

SUPERFICIE SELECTIVA DE FRECUENCIA DE DOS BANDAS BASADA EN GEOMETRÍAS DE RANURAS CONCÉNTRICAS

Jesús Yamil Robles López, Lourdes Martínez López
Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería
Departamento de Electrónica, División de Ingeniería Eléctrica
Ciudad Universitaria, Coyoacán C.P. 04510, Ciudad de México, México
Tel. 5556223113
e-mail: lourmart@comunidad.unam.mx

RESUMEN.

Este artículo presenta una superficie selectiva de frecuencia basada en dos geometrías concéntricas diferentes para obtener dos bandas de paso en 26.4 y 37.4 GHz. El uso de una ranura de anillo circular y una ranura cuadrada rotada proporciona los grados de libertad adecuados para diseñar la superficie de dos bandas. Debido a la proximidad de las dos geometrías, en el diseño se debe considerar un fuerte acoplamiento mutuo entre ellas. Las frecuencias de la superficie propuesta son buenas candidatas para las bandas de frecuencia de ondas milimétricas 5G.

Palabras Clave: Superficies Selectivas de Frecuencia, Arreglos periódicos, SSF multibanda.

ABSTRACT.

This paper presents a frequency selective surface based on two different concentric geometries to obtain two passbands at 26.4 and 37.4 GHz. The use of a circular ring slot and a rotated square slot provides the adequate degrees of freedom to design the two band surface. Due to the proximity of the two geometries, strong mutual coupling between them needs to be considered in the design. The frequencies of the proposed surface are good candidates for 5G millimeter-wave frequency bands.

Keywords: Frequency selective surfaces, periodic arrays, multiband FSS.

1. INTRODUCCIÓN

El avance de la tecnología móvil ha permitido que cada vez más se tenga acceso a dispositivos capaces de realizar comunicación inalámbrica. Esto ha llevado a una creciente demanda de ancho de banda en el espectro radioeléctrico y la saturación de múltiples señales que se transmiten de forma simultánea por el espacio, causando interferencias y degradando la calidad de las comunicaciones, por lo que resulta esencial optimizar los sistemas de filtrado, presentes en los distintos sistemas de comunicaciones. De esta manera, se logra la recepción y transmisión de señales útiles mientras se suprimen las señales de interferencia procedentes de otros sistemas, garantizando así una transmisión clara y eficiente de la información. Un método para obtener un adecuado filtrado de señales es la utilización de Superficies Selectivas de Frecuencia (SSF), que son superficies planas conformadas por un sustrato dieléctrico, sobre el cual se colocan elementos

metálicos de forma periódica con geometrías específicas idénticas que pueden ser parches o aperturas (ranuras). Una onda electromagnética que incide en estas superficies podrá ser transmitida o reflejada dependiendo de distintos factores como: la geometría de los elementos del arreglo, la frecuencia, la polarización y el ángulo de incidencia, entre otros. Estas características, permiten que las SSF actúen como filtros espaciales para las ondas electromagnéticas. Las SSF con más de una banda resonante (multibanda) se han estudiado en los últimos años debido a la integración de aplicaciones en los sistemas de comunicación modernos que requieren más de una banda operativa. Los diseños de SSF han demostrado características personalizadas de transmisión y reflexión que los hacen adecuados para una variedad de aplicaciones en sistemas de comunicación modernos [1], [2]. Las SSF de tipo ranura exhiben una respuesta transparente a la onda electromagnética (EM) incidente en la banda de paso cuando la longitud de onda está cerca del perímetro de la ranura y se reflejan principalmente fuera de la banda de paso. Recientemente, las bandas de frecuencia de ondas milimétricas 5G se han vuelto atractivas debido a las ventajas inherentes de las frecuencias extremadamente altas. Por otro lado, los sistemas de comunicación multibanda brindan la flexibilidad de admitir diferentes estándares inalámbricos. Por lo tanto, el diseño de SSF multibanda en frecuencias de ondas milimétricas es importante en la comunidad investigadora.

Se han utilizado diferentes métodos para obtener SSF multibanda [3-23]. Una de estas técnicas consiste en diseñar celdas unitarias con geometrías compuestas y concéntricas. Para el caso de geometrías concéntricas, se debe prestar especial atención para minimizar el acoplamiento de las geometrías estrechamente espaciadas, ya que un acoplamiento fuerte degrada la respuesta de las SSF. Este artículo presenta una superficie selectiva de frecuencia de dos bandas basada en dos geometrías concéntricas diferentes, una de anillo circular y otra cuadrada rotada 45 grados (rombo), las cuales fueron optimizadas para proporcionar dos bandas de paso. El diseño de la superficie propuesta funciona en la banda Ka y proporciona dos bandas de paso con frecuencias centrales ubicadas en 26.4 y 37.4 GHz.

