz principal (*SLL, Side Lobe Level*) típicamente de -13 dB (ver la Fig. 2a). Por el contrario, si se modula adecuadamente el tamaño de los slots a lo largo de la LWA, se puede controlar localmente la intensidad de la radiación sin afectar al ángulo de apuntamiento que debe ser coherente, tal y como se muestra en la Fig. 1b. Este tipo de modulación permite crear una distribución de potencia radiada que disminuye la difracción en los bordes y mantiene una distribución de fase coherente, dando lugar a diagramas de radiación directivos y escaneados en el ángulo deseado θ_R , y con menor nivel de lóbulos secundarios tal y como se representa en la Fig. 2b. Dependiendo del tipo de LWAs, diferentes tipos de modulaciones pueden ser llevadas a cabo [23-33]. En cualquier caso, el objetivo es siempre el mismo: controlar de forma independiente la constante de fase y la tasa de radiación del modo de fuga para así controlar la síntesis de diagramas específicos.

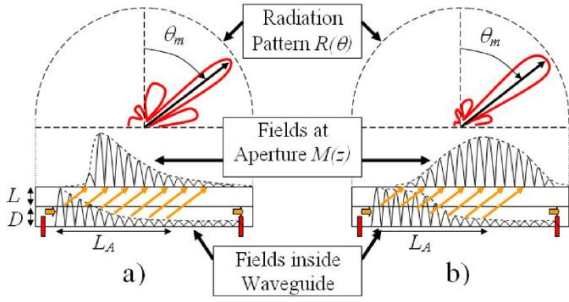


Fig. 2. Campos propagados, radiados en la apertura y diagramas de radiación para una (a) LWA no modulada (b) LWA modulada. Ref [26]

Este artículo aborda de forma descriptiva cómo aplicar las técnicas de modulación de antenas LWAs al dominio acústico. Si bien algunos trabajos previos han adelantado la necesidad de diseños de ALWAs moduladas (también denominadas ALWAs “*tapered*”) [14], este es el primer trabajo que propone diagramas de radiación con especificaciones más concretas tanto en campo cercano como en campo lejano. Así mismo se comenta la aplicación de este tipo de patrones de radiación acústica para SONAR avanzados y de bajo coste.

II. TEORÍA

Las LW se pueden definir como una guía de onda abierta de longitud \$L\$ que propaga un modo leaky (fuga). El concepto fundamental de una antena leaky, es que se basa en la radiación producida por un modo leaky que es un modo de propagación que como cualquier modo tiene una constante de propagación. Sin embargo, sufre pérdidas de radiación conforme se propaga, por lo tanto, esta constante de propagación es compleja, es decir, tiene una parte real que es \$\beta\$ (rad/m) llamada *constante de fase* y una parte imaginaria correspondiente a la *constante de atenuación* \$\alpha\$ (Nep/m) que indica cuanto se atenúa la onda conforme se propaga debido a las pérdidas por radiación:

$$k = \beta - j\alpha \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

El patrón de radiación de una LWA no modulada es un haz directivo cuyo ángulo de escaneo medido desde la dirección perpendicular \$\theta_R\$, ancho de haz a 3 dB de potencia \$\Delta\theta\$ y eficiencia de radiación \$\eta_R\$, se pueden expresar como:

$$\theta_R = \text{asin} \frac{\beta}{k_0} \quad (2)$$

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{L/\lambda_0 \cos \theta_R} \quad (3)$$

$$\eta_R = 1 - e^{-4\pi \frac{\alpha L}{k_0 \lambda_0}} \quad (4)$$

donde \$k_0\$ es el número de onda en el medio que rodea la antena, y \$\lambda_0\$ es su longitud de onda asociada. Las ecuaciones (2)-(4) están descritas a partir de las constantes de propagación y la longitud de la LWA normalizadas, \$\frac{\beta}{k_0}\$, \$\frac{\alpha}{k_0}\$ y \$\frac{L}{\lambda_0}\$. Cabe resaltar una característica importante de las LWA y es que, dado que la constante de fase del modo leaky (fuga) es dispersiva con la frecuencia \$\beta = \beta(f)\$, el ángulo de escaneo resultante también depende de la frecuencia, es decir, \$\theta_R = \theta_R(f)\$ [1], [21], [22]. En consecuencia, las LWA proporcionan intrínsecamente un barrido en frecuencia de un haz directivo. Por otro lado la tasa de radiación permitirá controlar la eficiencia de radiación (3) para una longitud de antena dada que proporcione un haz suficientemente directivo (2).

