

Aplicación de Trazado de Rayos en Antenas Leaky-Wave Combinadas con Lentes Dieléctricas

Miguel Poveda García⁽¹⁾, Francisco Mesa⁽²⁾, Jose L. Gómez-Tornero⁽¹⁾,
Astrid Algaba-Brazález⁽³⁾, Oscar Quevedo-Teruel⁽⁴⁾

miguel.poveda@upct.es, mesa@us.es, josel.gomez@upct.es, astrid.algaba.brazalez@ericsson.com, oscarqt@kth.se

⁽¹⁾ Departamento de Tecnologías de Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, España

⁽²⁾ Departamento de Física Aplicada 1, Universidad de Sevilla, 41012 Sevilla, España

⁽³⁾ Ericsson Research, Ericsson AB, 417 56 Gotemburgo, Suecia

⁽⁴⁾ Division of Electromagnetic Engineering and Fusion Science, KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia

Resumen—The application of ray-tracing for the efficient analysis of curved leaky-wave antennas combined with shaped dielectric lenses is presented in this work. Thanks to the ray-tracing technique, based on geometrical optics, the phase and amplitude of the fields at the lens aperture is obtained with low computational load. This computation also takes into account the reflections due to the change of media between the lens and the air. With this, the far-field radiation pattern is accurately and efficiently calculated using Kirchhoff's scalar diffraction theory. The results are validated against full-wave simulations, achieving a significant time reduction above 99 %.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas de nueva generación (6G) operarán en una gran variedad de usos, servicios y aplicaciones innovadores, como el Internet de las Cosas (IoT), Internet de los Sentidos y comunicaciones holográficas [1]. En estas situaciones, se espera que haya conectividad sin restricciones a pesar del esperado incremento del número de dispositivos y usuarios conectados. Esto conlleva un crecimiento exponencial del tráfico de datos que requiere un mayor ancho de banda y, por tanto, la transición a frecuencias más altas [2]. El desarrollo del 6G también trae consigo importantes dificultades en el diseño de antenas, que deben ceñirse a especificaciones muy exigentes dependiendo de la aplicación [3].

Los arrays de antenas planas se han convertido en el estándar debido a sus buenas características y gran flexibilidad para reconfigurar el diagrama de radiación, su bajo perfil y facilidad de fabricación [4]. Sin embargo, los arrays tienen ciertas desventajas como un alto consumo de potencia y/o pérdidas de escaneo. En trabajos previos se ha demostrado que la combinación de lentes dieléctricas optimizadas con arrays planos convencionales puede mejorar algunas características de radiación [5] como el rango angular, modificar el diagrama de radiación dependiendo de la aplicación [6] o incluso mejorar la eficiencia energética del sistema de comunicación [7].

Una prometedora alternativa a los arrays son las llamadas antenas de onda de fuga (AOF) o “leaky-wave antennas”. Entre las ventajas de este tipo de antenas podemos destacar que son alimentadas por una red de alimentación sencilla, lo que reduce notablemente su consumo energético y complejidad de fabricación. Recientemente se ha propuesto la combinación de lentes con AOFs con el fin de reducir su comportamiento dispersivo para su uso en comunicaciones punto a punto [8]–[11]. Otras aplicaciones potenciales de esta combinación son: reducción de las pérdidas de escaneo [12], filtrado angular

mejorado [13], corrección del diagrama de radiación de AOF conformadas [14] y enfoque en campo cercano [15].

El diseño y optimización de las lentes es un proceso computacionalmente intensivo si se usan simuladores de onda completa. Una alternativa es la aplicación de técnicas de trazado de rayos para acelerar el análisis del diagrama de radiación en campo lejano. Estas técnicas han demostrado una reducción significativa del tiempo de simulación, obteniendo resultados suficientemente precisos. Esto se ha demostrado para la optimización de lentes geodésicas [16], [17] o bocinas geodésicas en plano H [18]. En este trabajo presentamos la aplicabilidad de técnicas de trazado de rayos para analizar AOFs curvas combinadas con lentes dieléctricas también curvas. Esto permite la optimización eficiente de la forma de la lente para las potenciales aplicaciones anteriormente mencionadas, pero también puede ser beneficioso para el diseño eficiente de fuentes tipo leaky-wave [19]–[24].