2. DESARROLLO

2.1. Diseño de la celda unitaria.

La celda unitaria de la superficie selectiva de frecuencia propuesta se muestra en la Figura 1. Contiene una ranura circular interior y una ranura cuadrada exterior girada 45 grados desde el eje x (geometría de rombo).

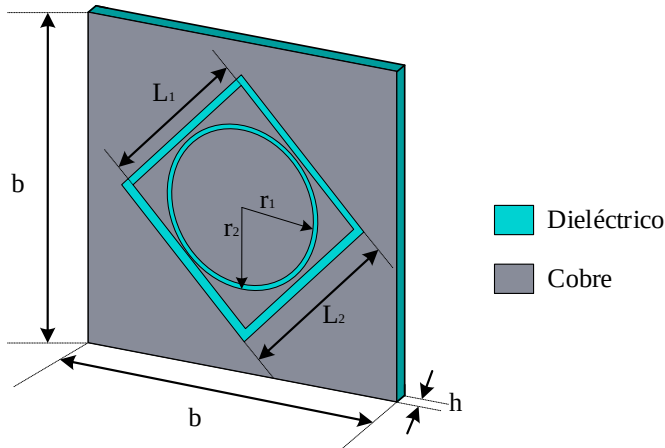


Figura 1. Celda unitaria de la superficie selectiva de frecuencia de dos bandas con geometrías de ranuras concéntricas.

Estas ranuras están impresas en un sustrato dieléctrico para microondas Rogers RO4003C con permitividad dieléctrica ϵ_r de 3.55, espesor dieléctrico h de 0.203 mm y $\tan \delta$ de 0.0027. La ranura cuadrada que proporciona un perímetro mayor está diseñada para ser la geometría externa y define la frecuencia de resonancia más baja, mientras que la ranura circular con un perímetro más corto está configurada para ser la geometría interna para obtener la frecuencia más alta. Esta celda unitaria está dispuesta en una red cuadrada de período b a lo largo de las direcciones x y y de un sistema de coordenadas rectangular. La simetría con los dos ejes de coordenadas admite polarizaciones tanto lineales como circulares para la onda EM incidente.

En la Figura 2, se muestra la superficie selectiva de frecuencia formada por la unión de celdas unitarias y se observa la onda EM que incide sobre la superficie. Inicialmente, las magnitudes de los coeficientes de reflexión y transmisión se calcularon con la ayuda de un método de onda completa. Estas magnitudes se obtuvieron considerando una onda EM plana de polarización circular que incide normalmente en la superficie selectiva de frecuencia infinita. Se parametrizaron los diferentes tamaños de las dos geometrías resonantes y se calculó la dispersión de la superficie selectiva de frecuencia para obtener el diseño final. La geometría de la celda unitaria optimizada se describe a continuación: $b = 4.0$ mm, $L_1 = 2.06$ mm, $L_2 = 2.26$ mm, $r_1 = 0.95$ mm y $r_2 = 1.0$ mm. Las magnitudes de los coeficientes de reflexión y transmisión se muestran en las Figuras 3 y 4, respectivamente. Se pueden observar frecuencias de resonancia ubicadas en 26.4 y 37.4 GHz para la primera y segunda banda, respectivamente, con pérdidas de inserción inferiores a 1 dB.

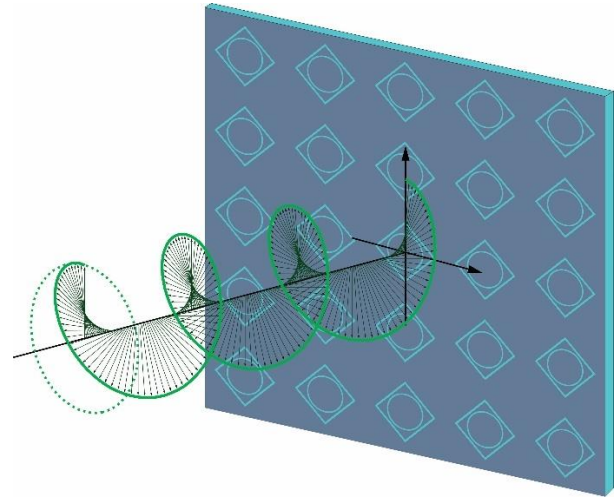


Figura 2. Arreglo periódico de celdas unitarias con onda incidente de polarización circular.

