



Leaky-Wave Antenna Design on Printed Guide for Communications and Radiolocation in Ku Band

Maria Muñoz Sanz

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

October 6, 2022

Diseño de antena leaky-wave sobre guía impresa para comunicaciones y radiolocalización en banda Ku

M. Muñoz-Sanz

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones, RFCAS
Escuela Politécnica Superior, UAM
Madrid, España
maria.munnozsanz@estudiante.uam.es

Abstract—Leaky-wave antennas are a type of antennas well known in recent years with numerous applications in communication and radar systems. Its properties have a very striking use since they stand out for their simple design structure, for their ease of feeding and have high gain in their radiation diagram and a wide capacity for scanning in frequency. In this Final Degree Project, its design process will be studied and after exploring its capabilities, it will be designed on a low-cost printed guide that operates in Ku band frequencies. The implemented antenna serves as a test to scale the antenna to 5G frequencies in the future.

Keywords—Antenna, waveguide, SIW, LWA, leaky wave, radiation diagram, maximum steering angle.

I. INTRODUCCIÓN

Los últimos estándares de comunicaciones, como el 5G, reclaman fuertes prestaciones en cuanto al diseño de las antenas. Es por ello por lo que, para aspirar a altas tasas de transmisión de datos o conexiones de baja latencia, las antenas tienen un gran papel en las comunicaciones.

En comunicaciones 5G, se trabaja en frecuencias elevadas para conseguir mayor ancho de banda y así aspirar a mayores tasas binarias. Por otra parte, la capacidad de reorientar la antena permite atender a los usuarios con la mejor calidad de servicio posible además de reducir la interferencia con otros usuarios. Sin embargo, la implementación de los diseños es costosa y se ve reducida su eficiencia a medida que aumentamos las frecuencias de trabajo. Por otro lado, para triunfar en el sector tecnológico, es imprescindible que la antena cumpla las capacidades requeridas y que, a su vez, sea competitiva en términos económicos.

Debido al gran número de usuarios, se quieren bajos costes al tener un denso despliegue de estaciones base para todos los usuarios conectados. Es por ello y todo lo anteriormente comentado, que las antenas de onda de fuga o *leaky-wave* pueden ofrecer este servicio y conseguir un bajo coste al implementarlo con tecnología de circuito impreso (*PCB*).

El objetivo final de este proyecto es conseguir una antena *leaky-wave*, que opere a una frecuencia de 17 GHz. La antena sirve como prueba de concepto a una frecuencia suficientemente elevada y ver su posible escalado a frecuencias 5G, y también la utilidad del desapuntamiento en radares y comunicaciones satélite. En primer lugar, se ha realizado un estudio del estado de arte y en trabajos previos para analizar el funcionamiento de una *leaky-wave* para posteriormente reproducir un diseño previo

[1] y así verificar su funcionalidad y validar sus conceptos de diseño. Tras ello, se ha hecho un estudio paramétrico para analizar en detalle cómo afecta cada parte de la antena a su rendimiento. Finalmente, se ha propuesto un diseño propio con los conocimientos obtenidos en el estudio paramétrico anterior.

II. CONTEXTO TECNOLÓGICO

Antes de diseñar, trataremos de aprender en profundidad el comportamiento de la tecnología que se va a emplear. La tecnología protagonista de ese trabajo es la tecnología *leaky*.

Para ello, se ha comenzado a investigar sobre sus características y prestaciones. En el año 2012 se publicó un *paper* tecnológico “*Planar Leaky-Wave Antenna With Flexible Control of the Complex Propagation Constant*” el cual se usará de base [1]. En él se demuestra la capacidad de controlar las partes reales e imaginarias de la constante de propagación en antenas planas, impresas en placas de circuito impreso (*PCB*) compatibles con antenas *leaky-wave*. Se basa en una línea microstrip semimodo cargada con una fila de postes metálicos periódicos. Su equivalente es una guía de ondas integrada (*Substrate Integrated Waveguide, SIW*) con una de las paredes eléctricas laterales reemplazada por una pared parcialmente reflectante.

Su comportamiento de radiación es muy similar al de una microstrip convencional que opera en su primer modo de orden superior. Supone una novedad que la tasa de fuga pueda ser controlable en virtud de una hilera de postes metálicos separados periódicamente, pero una mayor separación entre ellos con respecto al otro lateral.

