

Explorando la prestaciones y ventajas de la Half-Groove Gap Waveguide

Miguel Ferrando-Rocher

Abstract—En este texto se explora una guía de onda de medio modo basada en la tecnología Gap Waveguide (GW) para la creación rápida de prototipos. Se han diseñado y medido dos dispositivos con fines demostrativos: un divisor de potencia y una guía de onda curvada. Ambos dispositivos están construidos a partir de dos piezas metálicas sin contacto. Ambos dispositivos siguen también el mismo proceso de diseño. En la pieza inferior se aloja una Half-Groove Gap Waveguide (HM-GGW). La altura de la HM-GGW es aproximadamente la mitad de la necesaria para propagar el modo fundamental. La cubierta superior es una superficie uniforme con pines que actúa como superficie de alta impedancia (HIS) sobre la HM-GGW inferior. Tanto el divisor de potencia como la guía de ondas curvada muestran coeficiente de reflexión medidos inferiores a -15 dB en el ancho de banda de interés (28 a 31 GHz), con una excelente concordancia con los resultados simulados. Estos dispositivos destacan por su facilidad de fabricación y abren un horizonte para diseños de GW más baratos y robustos para la producción en masa.

Keywords—Groove gap waveguide, Half mode Waveguide, millimeter-wave devices. rapid prototyping,

I. INTRODUCTION

Existe una gran demanda de antenas y dispositivos en las bandas Ku y Ka para los sistemas de satélite de alto rendimiento (HTS) y las nuevas constelaciones de satélites LEO. En este contexto, a menudo se requieren dispositivos de pequeñas dimensiones y bajas pérdidas en frecuencias de ondas milimétricas. En la búsqueda de nuevas soluciones que favorezcan una mayor facilidad de integración, escalabilidad y robustez de estos dispositivos, se explora la posibilidad de disponer de guías de onda más estrechas, ajustadas al medio modo TE_{10} de la guía de onda rectangular. Esta nueva guía de onda es completamente equivalente a la guía de onda completa convencional. Consiste simplemente en sustituir la media guía de onda por una superficie de alta impedancia (HIS) que se comporta como un plano conductor magnético perfecto (PMC). La superficie HIS se crea con un metal conductor perfecto y un conjunto de pines de aproximadamente un cuarto de longitud de onda de altura, conocido como tecnología Gap Waveguide (GW). La GW ha demostrado ser una técnica adecuada en la banda milimétrica para ensamblar todo tipo de dispositivos [1]-[12], desde filtros o transiciones hasta antenas multibanda.

Normalmente, en GW el surco que forma la guía de ondas está embebida en la cama de pines, todos en la misma pieza, como se ve en el esquema de la izquierda de la Fig 1. Por lo tanto, cualquier doblez, curva o transición en la ranura afectará a los pines, haciéndolos más estrechos, más finos o más frágiles. Otra opción es reconfigurar la periodicidad de los pines, o su anchura para evitar estos problemas de fabricación,

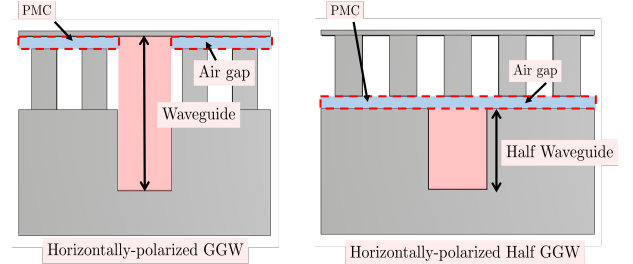


Fig. 1: Diferentes topologías en GGW. En la figura izquierda, la GGW convencional. En la figura derecha la nueva HM-GGW propuesta en este trabajo.

pero estos reajustes no son inmediatos y sólo son válidos para soluciones particulares. La alternativa que proponemos en este trabajo es mecanizar la guía de ondas y el HIS, creado a partir de la cama de pines, en piezas separadas. Así se aprovecha la ventaja clave de GW de no requerir el contacto metálico entre las piezas. La ventaja de este enfoque es que la complejidad del mecanizado se simplifica con respecto a las piezas en las que las redes de alimentación, las cavidades, las curvas o las transiciones se alojan junto a los pines. Con esta propuesta, la fabricación de las piezas se relaja mucho ya que por un lado basta con hacer un simple surco en una placa metálica y por otro lado, la pieza HIS puede ser estándar y reutilizada en otros circuitos.

