

COMPARACIÓN DE CORRELACIÓN DE ARREGLOS DE ANTENAS DE MICROCINTA CON DIFERENTES SUSTRATOS

CORRELATION ASSESSMENT OF MICROSTRIP ANTENNA ARRAYS WITH DIFFERENT SUBSTRATES

Víctor Manuel Hinostrza Zubía

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
vhinostr@uacj.mx

Héctor Garcés Guzmán

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
hgarces@uacj.mx

Recepción: 28/octubre/2021

Aceptación: 20/diciembre/2021

Resumen

Los arreglos de antenas se han convertido en una pieza central de la mayoría de los sistemas de comunicación, sin embargo, su diseño y la evaluación sigue siendo un desafío. Un parámetro clave es la matriz de correlación, que relaciona los patrones de la antena y la propagación multitrayectoria. El propósito de este trabajo es hacer una comparación entre arreglos de antenas con diferentes sustratos tomando como base la correlación entre antenas. Para cumplir con el objetivo se simuló prototipos de arreglos de antenas con la misma geometría y diferentes sustratos. En cada uno de estos arreglos se utilizaron la misma cantidad de antenas; cuatro antenas. Todas estas simulaciones se realizarán en la frecuencia de 3500 MHz, la cual será una de las frecuencias principalmente utilizadas para la 5ª Generación de telefonía celular debajo de 6 GHz.

Palabras Clave: Arreglos de antena, directividad, microcinta, parámetros S, parche.

Abstract

Antenna arrays have become a centerpiece of most communication systems, yet their design and evaluation remain a challenge. A key parameter is the correlation matrix, which relates antenna patterns and multipath propagation. The purpose of

this work is to make a comparison between antenna arrays with different substrates based on the correlation between antennas. To meet the objective, prototypes of antenna arrays with the same geometry and different substrates were simulated. In each of these arrays the same number of antennas were used; 4 antennas. All these simulations will be carried out on the 3500 MHz frequency, which will be one of the frequencies mainly used for the 5G cell phone generation below 6 GHz.

Keywords: Antenna arrays, directivity, microstrip, patch, S-parameters.

1. Introducción

El teléfono celular es la tecnología de comunicación que se ha adoptado con mayor rapidez en el mundo, debido a que se ha adecuado a todo tipo de usuarios; jóvenes, adultos, niños, hombres y mujeres, para cubrir diversas necesidades de la vida cotidiana tales como; mantener las relaciones familiares y amistosas, para manejar la rutina y no se diga como instrumento de trabajo. El teléfono móvil ha agregado una nueva dimensión a la movilidad de las personas de poder estar conectadas, teóricamente, en todo momento y en todos los lugares.

Estamos en la era de las telecomunicaciones, cada día surgen nuevas funciones y aplicaciones para conectar personas y objetos. La cantidad de datos consumidos crece más cada día, junto con las expectativas de una creciente sociedad tecnológica, más inteligente y con mejores servicios. En los próximos años, se espera un crecimiento exponencial del número de dispositivos conectados, así como el volumen de tráfico de datos. La nueva generación de comunicaciones móviles, 5G tiene como objetivo dar respuesta a este avance de la tecnología, proporcionando un aumento de capacidad, cobertura, conectividad, eficiencia energética y reducción de costos. Las redes 5G permitirán la comunicación en cualquier lugar desde los densamente poblados hasta los más remotos lugares.

Las aplicaciones de 5G se pueden agrupar en tres grupos principales, cada uno con necesidades y prioridades propias: Internet de las Cosas (IoT), servicios de misión crítica y dispositivos móviles mejorados de banda ancha [Shiu, 2000], [Vaughan, 2003]. IoT se refiere a comunicaciones de bajo consumo y costo, que habitualmente consisten en conectar cientos de sensores y tienen aplicaciones típicas en

agricultura, automatización, hogares y ciudades inteligentes. Los servicios de misión crítica requieren características de alta rendimiento, baja latencia, alta confiabilidad y seguridad; tienen aplicación en vehículos autónomos, drones y otras aplicaciones críticas. La banda ancha móvil mejorada se refiere a un alto rendimiento, amplia cobertura y servicio de Internet más rápido [Vaughan, 2003].