Según la teoría de propagación en guía de onda [2], a una frecuencia fija, una guía de onda soporta un número de modos de propagación e infinitos modos al corte. En este caso conviene trabajar en una banda de frecuencias en el que se propague un solo modo, el modo fundamental. Si esto no se consigue y se tienen varios modos, se producen distorsiones ya que la constante de propagación β y la velocidad de propagación para cada modo puede ser distinta.

Se debe trabajar en el intervalo de frecuencias $f_{c,1} < f < f_{c,2}$ donde $f_{c,1}$ se corresponde con la frecuencia de corte del modo fundamental y $f_{c,2}$ la frecuencia de corte del primer modo superior.

Las antenas planas de onda con fugas (*PLWA*) han sido objeto de estudio en las últimas dos décadas debido a la fácil

combinación entre las características de las antenas planas (bajo, coste, buena integración con otros circuitos planos) con las de las LWA (alimentación simple, alta directividad y capacidad de barrido en frecuencia).

Se demuestra que es posible controlar de forma independiente el ángulo de apuntamiento y el ancho de haz del lóbulo principal al mismo tiempo logrando altas eficiencias de radiación. Este logro proporciona soluciones de bajo costo, bajo perfil, y, sobre todo, fácil integración para aplicaciones de escaneo de haces de frecuencia de alta ganancia.

La fila de postes separados a una distancia se comporta como una superficie inductiva parcialmente reflectante (PRS) permitiendo así controlar el nivel de fuga.

La LWA estudiada radia en forma de onda con fugas creada en la discontinuidad que se produce entre el borde lateral microstrip conectado a tierra y el dieléctrico que se extiende en el plano de tierra. Está formada por una combinación de circuito impreso y postes, proporcionando una estructura completamente plana integrada en una sola capa de sustrato. La estructura ha sido diseñada para operar con el modo TE_{10} de la SIW que se crea entre los postes metálicos (los que actúan como reflector) y los de la pared parcialmente reflectante (PRS) teniendo entre ellos una distancia W (Fig. 1).

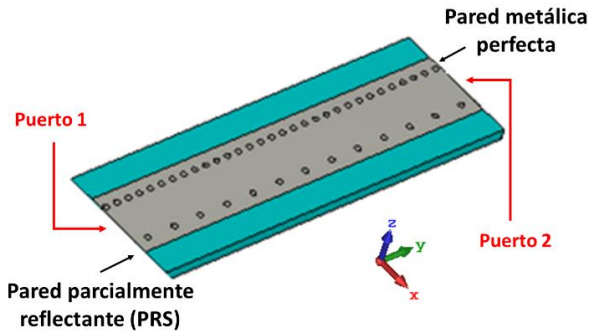


Fig. 1. Descripción gráfica de la leaky-wave.

El mecanismo de radiación de un LWA está definido principalmente por la constante de propagación compleja.

$$k_z = \beta - j\alpha \quad (1)$$

donde β es la constante de fase y α la constante de atenuación.

Las corrientes magnéticas creadas en el borde de los postes metálicos son las responsables de la alta directividad en el plano H, que se corresponde con el plano YZ mientras que en el plano E, plano XZ, se logra un amplio ancho de haz.

La cantidad de potencia radiada depende de la tasa de fuga α y la longitud de LWA L_A y determina la eficiencia de radiación de la antena η_{rad} . Esa eficiencia de radiación viene determinada por todo lo que entrego en el puerto 1 y eliminando toda aquella potencia que se refleja (S_{11}) y toda la que llega al puerto 2 (S_{21}).

En el *paper* [1] como supone adaptación perfecta, no incluye la potencia reflejada en la ecuación.

$$\eta_{rad} = 1 - |S_{11}|^2 - e^{-2\alpha L_A} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2)$$

Normalmente, para determinar un control factible en la iluminación de la antena, la eficiencia de radiación de la antena tiene que ser de un 90%. Es por ello, que, a la hora de diseñar, suponiendo una adaptación perfecta $|S_{11}|^2 = 0$, nos lleva a decir que el $|S_{21}|^2$ debe ser de -10 dB.

La eficiencia viene determinada por la longitud de la radiación L_A y el ángulo que determina el ancho de haz principal θ_{rad} .

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{\frac{L_A}{\lambda_0} \cos\theta_{rad}} \quad (3)$$

Para la antena propuesta, el control de α y β se realiza modificando los parámetros del circuito impreso P y W . Una vez el sustrato y el ancho SIW han sido elegidos para establecer la onda de fuga en la banda de frecuencia deseada, el período entre postes P debe estar diseñado.