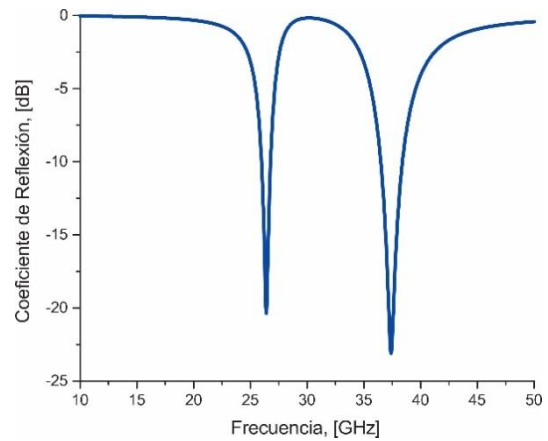


Figura 3. Magnitud del coeficiente de reflexión de la superficie.

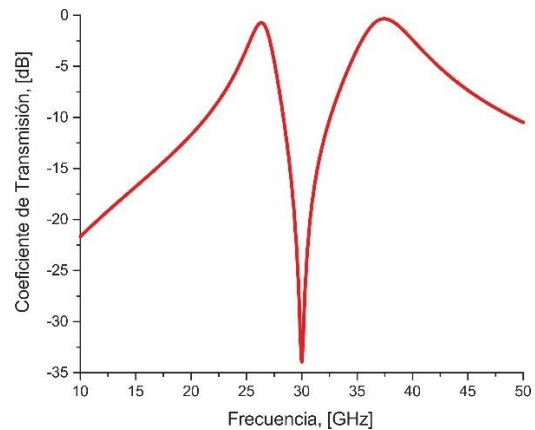


Figura 4. Magnitud del coeficiente de transmisión de la superficie.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de simulación para verificar la estabilidad de la superficie ante variaciones de distintos parámetros. La primera de estas pruebas consiste en observar cómo varía la respuesta en frecuencia al aumentar o disminuir el ancho de los elementos resonantes dentro de la celda unitaria. En las Figuras 5 y 6 se observa el coeficiente de reflexión y de transmisión de la superficie ante variaciones del radio interior (r_1) del anillo ranurado, manteniendo constante el radio exterior (r_2), así como los parámetros del rombo (L_1 y L_2).

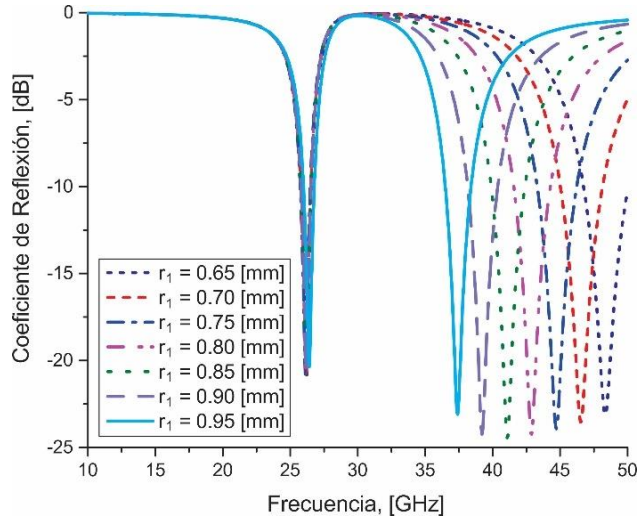


Figura 5. Magnitud del coeficiente de reflexión de la superficie al variar el radio interior del anillo.

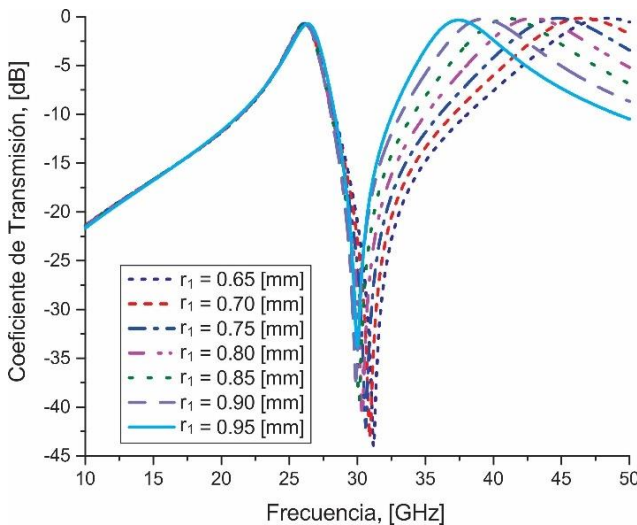


Figura 6. Magnitud del coeficiente de transmisión de la superficie al variar el radio interior del anillo.