Una antena inteligente es aquella que responde de alguna manera a su entorno electromagnético para mejorar una métrica de rendimiento específica, al hacerlo puede proporcionar, por ejemplo, una mayor inmunidad a la interferencia o un nivel de señal reducido hacia un receptor vulnerable [Vaughan, 2003]. En general, el suministro de estas capacidades requiere el uso de antenas de elementos múltiples con control sobre la excitación de cada elemento.

Los sistemas de múltiples antenas se han convertido en una pieza clave en la tecnología para comunicaciones inalámbricas, esta tecnología permite sistemas de múltiples entradas, múltiples salidas (MIMO) y otras técnicas de diversidad. Los nuevos sistemas inalámbricos, actualmente denominados colectivamente como 5G, utilizarán un número cada vez mayor de antenas. Una métrica de rendimiento clave para sistemas de múltiples antenas es la matriz de correlación de la antena. Numerosos estudios han demostrado que la correlación entre los puertos de antena disminuye la capacidad del canal inalámbrico [Guo, 2001], [Shiu, 2000], [Shin, 2003], [Vaughan, 2003].

El espectro disponible para la 5G, asignado por el Third Generation Partnership Project (3GPP), se subdivide en bandas por debajo de 6 GHz y por encima de 6 GHz (en el rango de las ondas milimétricas; a 28 GHz y 39 GHz). Por lo tanto, las redes 5G deberían tener sistemas de RF que tengan suficiente versatilidad para adaptarse a diferentes escenarios, que sean altamente eficientes e integrados. Para afrontar los nuevos retos de las comunicaciones 5G (en diferentes escenarios de aplicación) y para permitir el filtrado espacial. Por tanto, se necesitan arreglos de antenas, con la capacidad de dirigir su radiación y la formación de haces, así como una mayor cobertura, mediante el uso de adaptadores. El uso de la formación de haces permite también superar problemas de propagación que se observan al operar en las frecuencias de ondas milimétricas. Estos arreglos constarán de

decenas de elementos radiantes, controlados individualmente para permitir dirigir su haz. [Mak, 2000].

Este artículo estudia la correlación de un conjunto de arreglos de antenas de parche de banda ancha con bandas múltiples que se pueden usar en la comunicación de los sistemas 5G. Las antenas parche tienen varias formas y una estructura multicapa en su conjunto. Los materiales de construcción usan distintos sustratos dieléctricos tales como; aire, FR4, Teflón, y Plexiglás que son de bajo costo y convenientes para el procesamiento. Los parches de las antenas son alimentados por una línea de transmisión estándar de 50 Ohm. La estructura general es compacta y trata de obtener un ancho de banda del 15% en la banda de 3 GHz a 6 GHz, cubriendo la banda de comunicación 5G convencional actual y las bandas 3G-4G. Además, dado que las antenas de parche diseñadas tienen un ancho de banda mayor a los 50 MHz en diferentes frecuencias y precisamente donde algunos países y regiones pretenden liberar bandas para comunicación 5G.

2. Métodos

Las antenas de microcinta poseen diversas ventajas respecto a las antenas convencionales de microondas, una de ellas, que pueden cubrir fácilmente una amplia gama de frecuencias, normalmente de los 100 MHz a los 100 GHz. Las principales ventajas del uso de estas antenas son: volumen reducido y perfil plano, bajo costo de fabricación, facilidad de producción en serie, obtención de polarizaciones lineales y circulares, simplicidad en las aplicaciones e integración en los circuitos de microondas. Sin embargo, tienen algunas limitaciones tales como: banda estrecha, ganancia baja, la mayor parte de las antenas microcinta irradian solamente sobre el espacio superior referente al plano, dificultad para conseguir una polarización 'pura', compleja red de alimentación en arreglos y excitación de ondas superficiales.

Una antena de microcinta consiste en un parche conductor de cualquier geometría plana o no plana sobre un sustrato dieléctrico con un plano de tierra al otro lado. También se les conoce como antenas de parche o impresas. Estas antenas son usadas en diversas aplicaciones, tales como: radares, GPS, comunicaciones

móviles, aplicaciones aeronáuticas, aplicaciones médicas, etc. Sus características físicas largo L , ancho W , altura del sustrato H y la constante dieléctrica del sustrato ϵ determinan sus características eléctricas, ver figura 1.