En el pasado se presentaron interesantes trabajos teóricos que abordaban esta configuración de medio modo [24], [25], pero hasta la fecha, al menos según el conocimiento de estos autores, aún no se han estudiado sus posibilidades reales en dispositivos GW fabricados. En este trabajo demostramos la viabilidad del concepto mediante un divisor de potencia 1 a 2 de banda estrecha y una guía de onda curva. En las secciones II, III y IV se presentan algunos criterios de diseño, resultados experimentales y conclusiones, respectivamente.

II. CRITERIOS DE DISEÑO

A. Dispersión en la guía con un semi-modo TE_{10}

En esta sección se detallan las pautas para trabajar con HM-GGW. En primer lugar, se analiza el diagrama de dispersión de una HM-GGW. Para el diseño de la guía de ondas se utilizan los siguientes datos: frecuencia central (f_0) de 30 GHz y frecuencia de corte (f_c) de 22 GHz, que está suficientemente alejada de la banda de frecuencia de diseño. Con estos criterios se calcula la altura del pin, que debe estar en torno a $\lambda/4$ a la frecuencia de trabajo, es decir, 2.5 mm, aunque es un parámetro que puede ser ligeramente sintonizable. En el

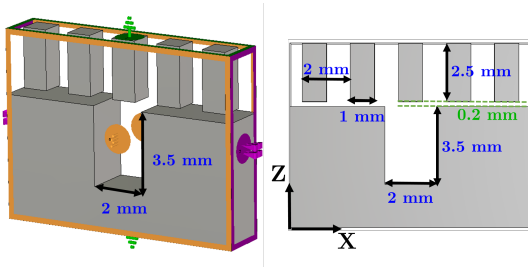


Fig. 2: Sección transversal de la guía de ondas y condiciones de contorno definidas para calcular el diagrama de dispersión. El contorno rosa indica aire (eje X); amarillo, condiciones periódicas (eje Y); verde, una pared eléctrica (eje Z).

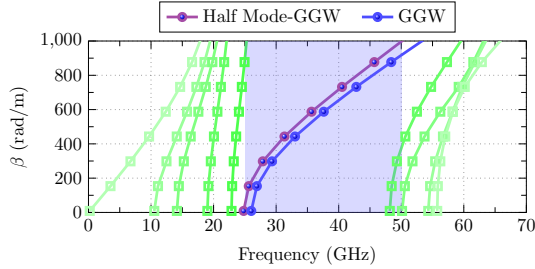


Fig. 3: Diagrama de dispersión de la guía de ondas de medio modo HM-GGW comparada con la GGW convencional.

pasado se han abordado amplios estudios sobre la influencia de la altura de los pines [26], [27].

La altura completa de la guía de ondas se calcula a partir de la frecuencia de corte elegida, resultando 7 mm. Como se ve en la Fig. 1, el HM-GGW utiliza sólo la mitad de esa altura, en este caso 3.5 mm. Una vez obtenidas las dimensiones del HM-GGW, hay que diseñar la pared magnética que se colocará sobre él. Esta pared se sintetiza utilizando los habituales pines de sección cuadrada empleados en la tecnología GW.

A continuación, se define el aire entre los pines y la parte inferior que contiene la media guía de ondas. Suele oscilar entre $\lambda/20$ y $\lambda/50$. Los espacios de aire más grandes son válidos y se pueden utilizar sin riesgo de fugas de campo siempre que sean menores que $\lambda/4$. Con estas dimensiones finales (Fig. 2), se obtiene el diagrama de dispersión de la guía de onda. Se muestra en la Fig. 3. Como puede verse aparecen modos inferiores y superiores, así como una curva de dispersión típica del modo de interés a lo largo de la banda de trabajo. Curiosamente, ese único modo en la banda de interés tiene un diagrama de dispersión similar y, por tanto, un ancho de banda similar al del GGW de altura completa.