Para valores grandes de P , las pérdidas se vuelven no despreciables y la línea de transmisión sufre fugas de radiación. En este caso, los postes conductores periódicos pueden ser vistos como una impedancia inductiva actuando como un PRS que puede ser controlada por la distancia entre postes P . Por el contrario, el período P_0 de la otra fila de postes deben elegirse lo suficientemente pequeños como para considerarlos como un conductor perfecto.

Hay que destacar que el ancho de la parte del borde superior de la microstrip W_0 tiene que ser menor que $\lambda/4$ para evitar la aparición de modos indeseados.

Altos valores de P incrementan las fugas. W controla la frecuencia de corte del modo de la SIW determinando así la constante de fase β y θ_{rad} a esa frecuencia fija.

III. DISEÑO DE ANTENA LEAKY-WAVE

En un primer paso, se procede a diseñar la antena de onda de fuga. Para ello, se ha creado un sólido dieléctrico cubierto por dos tapas metálicas: la tapa superior de anchura w_{tapa} y la tapa inferior de anchura a_w . Además, se han creado dos hileras de taladros metálicos: la que hace la función de pared de metal con una separación P_0 y la otra que está separada por una distancia P que condiciona la cantidad de potencia de fuga, véase Figura 2.

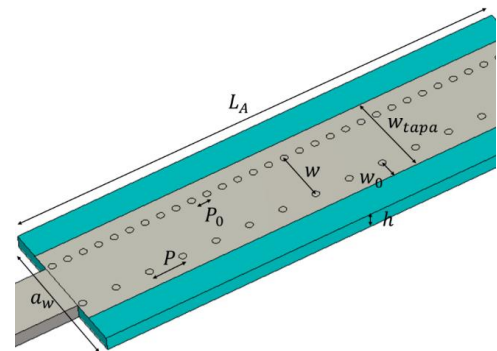


Fig. 2. Dimensiones de la leaky-wave.

Tras llevar un estudio exhaustivo, se ha conseguido replicar los resultados de un diseño previo a 15 GHz del *paper* [1]. Posteriormente se desea pasar a un diseño a 17 GHz, pero el

escalado no es inmediato. Como hay ciertos parámetros de diseño que deben mantenerse estáticos, por motivos de disponibilidad de materiales de fabricación, como son el espesor y la altura del dieléctrico h , no será tarea fácil lograr el reajuste correcto. El resto de los parámetros se escalan con un factor de escala de 15/17.

Los resultados que se buscan son: un ancho de haz $\Delta\theta = 20^\circ$, un ángulo de apuntamiento $\theta_{rad} = 30^\circ$, ganancia $G = 8.9 \text{ dBi}$, directividad $D = 10 \text{ dBi}$ y una eficiencia de radiación $\eta_{rad} = 88.8\%$.

Como queremos conseguir una eficiencia de aproximadamente el 90%, los parámetros S son de suma importancia para valorar la adaptación de la antenna. Es por ello por lo que se requiere un S_{21} de -13 dB para alcanzar ese 90% de eficiencia consiguiendo un coeficiente de reflexión S_{11} de en torno a -17 dB.

Para facilitar la escalabilidad de este diseño, ha resultado de gran importancia implementar la estructura de manera periódica y simétrica. Para en un futuro poder fabricar esta antenna, se ha empleado un sustrato dieléctrico marca Taconic, modelo TLY-5A, disponible en la EPS con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 2.2$ y una constante de pérdidas $\tan\delta = 0.0009$. El diámetro de los taladros empleado es de 0.8 mm.

A. Estudio paramétrico

Tras haber conseguido un diseño óptimo, se lleva a cabo un estudio paramétrico donde se estudiará más a fondo el funcionamiento de una antenna de onda de fuga y así conocer cómo afecta cada uno de los parámetros de diseño. Los que alteran el funcionamiento de manera más significativa son el ancho del sustrato a_w (se necesita un tamaño mínimo del plano de masa para un correcto funcionamiento), la separación entre taladros P (regula la eficiencia de la antenna), la separación entre ambas hileras W (regula al ángulo de apuntamiento y adapta la antenna) y la distancia entre los postes de la pared de fuga con el sustrato conductor w_0 (ajuste fino de la eficiencia de la antenna). Véase dichos parámetros en la figura 2.