Por otro lado, en las Figuras 7 y 8 se observa cómo responde la superficie ante variaciones del lado exterior (L_2) del rombo,

manteniendo constante su lado interior (L_1), así como los parámetros del anillo (r_1 y r_2).

Como se puede apreciar al variar las dimensiones del anillo, la frecuencia de resonancia más baja, así como su ancho de banda casi no se ven alterados, sin embargo, para la frecuencia de resonancia alta, se observa una desviación muy grande respecto a la respuesta original con pequeñas variaciones del radio interior. Por su parte, cuando se varían las dimensiones del rombo, la superficie muestra un comportamiento bastante estable, presentando una desviación pequeña en comparación al resultado inicial, llegando incluso a permanecer dentro de la banda Ka para distintos valores del lado exterior.

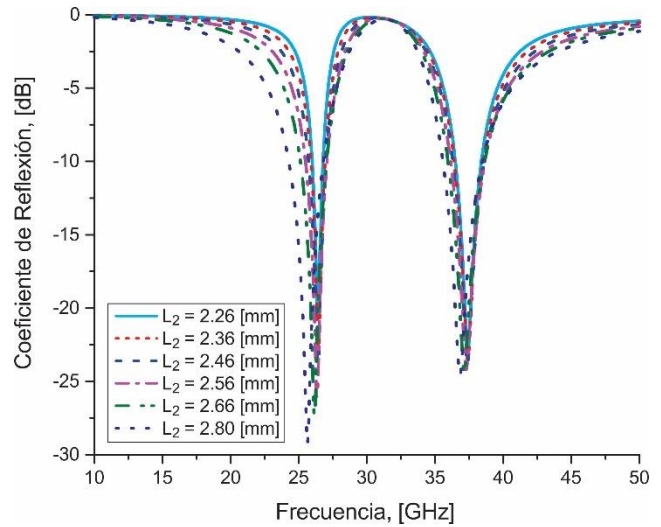


Figura 7. Magnitud del coeficiente de reflexión de la superficie al variar el lado exterior del rombo.

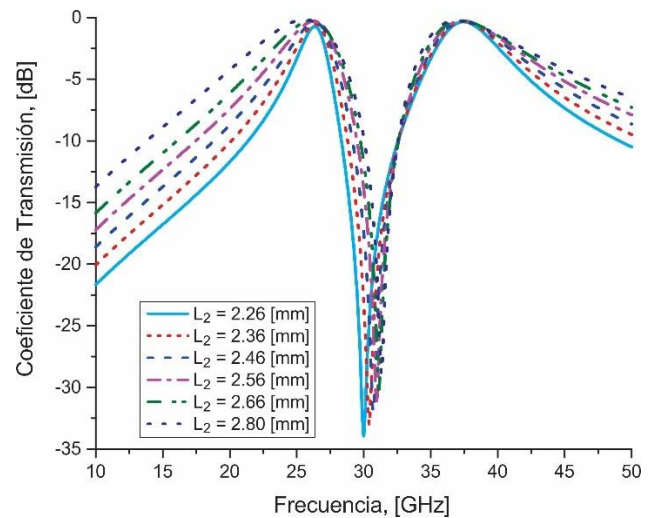


Figura 8. Magnitud del coeficiente de transmisión de la superficie al variar el lado exterior del rombo.

Para realizar la fabricación física de la superficie se debe tener cuidado al imprimir la geometría del anillo dentro de la pantalla metálica, ya que una pequeña desviación puede causar que la superficie opere en una frecuencia no deseada, mientras que para el rombo, se puede tener un intervalo ligeramente más amplio de valores para que la respuesta en frecuencia no se altere tanto respecto a la que se busca. Para analizar la sensibilidad de la superficie selectiva de frecuencia para incidencia oblicua, los parámetros de dispersión de la superficie se obtuvieron considerando diferentes ángulos de la onda EM incidente. En las Figuras 9 y 10 se muestran las magnitudes de los coeficientes de reflexión y transmisión, respectivamente, para diferentes ángulos de incidencia.