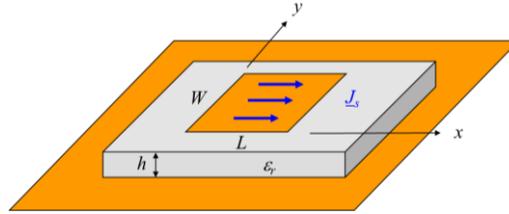


Figura 1 Parámetros de una antena de parche con microcinta.

La radiación de la microcinta ocurre desde los campos laterales entre los extremos de la superficie del parche y el plano de tierra. Se asume que no hay variación en el campo eléctrico a lo largo del ancho y grueso del elemento radiador, sino que únicamente hay variación a lo largo de la longitud del parche, el cuál usualmente es media longitud de onda ($\lambda/2$).

Utilizando el modelo de línea de transmisión, la antena de microcinta es modelada como dos espacios radiantes separados por una distancia L . La frecuencia de resonancia está determinada por (Ecuación 1), donde m y n son los modos de transmisión, donde el modo dominante es el 1,0. ϵ_{reff} es la constante dieléctrica efectiva de una línea de transmisión de microcinta [Pozar, 1995]:

$$f_{mn} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2} \quad (1)$$

El ancho de banda de la antena está determinado principalmente por ecuación 2.

$$BW = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[l_d + \left(\frac{R_s^{ave}}{\pi\eta_0}\right) \left(\frac{1}{\frac{h}{\lambda_0}}\right) + \left(\frac{16}{3}\right) \left(\frac{pc_1}{\epsilon_r}\right) \left(\frac{h}{\lambda_0}\right) \left(\frac{W}{L}\right) \left(\frac{1}{e_r^{hed}}\right) \right] \quad (2)$$

Donde destacan los parámetros W , L , h y ϵ . Para una antena con mínimas pérdidas, el ancho de banda es aproximadamente proporcional al ancho del parche y al grosor del sustrato e inversamente proporcional a la permitividad del sustrato. Para sustratos muy delgados, el ancho de banda aumentará para un parche con pérdida, pero a expensas de la eficiencia.

$$D = \left(\frac{3}{pc_1}\right) \left[\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + \tan^2(k_1 h)}\right] (\tan^2(k_1 h)) \quad (3)$$

En ecuación 3 se muestra cómo se determina la directividad de la antena, de nuevo los parámetros indican relación con los parámetros W , L , h y ϵ . Asimismo, p y c_1 dependen de W , L y ϵ .

$$Z_{in} \approx j\omega L_p + \frac{R}{1 + jQ\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)} \quad (4)$$

En ecuación 4 se muestra la impedancia de entrada. Cerca de la frecuencia de resonancia, el parche se puede modelar aproximadamente como un circuito RLC resonante. La resistencia R representa la radiación y las pérdidas eléctricas. Se agrega una inductancia de entrada L_p en serie, para tener en cuenta la inductancia de la alimentación. El coeficiente de correlación es la relación entre las señales entrantes en los puertos de antena en un arreglo. El acoplamiento mutuo en los sistemas de arreglos degrada el rendimiento de estos. El coeficiente de correlación entre antenas se utiliza como métrica de rendimiento en sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) para cuantificar el rendimiento del sistema y la eficiencia de las antenas. Al utilizar el coeficiente de correlación, un diseñador de sistemas MIMO debe comprender el nivel de acoplamiento que existe entre los puertos de antena del sistema. Minimizar el acoplamiento mutuo implicaría reducir el coeficiente de correlación entre los pares de puertos. Los diseñadores de antenas utilizan dos enfoques para calcular el coeficiente de correlación: el patrón de radiación de campo lejano y los parámetros S . El coeficiente de correlación de un sistema de arreglo de dos antenas es [Shiu, 2000] (Ecuación 5).