III. ANTENAS LEAKY-WAVE NO MODULADAS Y MODULADAS

En una LWA no modulada, la constante de propagación \$k\$ no varía a lo largo de la longitud de la antena, y por lo tanto \$\beta\$ y \$\alpha\$ son constantes. Esto se traduce en una iluminación de los campos radiados en la apertura con intensidad exponencial decreciente y fase lineal, lo cual genera un frente de onda plano como se refleja en la distribución de vectores de Poynting emergente de la apertura en la Fig.3. Estas LWA no moduladas, producen diagramas de radiación directivos ya que toda la longitud de la antena está radiando hacia el mismo ángulo \$\theta_R\$. Por otro lado, como la intensidad de la iluminación es exponencial, el diagrama de radiación presenta un SLL típicamente de -13 dB respecto del principal [1], [20], tal y como se muestra en la Fig. 3a. Si bien el haz es tanto más estrecho conforme la antena es más larga según (3), el nivel de lóbulos secundarios es independiente de esta longitud.

Para disminuir el SLL de la antena por debajo de -13 dB, se puede disminuir la difracción en los bordes de la LWA aplicando una función de distribución de los campos radiados en la apertura que mantengan la coherencia de enfoque en el ángulo deseado \$\theta_R\$ (es decir sin variar la distribución de fase lineal anterior), pero con una intensidad de tipo gaussiano o coseno, tal y como se muestra en la Fig.3b. Como se observa en el diagrama de radiación en campo lejano de su derecha, la LWA sigue apuntando en el mismo ángulo (\$\theta_R=30^\circ\$ en el ejemplo), pero con un SLL por debajo de -20 dB. Para conseguir este tipo de campos en la apertura, hay que mantener por tanto \$\beta\$ constante para que \$\theta_R\$ sea coherente (constante) en toda la apertura, pero variando la tasa de radiación \$\alpha\$ para controlar localmente el nivel de iluminación (haciendo que este sea más intenso en el centro de la antena que en los bordes) y así disminuir la difracción y por tanto el SLL.