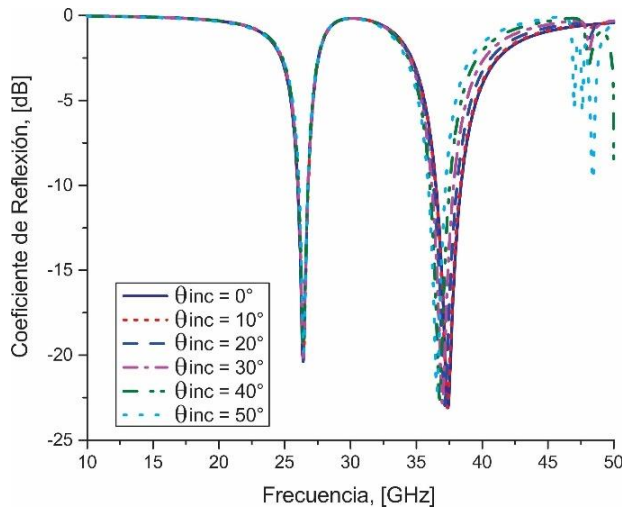


Figura 9. Magnitud del coeficiente de reflexión para diferentes ángulos de incidencia.

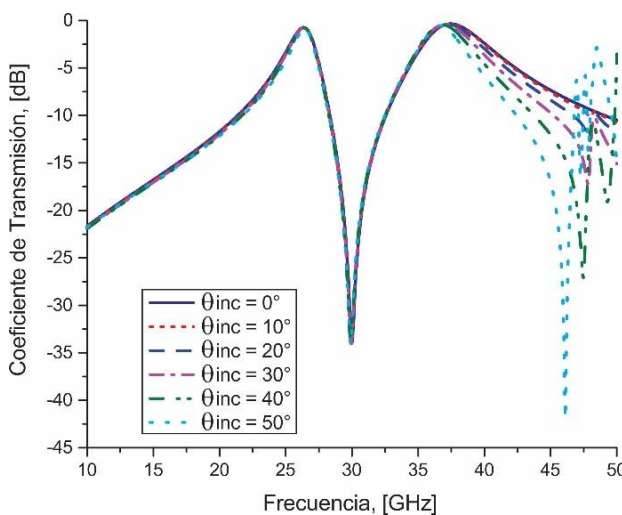


Figura 10. Magnitud del coeficiente de transmisión para diferentes ángulos de incidencia.

Se puede observar que se obtiene una buena estabilidad para grandes ángulos de elevación, particularmente para la primera banda de paso. De acuerdo con lo anterior, se puede apreciar que la superficie, gracias a las geometrías utilizadas en la celda unitaria, así como el dieléctrico seleccionado, presenta una estabilidad bastante grande con respecto a distintos ángulos de incidencia, sin embargo, para 50° se observa que el ancho de banda comienza a reducirse de forma considerable, y empiezan a aparecer lóbulos de rejilla que pueden generar interferencias no deseadas dentro de la banda Ka, por lo que se sugiere que el ángulo de incidencia de las ondas no supere este valor.

2.2. Modelo del circuito eléctrico.

Se obtuvo un modelo de circuito equivalente (MCE) para la superficie selectiva de frecuencia como se muestra en la Figura 11. Para el caso de la onda incidente con polarización y, cada geometría puede modelarse mediante un circuito resonante paralelo. La ranura cuadrada externa se puede representar mediante el circuito resonante con los parámetros agrupados L_1 , C_1 y R_1 , mientras que la ranura circular interna se representa con L_2 , C_2 y R_2 . Donde las inductancias representan las corrientes eléctricas que fluyen a lo largo de la pantalla metálica en el lado exterior del rombo y de la ranura circular, las capacitancias se deben al campo eléctrico almacenado dentro de cada una de las ranuras y las resistencias se emplean para modelar las pérdidas que se presentan en los coeficientes de reflexión y transmisión. Debido a la proximidad de ambas geometrías, una inductancia mutua M_{12} tiene en cuenta el fuerte acoplamiento mutuo que existe. Se utiliza una línea de transmisión LT_S para considerar el efecto del sustrato dieléctrico. Se incluyen dos puertos de 377 Ω para considerar el espacio libre en ambos lados de la superficie selectiva de frecuencia. Los valores calculados del MCE son: $L_1 = 229 \mu\text{H}$, $L_2 = 157 \mu\text{H}$, $C_1 = 674 \text{ fF}$, $C_2 = 114 \text{ fF}$, $R_1 = 4.5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 353 \text{ k}\Omega$ y $M_{12} = 170 \mu\text{H}$. La comparación de los resultados simulados del método de onda completa y el MCE se muestra en las Figuras 12 y 13. Se puede observar una buena concordancia entre ambos modelos.