El resto de este trabajo se organiza de la siguiente forma: las consideraciones necesarias para aplicar el trazado de rayos al análisis de AOF con lentes se presenta en la Sección II, un ejemplo de aplicación se muestra en la Sección III para demostrar la validez de la técnica. Finalmente, las conclusiones de este trabajo se presentan en la Sección IV

II. TRAZADO DE RAYOS APLICADO AL ANÁLISIS DE AOF CON LENTES

La técnica de trazado de rayos ha sido usada en trabajos previos para la optimización de estructuras geodésicas [16]–[18]. En estos trabajos, se consideraba una fuente puntual de la que los rayos emergen en todas las direcciones [Fig. 1(a)]. Sin embargo, las AOFs sintetizan una fuente lineal en la que los rayos emergentes tienen una dirección definida [Fig. 1(b)]. En otros trabajos se ha aplicado el trazado de rayos para el análisis de arrays, en los que la dirección de los rayos depende de la diferencia de fase entre elementos radiantes contiguos [6], [25]. Esto permite el análisis rápido del diagrama de radiación de los arrays cuando se cubren con un radomo dieléctrico, mostrando muy buena precisión en los resultados. No obstante, todos estos trabajos están limitados a arrays planos.

Las AOFs ofrecen una gran flexibilidad para adaptarse a superficies curvas y así aprovechar mejor el espacio [14]. De este modo se añade un grado de libertad adicional a la forma que la fuente radiante puede tomar. En este escenario,

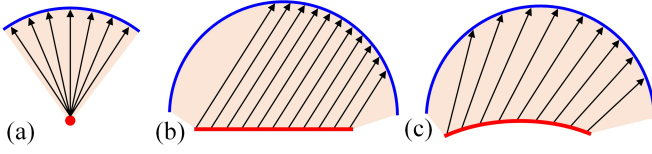


Fig. 1. Modelo de trazado de rayos en diferentes escenarios. En rojo, la fuente de la que emergen los rayos. En azul, el contorno de la lente que representa la apertura. (a) Fuente puntual. (b) Fuente en línea recta. (c) Fuente en línea curva.

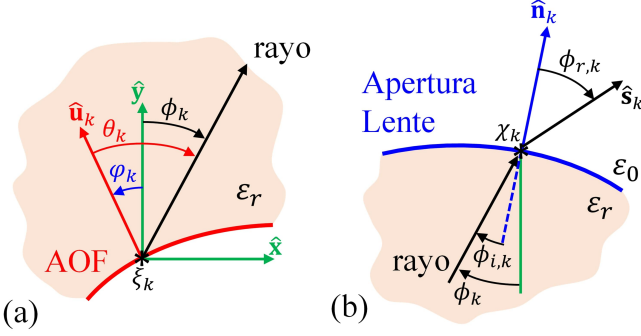


Fig. 2. Resumen de los parámetros geométricos asociados a la trayectoria del rayo. (a) Inicio del rayo desde la posición ξ_k sobre la apertura de la AOF. (b) Incidencia y refracción del rayo en el punto χ_k sobre la apertura de la lente dieléctrica.

proponemos el uso del trazado de rayos para el análisis del diagrama de radiación de AOFs curvadas combinadas con lentes [Fig. 1(c)]. El uso del trazado de rayos en este escenario se puede dividir en tres pasos: (A) obtención de la trayectoria de los rayos, (B) cálculo de la amplitud de los rayos y (C) cómputo del diagrama de radiación en campo lejano.