B. Divisor de potencia 1-a-2

En la Fig. 4a se muestra un dibujo esquemático de la vista superior de la pieza inferior, que tiene unas dimensiones totales de $50 \times 50 \times 7$ mm. Los puertos de entrada están situados en la parte trasera, siendo sus dimensiones de $7.112 \text{ mm} \times 3.556 \text{ mm}$. Se ha utilizado un paso de adaptación de la ranura de entrada al WR-28. Esta transición conlleva a un rendimiento de banda estrecha.

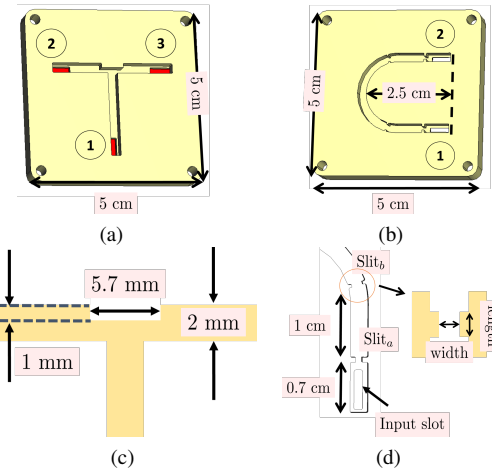


Fig. 4: Dibujos esquemáticos y dimensiones relevantes de los dispositivos: (a) Divisor de potencia 1 a 2 y (b) detalle de las dimensiones del slit del divisor de potencia. (c) Guía de onda curva y (d) detalle de las dimensiones de los slits de entrada.

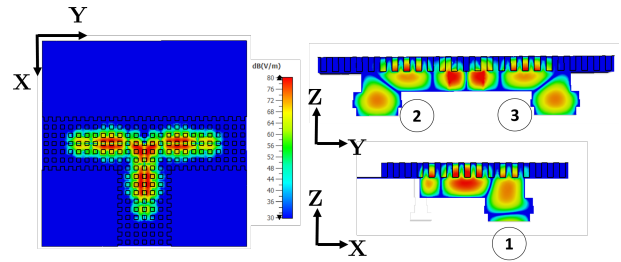


Fig. 5: Distribución del campo eléctrico del modo TE_{10} en la HM-GGW.

A continuación, se utiliza una pared magnética perfecta en la parte superior de la Fig. 4a, en lugar de los pines, para acelerar el proceso de diseño y optimización. Por lo tanto, las condiciones de contorno utilizadas son paredes eléctricas en todas las direcciones, excepto la pared magnética superior. La Fig 4c muestra las dimensiones del divisor optimizado. Con una anchura del slit central de 5.7 mm, una longitud de 1 mm y una profundidad idéntica de la HM-GGW (3.5 mm), se consigue una buena adaptación de la señal a la entrada, obteniendo un coeficiente de reflexión inferior a -15 dB en un ancho de banda superior al 10% (28 a 31 GHz). El uso de la pared magnética es útil, y facilita una rápida optimización del diseño del divisor. El siguiente paso es sustituir esa pared magnética ideal por una estructura real, en este caso la cama de pines de la GW, que se comportará como un HIS.

C. Guía de onda curvada

Se propone un segundo dispositivo para demostrar la viabilidad del HM-GGW. Dado que los pines de la cama están dispuestas en una retícula cuadrada en X e Y, un surco recto siempre verá los pines alineados con respecto al eje central. Ahora, una guía de ondas curva atraviesa la superficie en diferentes ángulos. Esto demostrará que la posición relativa

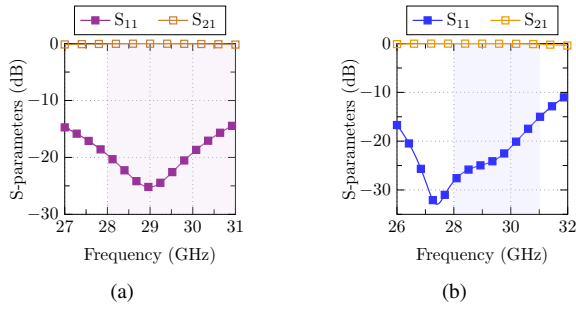


Fig. 6: Resultados simulados de los parámetros S: (a) divisor de potencia y (b) guía curvada.