IV. IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

En esta sección, se va a implementar de manera práctica el diseño de la antenna de onda de fuga propuesto con anterioridad. Para conseguir dicho objetivo, se toma la decisión de conectar la antenna de fuga a conectores de alimentación SMA, pero para ello, se requiere el uso de una transición y así conseguir la adaptación completa de la antenna.

Se ha escogido dicho conector coaxial para alimentar a la antenna ya que es con el que se procedería a construir y medir en un futuro y emplearemos un guía SIW que eliminaría la posibilidad de tener efectos indeseados y así poder trabajar en la banda frecuencias monomodo.

Para pasar los puertos en guía convencional a guía SIW, se han empleado las fórmulas de equivalencias del *paper* [3]. Dichas fórmulas fueron obtenidas experimentalmente con el objetivo de relacionar la anchura de la SIW con la anchura de la guía rectangular a_{RWG} (Figura 3).

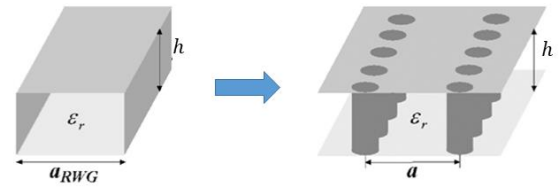


Fig. 3. Dimensiones de la leaky-wave.

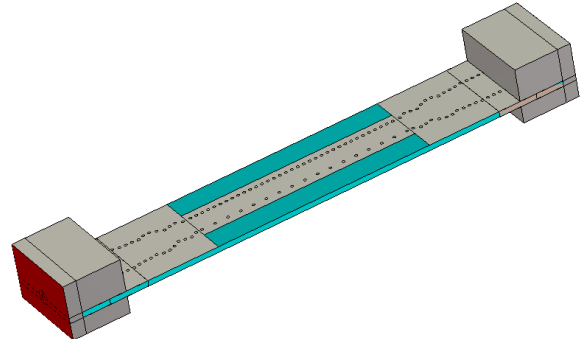


Fig. 4. Antena leaky-wave.

A. Diseños

Para poder medir experimentalmente la antenna se han diseñado dos modelos. Difieren entre ellos la anchura de la microstrip de entrada w_{strip} , la anchura del chaflán de la microstrip d_m (anchura al final de la microstrip) y la longitud de la línea l_{mstrip} . A continuación, se puede observar la importancia de la línea microstrip, ya que toma un gran papel en la trayectoria de la onda consiguiendo distintas prestaciones tanto en la directividad y ángulo de dirección de máximo apuntamiento como en la eficiencia de radiación en una determinada banda de frecuencias. Podemos observarlo en las figuras 6, 7 y 8.

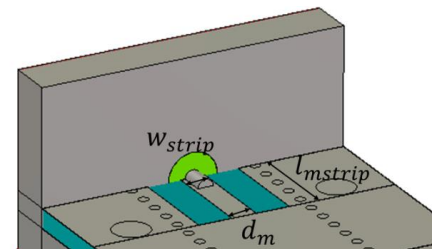


Fig. 5. Transición SMA-SIW empleada con caja de vaciado superior oculta.

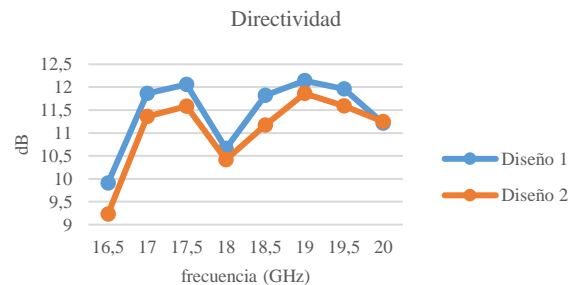


Fig. 6. Directividad entre ambos diseños.

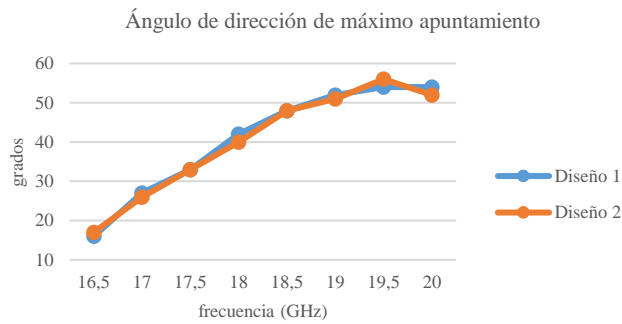


Fig. 7. Ángulo de dirección de máximo apuntamiento entre ambos diseños.