A. Trayectoria de los Rayos

La dirección de los rayos en una AOF con respecto a la perpendicular, definida por θ_R en la Fig. 2(a), se puede determinar con la parte real del número de onda del modo de fuga complejo $k = \beta - j\alpha$ (β y α son, respectivamente, la constante de fase y atenuación del modo) de la siguiente forma:

$$\theta_R = \sin^{-1} \frac{\beta}{k_d} \quad (1)$$

donde k_d es el número de onda en el medio en el que radia la AOF. Este enfoque de rayos también se ha usado en trabajos previos con AOFs moduladas [26], [27].

Para trazar los rayos, primero tenemos que definir su posición inicial y la dirección. Como se representa en Fig. 2(a), tenemos que considerar el vector unitario local $\hat{\mathbf{u}}_k$, normal a la apertura de la AOF en la posición $\xi_k = \{x_k, y_k\}$. La dirección del rayo con respecto al eje y viene dada por ϕ_k [ver Fig. 2(a)] y será definida a través del ángulo de radiación de la onda leaky θ_k más el ángulo φ_k que $\hat{\mathbf{u}}_k$ forma con $\hat{\mathbf{y}}$ [$\varphi_k = \cos^{-1}(\hat{\mathbf{u}}_k \cdot \hat{\mathbf{y}})$]; esto es,

$$\phi_k = \theta_k + \varphi_k. \quad (2)$$

Una vez se tiene la posición inicial ξ_k y la dirección del rayo ϕ_k , se puede encontrar el punto de intersección χ_k entre el rayo y la apertura de la lente [Fig. 2(b)]. En este punto el rayo incide con un ángulo $\phi_{i,k}$ con respecto al vector unitario

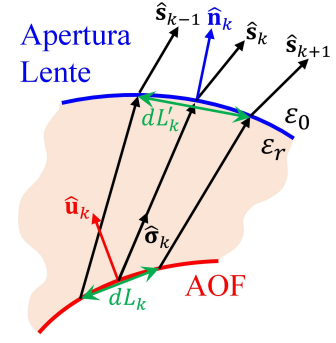


Fig. 3. Representación de la k -th ray tube with the variables required for the amplitude evaluation.

normal a la apertura $\hat{\mathbf{n}}_k$. Este ángulo es diferente a la dirección global ϕ_k ya que la apertura puede tener inclinación con respecto a $\hat{\mathbf{y}}$. En la apertura, el rayo se refractará siguiendo la ley de Snell-Descartes [28]:

$$\sin(\phi_{r,k}) = \sqrt{\epsilon_r} \sin(\phi_{i,k}). \quad (3)$$

Así, podemos determinar el vector unitario en la dirección del rayo en el espacio libre, $\hat{\mathbf{s}}_k$, como se representa en Fig. 2(b).

B. Amplitud de los Rayos

Para evaluar la amplitud de cada rayo usaremos la conservación de la potencia en el tubo del rayo siguiendo el procedimiento usado en [16]. La Fig. 3 representa el tubo del rayo k , definido por los rayos contiguos $k-1$ y $k+1$. Primero definimos la amplitud del rayo en la AOF, A_k , que depende de la tasa de atenuación del modo leaky α . En una AOF modulada, el modo leaky puede variar: $k(\xi) = \beta(\xi) - j\alpha(\xi)$. Así, la amplitud A_k queda definida como

$$A(\xi) = \sqrt{\alpha_{\text{rad}}(\xi)} e^{-\int_0^\xi \alpha(\xi') d\xi'} \quad (4)$$

donde $\alpha_{\text{rad}}(\xi)$ es la parte de α debida a radiación, mientras que la tasa de atenuación total α , incluye otros efectos como pérdidas dieléctricas o en el conductor [29].