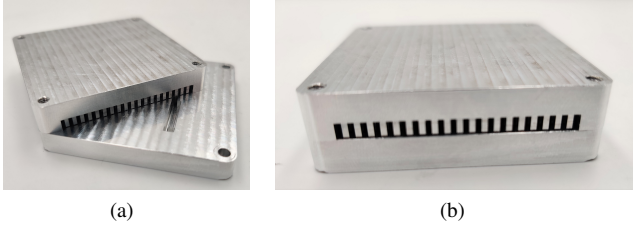


Fig. 7: (a) Guía de onda curvada con la tapa deslizada y (b) divisor de potencia ensamblado. La pieza inferior de cada prototipo es como se muestra en las Figs. 4, la pieza superior es una cama uniforme de pines. Entre las dos piezas hay un espacio de aire de $200 \mu\text{m}$.

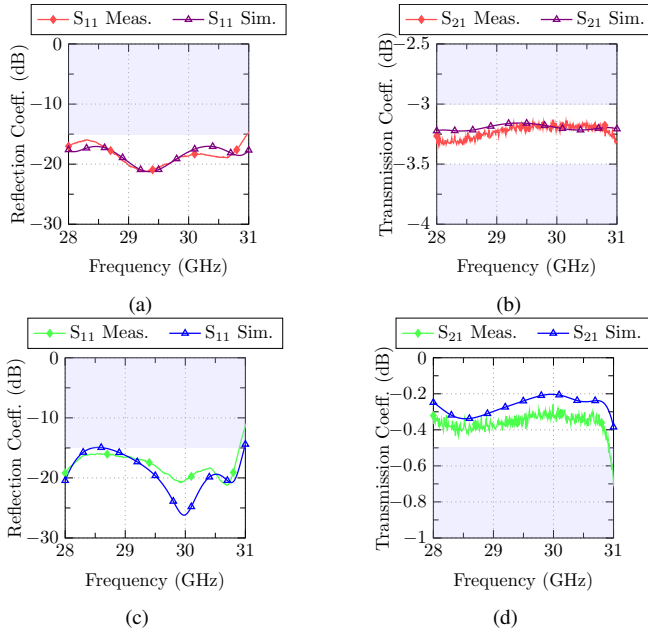


Fig. 8: Parámetros S medidos del divisor de potencia 1 a 2 y de la guía de ondas curva: (a) Coeficiente de reflexión y (b) coeficiente de transmisión. (c) Coeficiente de reflexión y (d) coeficiente de transmisión.

de la tapa superior no altera el rendimiento global de los prototipos.

Nótese que la tapa de HIS que se utilizará para este prototipo

es la misma que la anterior. Un esquema de esta guía de ondas y sus dimensiones relevantes se muestra en las Figs. 4b y 4d. Asimismo, las condiciones de simulación de la estructura son las mismas que las descritas anteriormente para el divisor de potencia. Las dimensiones del puerto de entrada son de $1.3 \text{ mm} \times 5.9 \text{ mm}$. Por último, la anchura y la longitud de las ventanas capacitivas (slit_a y slit_b) son $0.7 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ y $1.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, respectivamente.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan los resultados simulados y experimentales de ambos dispositivos fabricados. La Fig. 5 muestra la distribución de campo E simulada del HM-GGW en el divisor de potencia. Además, la Fig. 6 muestra los parámetros S de las transiciones utilizadas en el divisor de potencia y en la guía de onda curva. La Fig. 7a muestra la guía de onda curva fabricada, en ella se desliza la cama de clavos utilizada como tapa. La misma tapa se ha utilizado para montar también el divisor de potencia 1 a 2 (Fig. 7b). Obsérvese que sólo se utilizan cuatro tornillos para unir ambas estructuras.