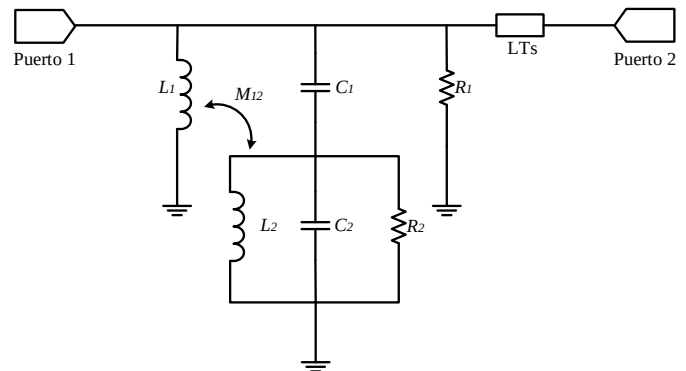


Figura 11. Modelo del circuito equivalente de la superficie.

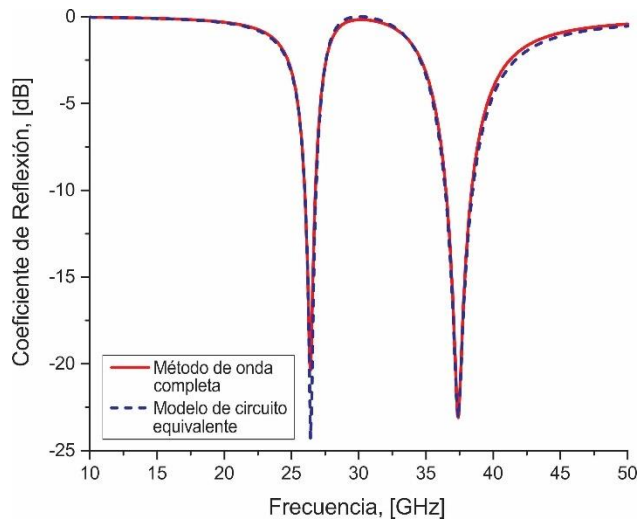


Figura 12. Magnitud del coeficiente de reflexión de la superficie de dos bandas para el método de onda completa y MCE.

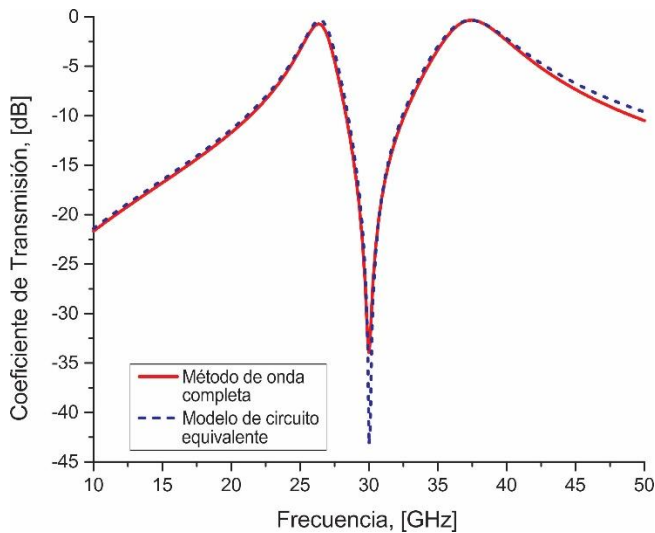


Figura 13. Magnitud del coeficiente de transmisión de la superficie de dos bandas para el método de onda completa y MCE.

Finalmente, en la Tabla I se resume los resultados obtenidos de la simulación de la celda unitaria a partir del método de onda completa y del MCE del diseño propuesto para la superficie selectiva de frecuencia de dos bandas. Se presentan los valores para los diferentes parámetros como son la frecuencia de resonancia para las dos bandas, el valor del coeficiente de transmisión, el intervalo de frecuencias a -1 dB y el ancho de banda correspondiente, así como también el valor del coeficiente de reflexión a la frecuencia de resonancia, el intervalo de frecuencias a -10 dB y su respectivo ancho de banda.

Tabla I. Resultados simulados método de onda completa y MCE.