La aplicación de la conservación de potencia en el tubo nos dará la amplitud del rayo k en la apertura de la lente A'_k en función de la amplitud en la AOF A_k :

$$A'_k = A_k \sqrt{\frac{dL_k(\hat{\boldsymbol{\sigma}}_k \cdot \hat{\mathbf{u}}_k)}{dL'_k(\hat{\mathbf{s}}_k \cdot \hat{\mathbf{n}}_k)}}, \quad (5)$$

donde dL_k es la anchura del tubo del rayo en la fuente y dL'_k en la apertura de la lente. Las anchuras dL_k y dL'_k se multiplican por $\hat{\boldsymbol{\sigma}}_k \cdot \hat{\mathbf{u}}_k$ y $\hat{\mathbf{s}}_k \cdot \hat{\mathbf{n}}_k$, respectivamente para considerar que la dirección del rayo k puede ser diferente a la de la AOF y la de la apertura de la lente.

Finalmente, tenemos que aplicar el coeficiente de transmisión de Fresnel para considerar el cambio del medio dieléctrico a espacio libre:

$$T_k = \frac{2 \cos \phi_{i,k}}{\cos \phi_{i,k} + \sqrt{1/\epsilon_r} \cos \phi_{r,k}}. \quad (6)$$

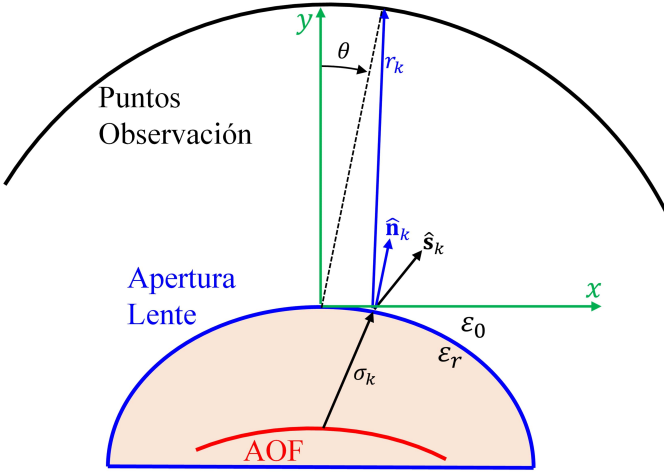


Fig. 4. Esquema del escenario del cómputo del diagrama de radiación en campo lejano.

C. Diagrama de Radiación en Campo Lejano

Para obtener el diagrama de radiación en campo lejano aplicamos la teoría de difracción escalar de Kirchhoff, que en nuestro caso particular toma la siguiente forma:

$$E(\theta) = \sum_k A'_k \frac{e^{-j(\int_0^{\xi_k} \beta(\xi') d\xi' + k_d \sigma_k + k_0 r_k)}}{r_k} \times [\hat{\mathbf{n}}_k \cdot \hat{\mathbf{s}}_k + \hat{\mathbf{n}}_k \cdot \hat{\mathbf{r}}_k] T_k dL'_k \quad (7)$$

donde σ_k es la longitud del rayo dentro de la lente, r_k la distancia entre el punto de intersección χ_k y el punto de observación, k_d es el número de onda en la lente y k_0 el número de onda en el aire [Fig. 4]. Hay que resaltar que la fase de cada rayo en la AOF depende de $\beta(\xi)$.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para validar la técnica y mostrar su aplicabilidad, mostramos a continuación un ejemplo de una AOF curvada combinada con una lente también curvada, optimizada para corregir los frentes de ondas divergentes producidos por la curvatura de la AOF. En este ejemplo, la estructura consiste en una guía de placas paralelas (GPP) 2-D, que actúa como lente, rellena de un sustrato con constante dieléctrica $\epsilon_r = 2,2$, tangente de pérdidas $\tan \delta = 0,0009$ (como la del RO5880 de Rogers, de uso extendido) y grosor $h = 1,5$ mm. La frecuencia de trabajo es $f = 15$ GHz. Por otro lado, la AOF consiste en una guía de onda integrada en sustrato (SIW), contenida dentro de la GPP, con los postes en uno de sus lados separados para permitir la radiación directamente dentro de la GPP [19], [20]. La AOF usada propaga un modo de fuga con número de onda $k/k_d = 0,53 - j0,0082$, que corresponde a un ángulo de radiación $\theta_R \approx 32^\circ$ según (1). El valor de $\alpha/k_d = 0,0082$ se ha elegido para obtener una eficiencia de “spillover” del 90 % (solo el 10 % de la potencia llega al final de la AOF) con una longitud de $L_A = 30$ cm (alrededor de $22\lambda_g$).