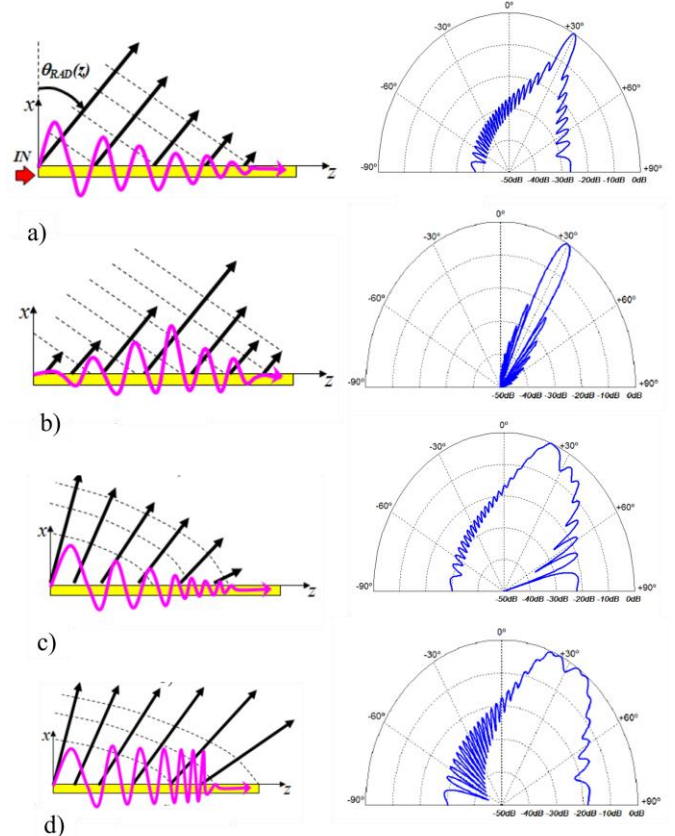


Fig. 3. a) LWA no modulada. LWAs moduladas b) Reducción del SLL c) Filtros espacial no ecualizado d) Filtro espacial ecualizado. Ref [27]

Otro ejemplo de modulación de la LWA lo mostramos en la Fig.3c, en el que esta vez lo que se varía localmente es el ángulo de radiación equivalente $\theta_R(y)$ a lo largo de la longitud de la antena. Tal y como se muestra, ahora este ángulo es variado de forma creciente, por ejemplo desde $\theta_R=20^\circ$ al principio de la antena hasta $\theta_R=40^\circ$ al final, generando un diagrama de radiación de tipo filtro espacial con un haz ancho que cubre esta región angular y con una abrupta disminución de la radiación fuera [30]. Obviamente esta distribución angular divergente se consigue variando $\beta(y)$ en consonancia a lo largo de la antena según (2). Por otro lado, si la tasa de radiación α es constante, la distribución de amplitud de los vectores de Poynting divergentes resultantes será de tipo exponencial decreciente, tal y como se ilustra en la Fig.3c. Como consecuencia, la radiación de la primera sección de la antena será más intensa que la última, y por tanto el diagrama de radiación de la Fig.3c no está ecualizado, sino que la zona de 20° tiene más intensidad que la de 40° .

Para ecualizar este diagrama de forma que toda la región angular desde 20° hasta 40° tenga un nivel de radiación similar, además de modular $\beta(y)$ -y por tanto $\theta_R(y)$ -, hay que modular la tasa de radiación $\alpha(y)$, de forma que todas las secciones de la antena contribuyan con la misma intensidad. Este tipo de modulación se ilustra en la Fig.3d, en la que ahora todos los vectores de Poynting emergentes de la apertura, además de producir un desenfoque de sus respectivos ángulo de radiación de tipo divergente, presentan la misma amplitud. Como resultado, el diagrama de radiación de la Fig.3d, presenta una respuesta de tipo filtro angular con la banda de radiación ecualizada desde 20° hasta 40° , y un alto rechazo fuera de banda. Este tipo de diagramas se usa para iluminación sectorizada con alta selectividad espacial.

IV. ANTENAS LEAKY-WAVE ACÚSTICAS (ALWA)

Si se aplican los conocimientos anteriores en el diseño de las ALWAs se puede obtener una mejora en el rendimiento de los sistemas de localización angular acústicos para SONAR submarinos [15]. Estudios previos de los autores [18] incluyendo otros tales como, [11-12], [17] proponen un modelado con un método FEM en un análisis dependiente de la frecuencia. La Fig. 4 ilustra un esquema axisimétrico del modelo de la ALWA propuesta y una sección transversal de la celda unidad, que muestra los elementos simulados. Para controlar la radiación de este tipo de ALWAs, se proponen las técnicas de modulación geométrica ilustradas en la Fig. 5.

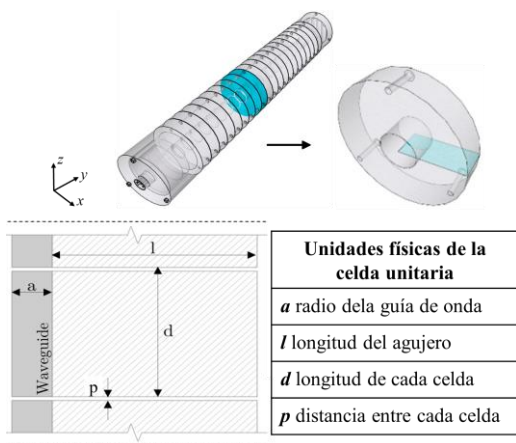


Fig. 4. Geometría de la ALWA axisimétrica simulada, con detalle de la celda unidad y el nombre de las unidades físicas utilizadas en este estudio.