$$\rho_e = \frac{\left| \iint_{4\pi} \left[\vec{F}_1(\theta, \phi) \cdot \vec{F}_2(\theta, \phi) \right] d\Omega \right|}{\iint_{4\pi} \left| \vec{F}_1(\theta, \phi) \right|^2 d\Omega \iint_{4\pi} \left| \vec{F}_2(\theta, \phi) \right|^2 d\Omega} \quad (5)$$

$F_i(\theta, \phi)$ es el patrón de radiación del sistema de antena cuando el puerto i está excitado. Calcular el coeficiente de correlación usando esta fórmula requiere conocer el patrón de radiación de la antena. Este enfoque es difícil de aplicar y requiere mucho tiempo de procesamiento.

Matlab utiliza la caracterización de parámetros S para calcular la correlación entre los elementos de la antena en un arreglo. Este enfoque es más simple que el enfoque de campo lejano porque el cálculo del parámetro S no utiliza los patrones de radiación de las antenas. El coeficiente de correlación se calcula usando los parámetros S con la ecuación 6.

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2))(1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2))} \quad (6)$$

Las ventajas de este método es un análisis rápido y resultados de correlación de banda ancha. Sin embargo, este enfoque supone que las antenas no tienen pérdidas y que las ondas entrantes se distribuyen uniformemente.

En ocasiones se sugiere utilizar sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) con estados ortogonales de polarización eléctrica y magnética para aprovechar al máximo las dimensiones de la antena. En términos generales, los coeficientes de correlación más bajos entre los canales dan como resultado una mayor capacidad del sistema, sin embargo, para MIMO dipolos ortogonales de antenas eléctrica y magnética, el sistema en condiciones ideales de correlación cero puede funcionar peor que alguna condición real con coeficientes de correlación específicos. Se ha encontrado que pares específicos de antenas de dipolos de antenas eléctricas o magnéticas pueden lograr tales coeficientes de correlación, que los hacen funcionar mejor que las antenas MIMO polarizadas [Ling, 2019], [Vaughan, 2020].

3. Resultados

En esta sección, mostraremos los resultados de los prototipos de un arreglo de antena con diferentes sustratos usando la misma geometría, algunos de los sustratos simulados, fueron los siguientes; aire, FR4, Teflón y Plexiglás. La geometría fue un arreglo rectangular de cuatro antenas circulares.

En la figura 2 se muestran la directividad del arreglo de antena con la configuración rectangular de cuatro antenas. Las antenas con sustrato de aire presentan un máximo de señal transmitida de 15.1 dBi. Mientras que las de sustrato FR4 presentan un máximo de señal de 8.13 y 8.62 dBi. Con el sustrato FR4 existe mayor

dispersión de la señal al nivel de tablilla, acentuándose esta característica mientras más antenas tenemos en el arreglo.

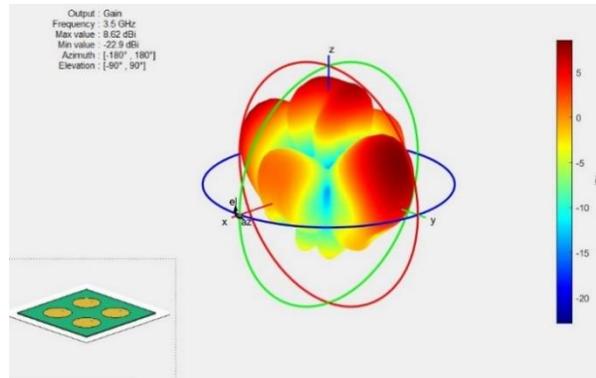


Figura 2 Directividad 3D del arreglo de antenas.

En la figura 3 se muestran los parámetros S del arreglo de antenas con la configuración rectangular de cuatro antenas con sustrato de aire. También en la misma figura la configuración circular de 4 elementos con sustrato FR4. Los parámetros del arreglo rectangular de sustrato de aire es que presenta mejor respuesta alrededor de la frecuencia de 3.5 GHz.