La Fig. 8a muestra el coeficiente de reflexión medido para el divisor de potencia 1 a 2 que se mantiene por debajo de -15 dB . Este umbral obtenido es igual a los obtenidos con la pared magnética ideal en la simulación. Asimismo, la Fig. 8c muestra el coeficiente de reflexión para la guía de onda curva.

En cuanto a los coeficientes de transmisión del divisor de potencia (Fig. 8b), se observa que los valores oscilan entre -3.3 dB y -3.2 dB . La guía de onda curva tiene una pérdida de inserción (IL) media de 0.35 dB (Fig. 8d). En ambos dispositivos la concordancia entre las simulaciones y las medidas es muy buena para el coeficiente de reflexión, junto con el S_{21} y el S_{31} del divisor de potencia. En cuanto al coeficiente de transmisión de la guía de onda curva, se observa un ligero descenso de la pérdida de inserción de 0.1 dB en comparación con la simulación. En cualquier caso, la pérdida de inserción es inferior a 0.4 dB en ambos prototipos, lo que demuestra que, a pesar del espacio de aire entre las piezas, la onda se propaga a través de la guía de onda de medio modo sin fugas.

IV. CONCLUSIONES

Se ha presentado un divisor de potencia y una guía de onda curvada que emplea una guía de onda TE_{10} de medio modo basada en GW para la creación rápida de prototipos en esta tecnología. Los dispositivos están contruidos a partir de dos piezas metálicas sin contacto. La pieza inferior alberga la GGW de polarización horizontal. Esta pieza equivale a la mitad de una guía de onda de plano E. Para lograr la propagación, la cubierta superior es una superficie uniforme con pines que actúa como un HIS sobre la placa inferior. Las mediciones de estos demostradores sirven para validar el HM-GGW. Además, la HM-GGW no se limita a los prototipos aquí presentados, sino que otros dispositivos como filtros, diplexores o acopladores son probablemente factibles con esta guía de onda. En futuras líneas de investigación se deberían estudiar también prototipos de banda ancha para confirmar su utilidad en multitud de dispositivos.