En este ejemplo, la AOF tiene una curvatura con radio $R_{\text{AOF}} = 50\lambda_g = 67,4$ cm. La forma de la lente también es un arco con un radio de $R_L = 30$ cm, que ha sido optimizado, gracias a la técnica de análisis eficiente presentada, para corregir la divergencia de los rayos debido a la curvatura de la

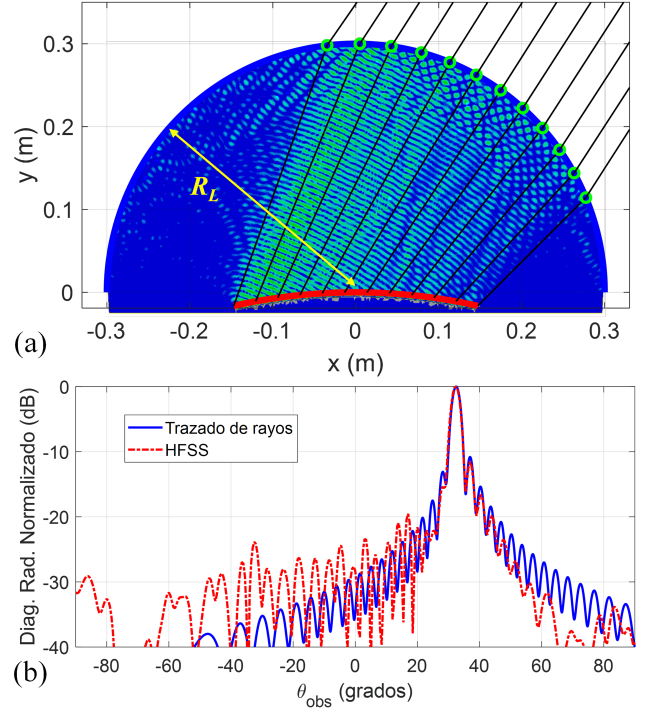


Fig. 5. AOF curvada con longitud $L_A = 30$ cm y radio $R_{\text{AOF}} = 50\lambda_g$ y lente curvada con radio $R_L = 30$ cm. (a) Modelo CAD con los campos simulados dentro de la lente junto con los rayos obtenidos mediante la técnica de trazado de rayos. (b) Diagrama de radiación normalizado obtenido mediante técnica de trazado de rayos y simulación de onda completa.

AOF, como se muestra en la Fig. 5(a). En esta figura se representa el campo eléctrico dentro de la GPP, obtenido mediante simulación en HFSS. Por otro lado, los rayos obtenidos con la técnica propuesta también se muestran superpuestos al campo eléctrico, evidenciando que estos rayos son perpendiculares a los frentes de onda. Como se puede observar, dentro de la lente los rayos son divergentes y al incidir en la apertura (en azul) los rayos se refractan, quedando paralelos fuera de la lente. Como consecuencia, el diagrama de radiación obtenido, mostrado en Fig. 5(b) es directivo, con un ángulo de radiación de $\phi \approx 32,5^\circ$. El rizado obtenido en la simulación con HFSS se atribuye a las reflexiones de la onda incidente en la apertura de la lente, además de cierta potencia reflejada al final de la AOF. Aunque estos efectos no se han incorporado al presente modelo de trazado de rayos, los resultados de diagrama de radiación obtenidos con la técnica de trazado de rayos se ajustan bastante bien a los obtenidos con simulación de onda completa en el rango ≥ -20 dB, con una reducción del tiempo de cómputo del 99.6 %, de $t_{\text{FW}} = 259$ s a $t_{\text{RT}} = 1$ s.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha aplicado la técnica de trazado de rayos al análisis de antenas de onda de fuga (AOF) combinadas con lentes dieléctricas en un escenario de guía de placas paralelas. La técnica ofrece la posibilidad de analizar estructuras donde tanto la AOF como la lente tienen formas curvadas. Este modelado nos permite obtener un cómputo eficiente del diagrama de radiación, reduciendo significativamente el tiempo necesario en simulaciones de onda completa en más de un 99 %. El procedimiento presentado se ha validado con un ejemplo