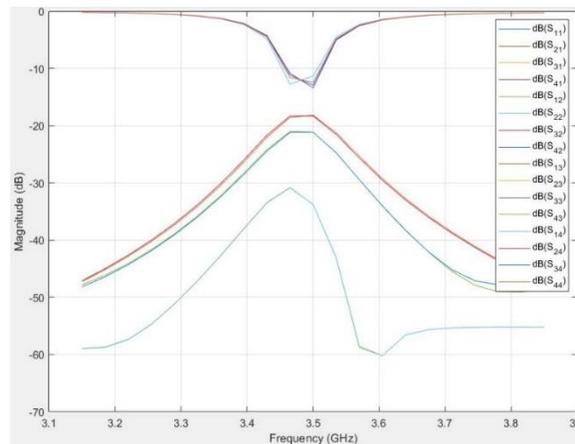


Figura 3 Ejemplo de parámetros S del arreglo de antenas.

La respuesta del arreglo circular de sustrato de aire presenta un corrimiento en la frecuencia central hasta 3.3 en lugar de 3.5 GHz. Mientras que los arreglos con sustrato FR4, también presentan este corrimiento. En la figura 4, se muestra la

geometría usada para las simulaciones, es un arreglo rectangular de cuatro antenas circulares con un diámetro de 20 milímetros.

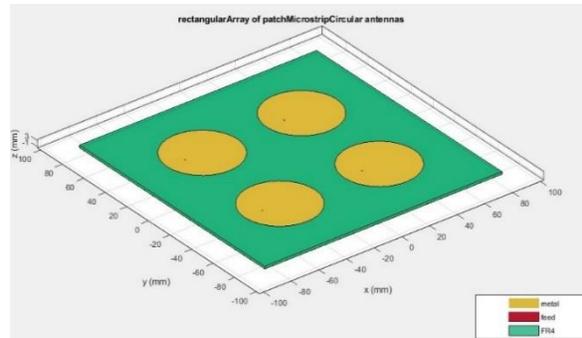


Figura 4 Geometría del arreglo usado para las simulaciones.

En la figura 5 se muestra la correlación entre diferentes elementos del arreglo de antenas con la configuración circular de 4 elementos con sustrato FR4. Con este sustrato se observa que, en general, en todas las combinaciones de elementos la correlación es baja, menor a 0.15. Aunque también en todas las combinaciones hay una tendencia a tener fluctuaciones según se incrementa el ancho de banda.

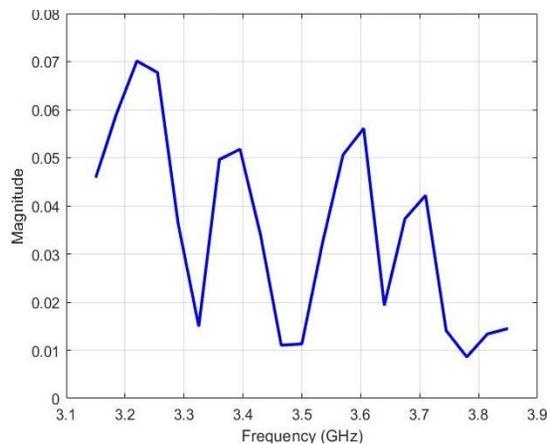


Figura 5 Correlacion entre dos elementos del arreglo de antena.

En la figura 6 se muestra la comparación de los elementos 1 y 2 (esquinas superiores derecha e izquierda) de la correlación del arreglo. Se observa en la figura que, la más alta correlación corresponde al sustrato de Plexiglás, mientras que las correlaciones de los demás sustratos son relativamente bajas. Si nos enfocamos en

la frecuencia de interés 3.5 GHz, lo anterior también se cumple. Los elementos 1 y 2, son lo que están físicamente más cercanos y, por lo tanto, son los que deben de mostrar mayor correlación relativa. En la figura 7 se muestra la comparación de los elementos 1 y 3 (esquina superior izquierda y esquina inferior izquierda) de la correlación del arreglo. Se observa en la figura que la más alta correlación corresponde ahora al sustrato de Teflón, mientras que las correlaciones de los demás sustratos continúan relativamente bajas.