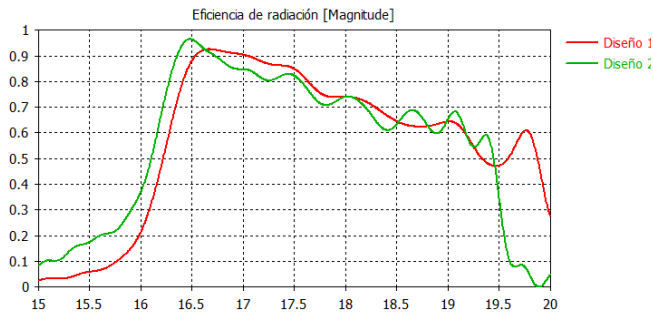


Fig. 8. Eficiencia de radiación entre ambos diseños.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Tras toda esta investigación, se ha conseguido el diseño de una antena de fuga compuesta por postes separados por una distancia a elegir para controlar así la señal de fuga en un barrido de frecuencia. En su estudio, se han ido viendo todas tecnologías que influyen en este trabajo y el por qué de su utilidad en nuestro trabajo gracias al estudio paramétrico de aquellas dimensiones de la LWA que produce distintos comportamientos en la antena y así conocer más en profundidad su funcionamiento y el control de fuga.

Finalmente, se ha conseguido escalar satisfactoriamente la antena de onda de fuga a 17 GHz a pesar de contar con parámetros de diseño que complicaban finalizar dicho trabajo, manteniendo las prestaciones deseadas. Se espera en un futuro aplicar estos conocimientos en un diseño a frecuencias de diseño más elevadas.

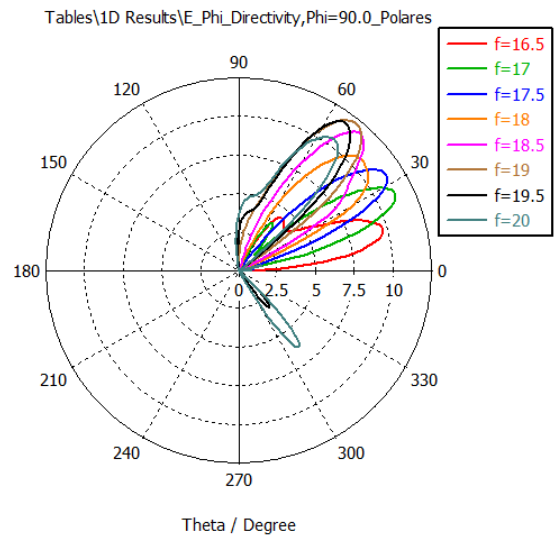


Fig. 9. Directividad en coordenadas polares en función de la frecuencia.

Tal y como hemos visto, las antenas de onda de fuga se caracterizan por tener unas prestaciones muy prometedoras en el ámbito de las comunicaciones 5G o en sistemas de radares. Se ha demostrado que este tipo de antenas se caracteriza por tener un apuntamiento variable en frecuencia como se observa en la figura 9, su diseño consta de sencillez ya que no emplea mecanismos adicionales ni electrónica y que son de bajo perfil y bajo coste.

Como trabajo futuro, se llevará a cabo su construcción y medida y tras ello se plantean estudiar otras longitudes de la antena para así regular el ancho de haz. Otra propuesta sería llegar a frecuencias mayores para alcanzar la banda de las 5G y así trasladar a frecuencias de altas tasas.

REFERENCIAS

- [1] A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero and G. Goussetis, "Planar Leaky-Wave Antenna With Flexible Control of the Complex Propagation Constant," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 3, pp. 1625-1630, March 2012, doi: 10.1109/TAP.2011.2180320.
- [2] J. A. Ruiz Cruz, "Tema III.3 Conceptos de Frecuencia de Corte, Modo Fundamental, Modo Superior, Ancho de Banda Monomodo" Asignatura: Medios de Transmisión, Escuela Politécnica Superior, UAM, 2014-15.
- [3] Li Yan, W. Hong, Guang Hua, Jixin Chen, K. Wu and Tie Jun Cui, "Simulation and experiment on SIW slot array antennas," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 9, pp. 446-448, Sept. 2004, doi: 10.1109/LMWC.2004.832081.