Banda	Parámetro	Simulación método de onda completa	Simulación MCE
1	Frecuencia de Resonancia (f_0)	26.4 GHz	26.4 GHz
	Coeficiente de Transmisión	En f_0	-0.732 dB
		Intervalo de Frecuencias a -1 dB	26.01 a 26.65 GHz
		Ancho de Banda a -1 dB	0.64 GHz
	Coeficiente de Reflexión	En f_0	-20.371 dB
		Intervalo de Frecuencias a -10 dB	25.98 a 26.78 GHz
		Ancho de banda a -10 dB	0.8 GHz
2	Frecuencia de Resonancia (f_0)	37.4 GHz	37.4 GHz
	Coeficiente de Transmisión	En f_0	-0.345 dB
		Intervalo de Frecuencias a -1 dB	36.34 a 38.7 GHz
		Ancho de Banda a -1 dB	2.36 GHz
	Coeficiente de Reflexión	En f_0	-23.1 dB
		Intervalo de Frecuencias a -10 dB	36.49 a 38.4 GHz
		Ancho de banda a -10 dB	1.91 GHz

2.3. Resultados.

A partir de la celda unitaria diseñada basada en dos geometrías de ranuras concéntricas de anillo circular y rombo impresas en un sustrato dieléctrico permite la obtención de una superficie selectiva de frecuencia capaz de operar en dos anchos de banda distintos pertenecientes a la banda Ka (26 a 40 GHz). Por la simetría de las geometrías utilizadas, la superficie soporta polarización lineal y circular de la onda incidente. Los resultados permiten observar el comportamiento paso banda obtenido en el coeficiente de transmisión para dos bandas distintas con frecuencia de resonancia de 26.4 y 37.4 GHz. Se tiene una buena estabilidad de la superficie diseñada ante distintos ángulos de incidencia de las ondas electromagnéticas, obteniéndose buenos resultados hasta un ángulo de 50° . El

MCE obtenido, modela el comportamiento presentado por la superficie selectiva de frecuencia. Al realizar la comparación de los resultados de la respuesta en frecuencia de la simulación de la celda unitaria a partir del método de onda completa y del MCE, se obtiene una buena coincidencia.

2.4. Conclusiones.

En este artículo se presenta un diseño de una superficie selectiva de frecuencia en la banda Ka de una capa con dos bandas de paso basadas en dos ranuras concéntricas. Las dos resonancias de transmisión se obtuvieron combinando un cuadrado rotado (rombo) y una ranura circular en la celda unitaria. La primera banda de paso con una frecuencia resonante de 26.4 GHz presenta un ancho de banda con un coeficiente de transmisión a -1 dB de 0.64 GHz, mientras que la segunda banda de paso con la frecuencia resonante de 37.4 GHz tiene un ancho de banda con un coeficiente de transmisión a -1 dB de 2.36 GHz. La superficie selectiva de frecuencia propuesta tiene aplicaciones potenciales en sistemas de comunicación multibanda que funcionan en la banda de ondas milimétricas.

2.5. Agradecimientos.

Este trabajo fue realizado con el apoyo obtenido de la Cátedra Especial Odón de Buen Lozano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, con el proyecto de investigación desarrollado.