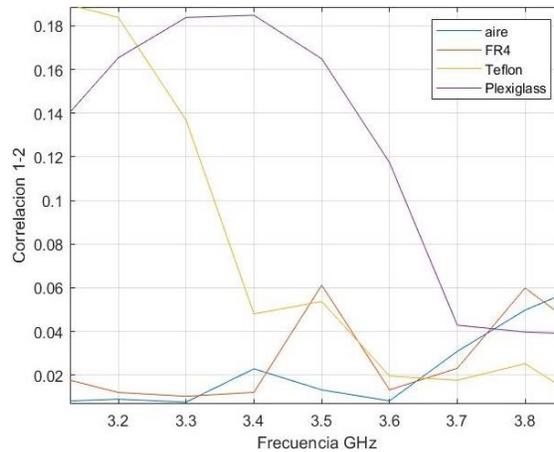


Figura 6 Comparación de correlación entre elementos 1 y 2 con diferentes sustratos.

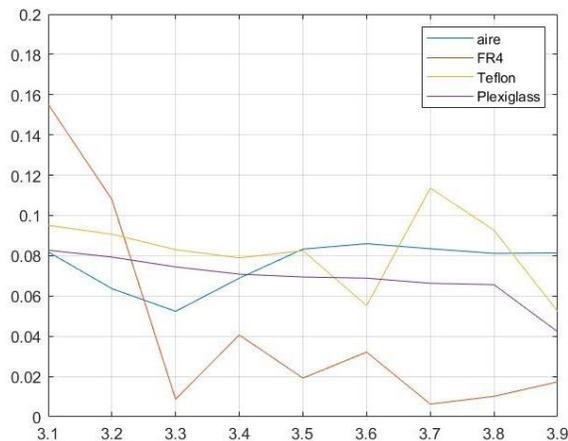


Figura 7 Comparación de correlación entre elementos 1 y 3 con diferentes sustratos.

Si nos enfocamos en la frecuencia de interés 3.5 GHz, lo anterior también se cumple. Los elementos 1 y 3, también son lo que están físicamente más cercanos y, por lo tanto, son los que deben de mostrar mayor correlación relativa.

En la figura 8 se muestra la comparación de los elementos 1 y 4 (esquina superior derecha y esquina inferior izquierda) de la correlación del arreglo. Se observa en la figura que la más alta correlación corresponde de nuevo al sustrato de Plexiglás, mientras que las correlaciones de los demás sustratos continúan relativamente bajas. En general estas correlaciones son bajas considerando el hecho de que los elementos 1 y 42 son lo que están físicamente más lejanos y, por lo tanto, son los que deben de mostrar menor correlación relativa.

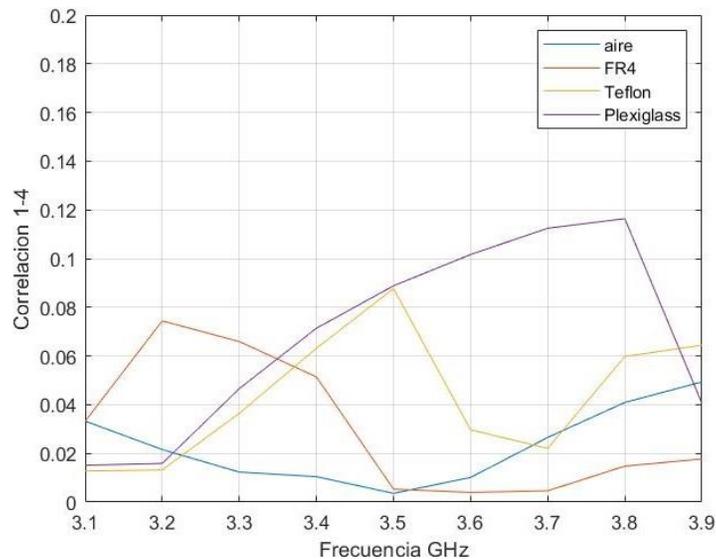


Figura 8 Comparación de correlación entre elementos 1 y 4 con diferentes sustratos.

4. Discusión

Los resultados de las simulaciones muestran que la correlación es baja en este arreglo con todos los sustratos utilizados. Considerando todos los pares de elementos el sustrato que tiene menor correlación, en promedio, fue el FR4. Coincidentemente el de mayor constante dieléctrica. Aunque el aire muestra valores promedio bajos, similares al FR4 y es el sustrato con menor constante dieléctrica. En promedio también, el sustrato Plexiglás muestra la mayor correlación considerando todos los pares de elementos.