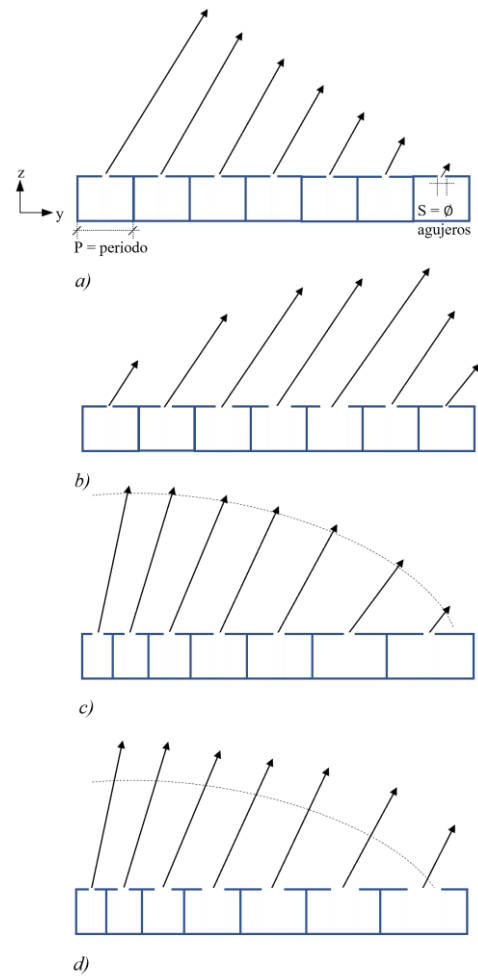


Fig. 5. Geometría de ALWA. a) No modulada, b, c y d) ALWA modulada.

La Fig. 5b, presenta una separación P equidistante entre cada celda unitaria y una variación del diámetro S de los agujeros de las celdas de menor a mayor hasta la mitad de la antena y posteriormente una disminución de cada agujero de las celdas. Con este diseño se obtiene una ALWA modulada semejante a los campos radiados de la Fig. 3b. Por el contrario, en la Fig. 5c se tiene que el diámetro S de todos los agujeros de la antena son iguales, pero cambia la distancia P entre las celdas unitarias de menor a mayor. Con esto, se obtienen los campos radiados como los de la Fig. 3c. Por último, la Fig. 5d muestra que tanto los agujeros de cada celda unitaria como las distancias entre ellas van aumentando, obteniendo los campos radiados como los de la Fig. 3d. La Tabla I resume cómo la tasa de radiación α y la constante de fase β , se controlan respectivamente, mediante la variación del diámetro de los agujeros radiantes S , y mediante la modulación de la periodicidad o distancia entre celdas unidad P . Obviamente hay que aplicar técnicas de síntesis de antenas LWA moduladas como las descritas en [23]-[31], para conseguir variar la constante de fase $\beta(y)$ la tasa de radiación $\alpha(y)$ del modo leaky de la forma deseada.

TABLA I
VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE LAS ALWAS

Variación de parámetros geométricos	Variación de parámetros acústicos
$S \uparrow$ $P \uparrow$	$\alpha \uparrow$ $\theta_R \uparrow$
$S \downarrow$ $P \downarrow$	$\alpha \downarrow$ $\theta_R \downarrow$

V. CONCLUSIONES

Los diseños de antenas de ondas de fuga son nuevas en el campo de la acústica y aún queda mucho por avanzar en este ámbito. En este trabajo se ha propuesto la modulación de los slots radiantes y de la periodicidad de la celda unidad de antenas leaky acústicas, para controlar los diagramas de radiación de forma no convencional. En trabajos futuros se pretenden conseguir diseños reales, así como su validación experimental con prototipos fabricados, para su potencial aplicación en el campo de la acústica submarina y la ingeniería de sonido.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el proyecto nacional PID2019-103982RB-C42/AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