consistente en una AOF curvada y una lente que corrige los frentes de onda divergentes producidos, observando buen acuerdo entre los resultados obtenidos con simulación de onda completa y con la técnica de trazado de rayos. Dada una AOF de geometría arbitraria, la técnica propuesta podría aplicarse por ejemplo para optimizar la forma de la lente dependiendo de los requisitos del diagrama de radiación.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Miguel Poveda García y José Luis Gómez Tornero ha sido parcialmente financiado por el proyecto TED2021-129196B-C42 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR. El trabajo de Miguel Poveda García también ha sido parcialmente financiado por una Short-Term Scientific Mission (STSM) de la COST Action SyMat (CA18223), apoyada por el COST (European Cooperation in Science and Technology) y parcialmente por el programa postdoctoral Margarita Salas-Ministerio de Universidades de España a través de fondos NextGenerationEU de la Unión Europea. El trabajo de Miguel Poveda García y Francisco Mesa ha sido parcialmente financiado por el proyecto PID2020-116739GB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

- [1] G. Wikström *et al.*, “6G – connecting a cyber-physical world.” [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/a-research-outlook-towards-6g>. Ericsson AB, White Paper, Feb. 2022.
- [2] E. Semaan, E. Tejedor, R. Kumar-Kochhar, S. Magnusson, and S. Parkvall, “6G spectrum - enabling the future mobile life beyond 2030.” [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/6g-spectrum-enabling-the-future-mobile-life-beyond-2030>. Ericsson AB, White Paper, Mar. 2023.
- [3] I. Andersson, L. Manholm, A. Algaba-Brazález, and P. Aghdam, “Antenna system requirements and challenges towards 6G – an industrial view,” in *2023 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2023.
- [4] T. Chaloun *et al.*, “Electronically steerable antennas for future heterogeneous communication networks: review and perspectives,” *IEEE J. Microw.*, 2022.
- [5] A. Algaba-Brazález, P. Castillo-Tapia, C. Viganó, and O. Quevedo-Teruel, “Lenses combined with array antennas for the next generation of terrestrial and satellite communication systems,” *IEEE Commun. Mag.*, in press.
- [6] A. Algaba-Brazález *et al.*, “Flexible 6G antenna systems based on innovative lenses combined with array antennas,” in *17th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, pp. 1–5, 2023.
- [7] H. Wang, P. Castillo-Tapia, L. Manholm, M. Johansson, O. Quevedo-Teruel, and A. Algaba-Brazález, “6G energy-efficient systems based on arrays combined with dielectric lenses,” *Electronic Lett.*, vol. 59, no. 17, p. e12932, 2023.
- [8] L. Wang, J. L. Gómez-Tornero, and O. Quevedo-Teruel, “Substrate integrated waveguide leaky-wave antenna with wide bandwidth via prism coupling,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 66, no. 6, pp. 3110–3118, 2018.
- [9] J. Chen, W. Yuan, C. Zhang, W. X. Tang, L. Wang, Q. Cheng, and T. J. Cui, “Wideband leaky-wave antennas loaded with gradient metasurface for fixed-beam radiations with customized tilting angles,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 1, pp. 161–170, 2020.
- [10] O. Zetterstrom, E. Pucci, P. Padilla, L. Wang, and O. Quevedo-Teruel, “Low-dispersive leaky-wave antennas for mmwave point-to-point high-throughput communications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1322–1331, 2020.
- [11] A. Neto, S. Bruni, G. Gerini, and M. Sabbadini, “The leaky lens: A broad-band fixed-beam leaky-wave antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 10, pp. 3240–3246, 2005.