2.6. Referencias.

- [1] E. Mutluer, B. Döken, and M. Kartal, "A Dual-Band Frequency Selective Surface Design for Satellite Applications," in *Mediterranean Microwave Symposium, IEEE Computer Society*, Jan. 2019, pp. 43–46, doi: 10.1109/MMS.2018.8611938.
- [2] Y. Li, P. Ren, and Z. Xiang, "A Dual-Passband Frequency Selective Surface for 5G Communication," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 12, pp. 2597–2601, Dec. 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2944936.
- [3] F. Deng, X. J. Xi, J. Li, and F. Ding, "A method of designing a field-controlled active frequency selective surface," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 630–633, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2375376.
- [4] P. Chomtong, P. Krachodnok, K. Bandudej, and P. Akkaraekthalin, "A Multiband FSS Director Using Aperture Interdigital Structure for Wireless Communication Systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 11206–11219, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144642.
- [5] H.-R. Cao, X.-H. Yang, Z.-Y. Zong, and W. Wu, "A Novel Design of Wide-Band Dual-Polarization Reconfigurable Frequency Selective Surface," in *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, APS/URSI 2021-Proceedings*, Singapore, Singapore, 4–10 Dec. 2021, pp. 1873–1874, doi: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9703917.
- [6] M. Yan, S. Qu, J. Wang, A. Zhang, L. Zheng, Y. Pang, and H. Zhou, "A Quad-Band Frequency Selective Surface with Highly Selective Characteristics," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 26, no. 8, pp. 562–564, Aug. 2016, doi: 10.1109/LMWC.2016.2585560.
- [7] R. Kumar, A. Rajput, K. Saurav, and S. K. Koul, "A Triple Band-Pass Polarization Insensitive and Angular Stable Frequency Selective Surface," in *2021 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference, IMARC 2021*, Kanpur, India, 17–19 Dec. 2021, doi: 10.1109/IMaRC49196.2021.9714627.
- [8] W. Wu, X. Liu, K. Cui, Y. Ma, and Y. Yuan, "An Ultrathin and Polarization-Insensitive Frequency Selective Surface at Ka-Band," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 74–77, Jan. 2018, doi: 10.1109/LAWP.2017.2774825.
- [9] X. Ma, Y. Liu, G. Wan, and A. Pan, "Angularly Stable Frequency-Selective Surface Using Shifted Double-Sided Screens," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 7, pp. 1192–1196, Jul. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.2994982.
- [10] K. Katoch, N. Jaglan, and S. D. Gupta, "Design and Analysis of Single Sided Modified Square Loop UWB Frequency Selective Surface," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 5, pp. 1423–1432, Oct. 2021, doi: 10.1109/TEMC.2021.3063143.
- [11] M. Saikia, S. Ghosh, and K. V. Srivastava, "Design and Analysis of Ultrathin Polarization Rotating Frequency Selective Surface Using V-Shaped Slots," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 2022–2025, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2693685.
- [12] B. Döken and M. Kartal, "Easily Optimizable Dual-Band Frequency-Selective Surface Design," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 2979–2982, Sep. 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2756118.
- [13] L. Zhou, J. Ouyang, F. Yang, and Y. Liu, "Fast Performance Prediction of Cascaded Bandpass Frequency Selective Surfaces Operating in Circular Polarization Including Oblique Incidence," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 790–793, 2016, doi: 10.1109/LAWP.2015.2475129.
- [14] S. Chen, T. Pan, Z. Yan, L. Dai, Y. Peng, M. Gao, and Y. Lin, "Flexible Serpentine-like Frequency Selective Surface for Conformal Applications With Stable Frequency Response," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 7, pp. 1477–1481, Jul. 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2920369.
- [15] A. S. Emhemmed, L. S. Jerbi, and N. A. Ahmed, "Modeling and Design of Reconfigurable Multi-Band Frequency Selective Surface," in *2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, MI-STA 2021-Proceedings*, Tripoli, Libya, 25–27 May 2021, pp. 837–841, doi: 10.1109/MI-STA52233.2021.9464523.
- [16] H.-H. Chou and G.-J. Ke, "Narrow Bandpass Frequency Selective Surface With High Level of Angular Stability at Ka-Band," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 31, no. 4, pp. 361–364, Apr. 2021, doi: 10.1109/LMWC.2021.3054016.
- [17] G. S. Paul and K. Mandal, "Polarization-Insensitive and Angularly Stable Compact Ultrawide Stop-Band Frequency Selective Surface," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 9, pp. 1917–1921, Sep. 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2933545.
- [18] J. Poojali, S. Ray, B. Pesala, K. C. Venkata, and K. Arunachalam, "Quad-Band Polarization-Insensitive Millimeter-Wave Frequency Selective Surface for Remote Sensing," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 1796–1799, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2679204.
- [19] K. Hettak and J. Shaker, "Screen-Printed Dual-Band Flexible Frequency Selective Surface for 5G Applications," in *49th European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, 1–3 Oct. 2019, pp. 519–522.
- [20] X. Song, Z. Yan, T. Zhang, C. Yang, and R. Lian, "Triband Frequency-Selective Surface as Subreflector in Ku-, K-, and Ka-Bands," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 1869–1872, 2016, doi: 10.1109/LAWP.2016.2542185.
- [21] L. Martinez-Lopez, R. Martinez-Lopez, A. E. Martynyuk, J. Rodriguez-Cuevas, H. Fabian-Gongora, and J. I. Martinez-Lopez, "Close Band Spacing Pentaband Frequency Selective Surfaces Based on Concentric Ring Slots," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 57886–57896, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072592.
- [22] A. Kapoor, R. Mishra, and P. Kumar, "Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4263–4293, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.09.046.
- [23] B. S. da Silva, A. L. P. de Siqueira Campos, and A. G. Neto, "Equivalent circuit model for analysis of frequency selective surfaces with ring and double concentric ring apertures," *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 7, pp. 600–607, 2020, doi: 10.1049/iet-map.2019.0760.