- [1] A.A. Oliner, "Leaky-Wave Antennas", in *Antenna Engineering Handbook*, R. C. Johnson, Ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1984, ch. 10.
- [2] S. Yang and H. Ling, "Application of a microstrip leaky wave antenna for range-azimuth tracking of humans," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10, no. 6, pp. 1384-1388, Nov. 2013
- [3] K. Murano et al., "Low-profile terahertz radar based on broadband leaky-wave beam steering," *IEEE Trans. on Terahertz Science and Techn.*, vol. 7, no. 1, pp. 60-69, Jan. 2017.
- [4] D. A. Schneider, M. Rösch, A. Tessmann and T. Zwick, "A Low-Loss W-Band Frequency-Scanning Antenna for Wideband Multichannel Radar Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 4, pp. 806-810, Apr. 2019.
- [5] J.L. Gómez-Tornero, "Smart leaky-wave antennas for iridescent IoT wireless networks," Ch.4 in *Antenna and Array Technologies for Future Wireless Ecosystems*, Y.J. Guo and R. W. Ziolkowski (editors), Ed. John Wiley & Sons. IEEE press, 2022.
- [6] M. Poveda-García, J. Oliva-Sánchez, R. Sánchez-Iborra, D. Cañete-Rebenaque, J.L. Gómez-Tornero, "Dynamic wireless power transfer for cost-effective wireless sensor networks using frequency-scanned beaming," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8081-8094, Jan. 2019.
- [7] M. Poveda-García, et al., "RSSI-based direction-of-departure estimation in Bluetooth Low Energy using an array of frequency-steered leaky-wave antennas," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 9380-9394, Jan. 2020.
- [8] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, and J.L. Gómez-Tornero, "Wi-Fi direction finding with frequency-scanned antenna and channel-hopping scheme," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 5210-5222, March 15, 2022.
- [9] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gómez-Tornero, "Frequency-scanned monopulse antenna for RSSI-based direction finding of UHF RFID tags," *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 21, no.1, pp. 158-162, Jan 2022.
- [10] A. Gil-Martínez et al. "Direction finding of RFID tags in UHF band using a passive beam-scanning leaky-wave antenna", *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, in press 2022, 10.1109/JRFID.2022.3180285.
- [11] C.J. Naify, C. Layman, T.P. Martin, M. Nicholas, D.C. Calvo, G.J. Orris, "Experimental realization of a variable index transmission line metamaterial as an acoustic leaky-wave antenna," *Appl. Phys. Lett.* 102, 20, 2013.
- [12] S.H.S. Esfahlani, S. Karkar, H. Lissek, "Optimization of an acoustic leaky-wave antenna based on acoustic metamaterial," *In Proceedings of the Acoustics*, New Delhi, India, 10-15 November 2013.
- [13] C.J. Naify, J.S Rogers, M.D. Guild, C.A Rohde, G.J. Orris, "Evaluation of the resolution of a metamaterial acoustic leaky wave antenna," *J. Acoust. Soc. Am.* 139, 3251, 2016.
- [14] C.J. Naify, K. Woolfe, C.N. Layman, J.S. Rogers, M.D. Guild, G. Orris, "Designing beampatterns with tapered leaky wave antennas," *J. Acoust. Soc. Am.* 141, 3374, 2017.
- [15] C. A., Rohde, M.D. Guild, and C.J. Naify, "Miniature Acoustic Leaky-Wave Antenna for Ultrasonic Imaging," US Patent Application 15/246,798, filed March 2, 2017.
- [16] E. Romero-Vivas, J. Romero-Vivas, O. Bustamante, B. León-López, "Educational Open Source Kit for the Evaluation of Acoustic Leaky Wave Antennas with Metamaterials," *25 Congreso Internacional Mexicano de Acústica*, La Trinidad, Tlaxcala, México, November 2019.