- [12] D. K. Karmokar, S.-L. Chen, T. S. Bird, and Y. J. Guo, “Single-layer multi-via loaded CRLH leaky-wave antennas for wide-angle beam scanning with consistent gain,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 313–317, 2019.
- [13] A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero, and G. Goussetis, “Multifunctional angular bandpass filter SIW leaky-wave antenna,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 936–939, 2017.
- [14] A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero, and G. Goussetis, “Conformal tapered substrate integrated waveguide leaky-wave antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 12, pp. 5983–5991, 2014.
- [15] K. K. Mutai and Q. Chen, “Compact leaky wave fed frequency-scanning gradient index lens antenna for near-field-focusing applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 3, pp. 2314–2322, 2024.
- [16] Q. Liao *et al.*, “Ray-tracing model for generalized geodesic multiple beam lens antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 3, pp. 2640–2651, 2023.
- [17] P. Castillo-Tapia, J. Rico-Fernández, S. Clendinning, F. Mesa, and O. Quevedo-Teruel, “Evaluation of losses in 3D-printed geodesic lenses using a ray-tracing model,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 1, pp. 234–242, 2024.
- [18] M. Chen, F. Mesa, and O. Quevedo-Teruel, “Geodesic H-plane horn antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 8, pp. 6329–6339, 2023.
- [19] J. L. Gómez-Tornero, A. J. Martínez-Ros, S. Mercader-Pellicer, and G. Goussetis, “Simple broadband quasi-optical spatial multiplexer in substrate integrated technology,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 63, no. 5, pp. 1609–1620, 2015.
- [20] V. Gómez-Guillamón Buendía *et al.*, “Compact leaky SIW feeder offering TEM parallel plate waveguide launching,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 13373–13382, 2019.
- [21] M. Al Sharkawy, A. Foroozesh, A. A. Kishk, and R. Paknys, “A robust horn ridge gap waveguide launcher for metal strip grating leaky wave antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 12, pp. 6019–6026, 2014.
- [22] L. Wang and G. Goussetis, “Leaky wave fed substrate integrated horn antenna,” in *2020 13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT)*, pp. 1–3, 2020.
- [23] Y. Pan, T. Ao, and Y. Dong, “Fully planar single/fixed-beam ultrawideband leaky-wave antenna based on leaky grounded coplanar waveguide,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 22, no. 3, pp. 606–610, 2023.
- [24] D. Zheng *et al.*, “Planar leaky-wave antenna featuring wideband fixed-beam radiation and tailorable directional angle for millimeter-wave applications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 4, pp. 3238–3250, 2023.
- [25] A. Benini, E. Martini, S. Monni, M. C. Viganò, F. Silvestri, E. Gandini, G. Gerini, G. Toso, and S. Maci, “Phase-gradient meta-dome for increasing grating-lobe-free scan range in phased arrays,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 8, pp. 3973–3982, 2018.
- [26] P. Burghignoli, F. Frezza, A. Galli, and G. Schettini, “Synthesis of broad-beam patterns through leaky-wave antennas with rectilinear geometry,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 2, pp. 136–139, 2003.
- [27] J. L. Gomez-Tornero, A. R. Weily, and Y. J. Guo, “Rectilinear leaky-wave antennas with broad beam patterns using hybrid printed-circuit waveguides,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 11, pp. 3999–4007, 2011.
- [28] M. Born, E. Wolf, *et al.*, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press, 7 ed., 1999.
- [29] M. Poveda-García, J. L. Gómez-Tornero, and D. Cañete-Rebenaque, “Study of the efficiency of half-width substrate integrated waveguide leaky-wave antennas in FR4,” in *2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC)*, pp. 1–4, 2018.