REFERENCES

- [1] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, and B. Bernardo-Clemente, "Full-metal k-ka dual-band shared-aperture array antenna fed by combined ridge-groove gap waveguide," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 1463–1467, 2019.
- [2] D. Sánchez-Escuderos, J. I. Herranz-Herruzo, M. Ferrando-Rocher, and A. Valero-Nogueira, "Mechanical phase shifter in gap-waveguide technology," in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [3] T. Makdissy, R. Gillard, E. Fourn, M. Ferrando-Rocher, E. Girard, H. Legay, and L. Le Coq, "'phoenix' reflectarray unit cell with reduced size and inductive loading," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 10, no. 12, pp. 1363–1370, 2016.
- [4] J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, M. Ferrando-Rocher, B. Bernardo-Clemente, R. Lenormand, A. Hirsch, J.-L. Almeida, M. Arnaud, and L. Barthe, "Low cost switchable rhcp/lhcp antenna for sotm applications in ka-band," in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [5] M. Ferrando-Rocher, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz-Herruzo, and A. Berenguer, "V-band single-layer slot array fed by ridge gap waveguide," in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*. IEEE, 2016, pp. 389–390.
- [6] J. Herranz-Herruzo, M. Ferrando-Rocher, A. Valero-Nogueira, R. Lenormand, A. Hirsch, J. Almeida, M. Arnaud, and L. Barthe, "Locomoto satcom terminal: A switchable rhcp/lhcp array antenna for on-the-move applications in ka-band," in *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. IEEE, 2015, pp. 210–211.
- [7] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, D. Sánchez-Escuderos, and A. Valero-Nogueira, "Dual circularly-polarized slot-array antenna in ka-band fed by groove gap waveguide," in *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*. IEEE, 2020, pp. 421–422.
- [8] M. Ferrando Rocher, "Gap waveguide array antennas and corporate-feed networks for mm-wave band applications," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2019.
- [9] M. Baquero-Escudero, A. Valero-Nogueira, M. Ferrando-Rocher, B. Bernardo-Clemente, and V. E. Boria-Esbert, "Compact combline filter embedded in a bed of nails," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 4, pp. 1461–1471, 2019.
- [10] A. Berenguer, V. Fusco, M. Ferrando-Rocher, and V. E. Boria, "A fast analysis method for the groove gap waveguide using transmission line theory," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [11] D. Sánchez-Escuderos, J. I. Herranz-Herruzo, M. Ferrando-Rocher, and A. Valero-Nogueira, "True-time-delay mechanical phase shifter in gap waveguide technology for slotted waveguide arrays in ka-band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 5, pp. 2727–2740, 2020.
- [12] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, D. Sánchez-Escuderos, and A. Valero-Nogueira, "A novel circularly-polarized t-shaped slot array antenna in ka-band," in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2020, pp. 1–3.
- [13] D. Sánchez-Escuderos, M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz, H. C. Moyli, and A. Valero-Nogueira, "Dual-polarized frequency selective surface for sotm applications," 2018.
- [14] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, and B. Bernardo-Clemente, "Compact k/ka dual-band antenna on gap waveguide technology," in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [15] M. Ferrando-Rocher, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz-Herruzo, and D. Sánchez-Escuderos, "Single-layer dual-band subarray for 20/30 ghz using gap waveguide technology," in *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. IEEE, 2018, pp. 1097–1098.
- [16] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, D. Sánchez-Escuderos, and A. Valero-Nogueira, "8x8 single-layer 30-ghz antenna with a combined ridge-groove gap waveguide network," 2018.
- [17] M. Ferrando-Rocher, D. Sánchez-Escuderos, J. I. Herranz-Herruzo, and A. Valero-Nogueira, "Design of broadband gap waveguide transitions for millimeter-wave antenna arrays," in *2018 48th European Microwave Conference (EuMC)*. IEEE, 2018, pp. 1521–1524.
- [18] M. Ferrando-Rocher, A. Valero-Nogueira, and J. I. Herranz-Herruzo, "K/ka dual-band dual-polarized gap waveguide array antenna," in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. IEEE, 2019, pp. 663–664.
- [19] M. Ferrando-Rocher, J. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, and B. Bernardo-Clemente, "Satcom on-the-move antenna with mechanically switchable circular polarization," 2017.
- [20] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, and B. Bernardo-Clemente, "Switchable t-slot for dual-circularly-polarized slot-array antennas in ka-band," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 1953–1957, 2021.
- [21] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, and M. Baquero-Escudero, "Half-mode waveguide based on gap waveguide technology for rapid prototyping," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021.
- [22] J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, M. Ferrando-Rocher, and B. Bernardo-Clemente, "High-efficiency ka-band circularly-polarized radial-line slot array antenna on a bed of nails," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021.
- [23] M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, and A. Valero-Nogueira, "Wideband coffee-bean shaped radiating element for circularly-polarized waveguide slot arrays," in *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2021, pp. 1–4.
- [24] E. Tahanian and G. Dadashzadeh, "A novel gap-groove folded-waveguide slow-wave structure for g-band traveling-wave tube," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 7, pp. 2912–2918, 2016.
- [25] A. Polemi, E. Rajo-Iglesias, and S. Maci, "Analytical dispersion characteristic of a gap-groove waveguide," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 18, pp. 55–72, 2011.
- [26] E. Rajo-Iglesias, M. Ferrando-Rocher, and A. U. Zaman, "Gap waveguide technology for millimeter-wave antenna systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 7, pp. 14–20, 2018.
- [27] M. F. Rocher, "Gap waveguide array antennas and corporate-feed networks for mm-wave band applications," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2018.