- [17] O.A. Bustamante-Palacios, E. Romero-Vivas, R. Velasco-Segura, B. León-López, "evaluación experimental de una antena acústica tipo guía de onda ranurada en simetrías axial y plana", *25 Congreso Internacional Mexicano de Acústica*, La Trinidad, Tlaxcala, México, November 2019.
- [18] I. Felis-Enguix, J. Otero-Vega, M. Campo-Valera, I. Villó-Pérez and J.L. Gómez-Tornero, "Practical Aspects of Acoustic Leaky-Wave Antennas Applied to Underwater Direction Finding", *In Engineering Proceedings (Vol. 2, No. 1, p. 93) of ECSA 7th*, 2020.
- [19] Michael P. Hayes and Peter T. Gough, "Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current Status", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 34, No. 3, July 2009.
- [20] C.C. Balanis, *Antenna Theory*. New York: Wiley 1982.
- [21] A. A. Oliner, and D.R. Jackson, *Leaky-wave antennas* in J. L. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*. McGraw-Hill, New York. 2007.
- [22] D.R. Jackson, C. Caloz, T. Itoh, "Leaky-Wave Antennas," *Proc. IEEE* 100, 2194-2206, 2012.
- [23] J.L. Gómez, A. de la Torre, D. Cañete, M. Gugliemi and A.A. Melcón, "Design of tapered leaky-wave antennas in hybrid waveguide-planar technology for millimeter waveband applications", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.53, no.8, pp.2563-2577, Aug. 2005.
- [24] J. L. Gómez, D. Cañete and A. Álvarez-Melcón, "Printed-circuit leaky-wave antenna with pointing and illumination flexibility", *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol.15, no.8, pp.536-538, Aug. 2005.
- [25] J.L. Gómez, J. Pascual and A.A. Melcón, "A novel full-wave CAD for the design of tapered leaky-wave antennas in hybrid waveguide printed-circuit technology", *Int. Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, vol.16, no.4, pp.297-308, Jul. 2006.
- [26] J.L. Gomez-Tornero, et al. "Control of leaky-mode propagation and radiation properties in hybrid dielectric-waveguide printed-circuit technology: Experimental results," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.54, no.11, pp.3383-3390, Nov. 2006.
- [27] J.L. Gómez-Tornero, A.R. Weily, and Y. Jay Guo, "Non-standard tapering of leaky-wave antennas in hybrid technology," *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2010.
- [28] J.L. Gómez-Tornero, "Unusual tapering of leaky-wave radiators and their applications," in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Rome, Italy, 11-15 Apr. 2011.
- [29] J.L. Gómez-Tornero, F. Quesada-Pereira, A. Alvarez-Melcón, G. Goussetis, A. R. Weily, and Y. Jay Guo, "Frequency Steerable Two Dimensional Focusing using Rectilinear Leaky-Wave Lenses," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.59, No.2, pp. 407-415, Feb. 2011.
- [30] J.L. Gómez Tornero, A.R. Weily, and Y. Jay Guo, "Rectilinear leaky-wave antennas with broad beam patterns using hybrid printed-circuit waveguide designs," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.59, no.11, pp. 3999 - 4007, Nov. 2011.
- [31] J.L. Gómez Tornero, "Analysis and Design of Conformal Tapered Leaky Wave Antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett.*, vol.10, pp. 1068 - 1071, October 2011.
- [32] M. García-Vigueras, J.L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, A. R. Wiley, and Y. Jay Guo, "Efficient synthesis of 1D Fabry-Perot antennas with low sidelobe levels," *IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett.*, vol.11, pp. 869 - 872, August 2012.
- [33] A.J. Martínez-Ros, J.L. Gómez-Tornero, and G. Goussetis, "Holographic pattern synthesis with modulated substrate integrated waveguide line-source leaky-wave antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.61, no.7, pp.3466-3474, Jul. 2013.