En los resultados también se observa que, al aumentar la frecuencia la propensión de que las correlaciones tienden a coincidir en la parte alta de frecuencia. Asimismo, se observa que, con todos los pares de elementos y en la frecuencia de interés, la

correlación no excede el valor de 0.1, excepto con el sustrato de plexiglás en los elementos 1 y 2.

5. Conclusiones

En este trabajo se tuvo el propósito de simular un arreglo de antenas con la misma geometría usando la tecnología de microcinta, para la finalidad de investigar su funcionamiento específicamente en lo que se refiere a correlación entre elementos de antena para su uso en frecuencias de redes móviles de 5G. La correlación entre antenas es un parámetro de sistema importante en comunicaciones inalámbricas y es difícil de medir con precisión. También se encontró que la correlación tiende a ser baja en los diversos arreglos simulados. Una manera fácil de disminuir esta correlación sería aumentar la separación física entre elementos, pero significaría aumentar el tamaño de los arreglos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Boon-Kok T., Stafford W., Ghassan Y., A Compact Microstrip-Fed Planar Dual-Dipole Antenna for Broadband Applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Volume:15, pp. 596 – 599, 2016.
- [2] Chiani M., Win M. Z., and Zanella A., On the capacity of spatially correlated MIMO Rayleigh-fading channels, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2363–2371, Oct. 2003.
- [3] Fong, K. F., and Luk, K. M., *Microstrip Patch Antennas*, Imperial College Press, 2011.
- [4] Garg, R., *Microstrip Antenna Design Handbook*, London: Artech House, Inc. 2., 2001.
- [5] Guo, Y. X., Mak, C. L., Luk, K. M., and Lee K. F., Analysis and design of L-probe proximity fed-patch antennas, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 2, pp. 145–149, Feb. 2001.
- [6] Lai, H. M., and Luk, K. M., Design and study of wide-band patch antenna fed by meandering probe, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, pp. 564–571, Feb. 2006.

- [7] Lai, H. M., and Luk, K. M., Wideband stacked patch antenna fed by meandering probe, *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 6, pp. 297–298, Mar. 2005.
- [8] Ling, Shi-Fan, Ye-rong., 2x2 Polarized MIMO Antenna Selection Based on Correlation Coefficients, 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), China, Agosto 2019.
- [9] Luk, K.M., Mak, C. L., Chow, Y. L., and Lee, K.F., Broadband microstrip patch antenna, *Electron Letters*, vol. 34, no. 15, pp. 1442–1443, Jul. 1998.
- [10] Mak, C. L., Lee, K. F., and Luk, C. M., Broadband patch antenna with a T-shaped probe, *IEE Proc.-Microw., Antennas Propag.*, vol. 147, no. 2, pp. 73–76, Apr. 2000.
- [11] McKay, M. R. and Collings, I. B., General capacity bounds for spatially correlated rician MIMO channels, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 9, pp. 3121–3145, Sep. 2005.
- [12] Ooi, B. L., Lee, C. L., Kooi, P. S., and Chew, S. T., A novel F-probe fed broadband patch antenna, in *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, pp. 474–477, 2001.
- [13] Pozar, D. M. and Schaubert, D. H., Editors *Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*, Wiley/IEEE Press, 1995.
- [14] Shiu, Foschini, Gans, and Kahn, Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems, *IEEE Trans. Communications*, vol. 48, no. 3, pp. 502–513, Mar. 2000.
- [15] Shin and Lee, Capacity of multiple-antenna fading channels: Spatial fading correlation, double scattering, and keyhole, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2636–2647, Oct. 2003.
- [16] Vaughan and Andersen, *Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications (Electromagnetic Waves Series)*. London, U.K.: The Institution of Engineering and Technology, 2003.
- [17] Vaughan and Hynes, A Benchmark for Antenna Correlation Measurements, in *Proc. IEEE Trans. Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, Vol 68, número 9, pp. 6624 – 6635, junio 2020.