

Antena de cuatro puertos de banda ancha con bloque aislante para estaciones base 5G Sub-6 GHz

J.Molins-Benlliure⁽¹⁾, E.Antonino-Daviu⁽¹⁾, M.Cabedo-Fabrés⁽¹⁾,
M.Ferrando-Bataller⁽¹⁾, L.Jofre-Roca⁽²⁾, L. Juan-Llacer⁽³⁾

⁽¹⁾Universitat Politècnica de València, ⁽²⁾Universitat Politècnica de Catalunya, ⁽³⁾Universidad Politécnica de Cartagena

Resumen—Este artículo propone una antena de cuatro puertos con respaldo de cavidad de banda ancha para aplicaciones de estaciones base interiores. La antena está compuesta por una cavidad abierta de forma cuadrada con un bloque aislante en forma de X situado en el centro y 4 monopolos dispuestos de forma simétrica en la apertura de la cavidad. Para su diseño se ha utilizado una metodología basada en el análisis de modos característicos (CMA) para identificar los modos que contribuyen al acoplamiento y justificar el uso del bloque en forma de X para incrementar el aislamiento entre puertos. La antena dispone de cuatro diagramas de radiación unidireccionales y un ancho de banda ($S_{11} < -10$ dB) que opera desde 1.55 hasta los 6 GHz (118%), cubriendo la mayoría de las bandas 5G sub-6 GHz. El aislamiento entre puertos es de mínimo 16 dB y la eficiencia superior al 84%. La antena es de fácil fabricación y presenta un tamaño compacto de $129.5 \times 129.5 \times 28.2$ mm³ ($0.68\lambda \times 0.68\lambda \times 0.15\lambda$, a la frecuencia mínima $f=f_{min}=1.55$ GHz).

I. INTRODUCCIÓN

El despliegue inicial del sistema de comunicaciones inalámbricas 5G se está realizando en las bandas conocidas como sub-6 GHz. Estas bandas tienen la ventaja de la compatibilidad con la infraestructura ya desplegada de los sistemas inalámbricos anteriores. Actualmente, existe una creciente demanda de antenas para ser instaladas en de estación base 5G interiores.

Artículos recientes proponen soluciones de antenas multibanda mediante dipolos cruzados [1], dipolos asimétrico y parches parásitos [2] o un reflector magnético artificial [3]. En cuanto a las soluciones de banda ancha, en [4] se propone un diseño con un monopolo con dos mangas, y en [5] uno de tres puertos mediante dipolos escalonados. La tecnología multiple-input multiple-output (MIMO) es una característica muy demandada para aumentar las tasas de datos en las estaciones base 5G. Un sistema que incluye MIMO requiere antenas con puertos aislados y diagramas de radiación independientes con un coeficiente de correlación de envolvente (ECC) bajo. En [6] se presenta una antena para sistemas MIMO compuesta por un parche y dos monopolos. Otro artículo reciente propone una antena de tipo parche en forma de anillo con cuatro puertos en [7]. Los autores de este trabajo presentaron en un artículo previo una antena para MIMO con 4 puertos independientes, pero con bajo aislamiento entre ellos [8].

El aislamiento entre puertos es un parámetro crítico, especialmente cuando se trata de soluciones con múltiples puertos en escenarios de espacio limitado. Algunas de las técnicas utilizadas para aumentar el aislamiento se basan en el uso de un elemento de desacoplamiento [9], una línea

de neutralización [10] o de polarizaciones ortogonales [11]. Además, el análisis de modos característicos (CMA) se ha utilizado en varios artículos para excitar modos ortogonales aumentando el aislamiento en antenas para sistemas MIMO [12]- [13].

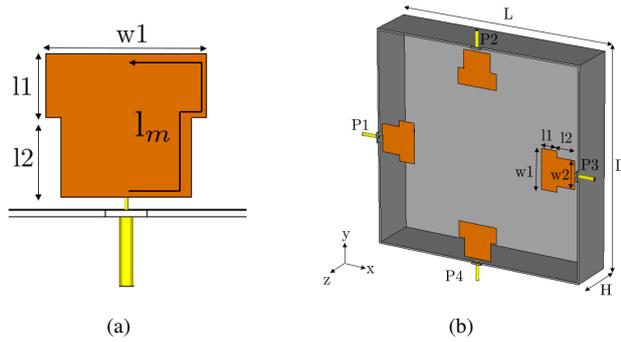
En este artículo, se propone una antena de cuatro puertos con respaldo de cavidad de banda ancha para su instalación en una estación base interior 5G. El diseño consta de 4 monopolos en forma de T dispuestos de forma simétrica en el centro de los 4 lados de la cavidad abierta. Se ha incluido un bloque en forma de X en el centro de la cavidad para aumentar el aislamiento entre los puertos. El diseño proporciona cuatro diagramas de radiación unidireccionales independientes con alta eficiencia, capacidad MIMO y un ancho de banda elevado. En el diseño propuesto, se utiliza por primera vez el análisis de modos característicos (CMA) para el estudio una cavidad abierta alimentada por monopolos con la finalidad de desacoplar sus puertos.

II. DISEÑO INICIAL

Se ha realizado un diseño preliminar con la combinación de elementos de banda ancha. Como se muestra en la Fig. 1, el primer elemento escogido ha sido una cavidad cuadrada y abierta que puede exhibir un comportamiento unidireccional y de banda ancha si se excita adecuadamente. Aprovechando la simetría de la cavidad, se han colocado 4 alimentaciones independientes en una disposición simétrica y ortogonal en el centro de los cuatro bordes de la apertura de la cavidad (ver Fig. 1(b)).

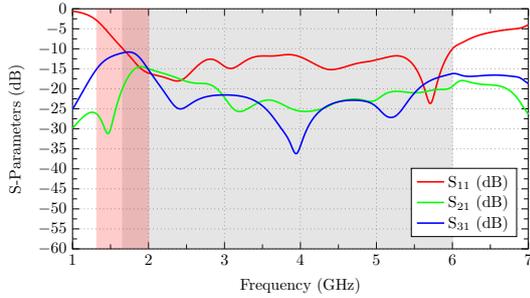
Para que el diseño tenga un comportamiento de banda ancha, la excitación debe ser también un elemento con gran ancho de banda. Es por ello que se han elegido monopolos en forma de T (mostrados en la Fig. 1(a)), ya que son fáciles de fabricar y presentan ancho de banda elevado.

La frecuencia mínima de operación está determinada por la longitud l_m (Fig. 1(a)) de los monopolos, ya que $l_m = \lambda/4$ a $f=f_{min}$. Además, se requiere una separación mínima de $\lambda/2$ ($f = f_{min}$) entre puertos para garantizar un acoplamiento mínimo. En este caso, se han incorporado cuatro alimentaciones (monopolos), lo que resulta en un perímetro de apertura de la cavidad mínima de 2λ . Teniendo en cuenta estas consideraciones, las dimensiones de la antena se han optimizado para operar en las bandas sub-6 GHz del sistema 5G. Las dimensiones finales de la estructura están detalladas en la Tabla I, lo que resulta en una antena con un tamaño total de $0.68\lambda \times 0.68\lambda \times 0.15\lambda$ (a $f=f_{min}$).



(a)

(b)



(c)

Fig. 1: a) Monopolo; b) Diseño Inicial; c) Parámetros S del diseño inicial. Dimensiones en Tabla 1.

L	H	w1	w2	l1	l2
130.5	29.2	24	18.5	9.5	11.5

TABLA I: Dimensiones del diseño inicial (unidades: mm)

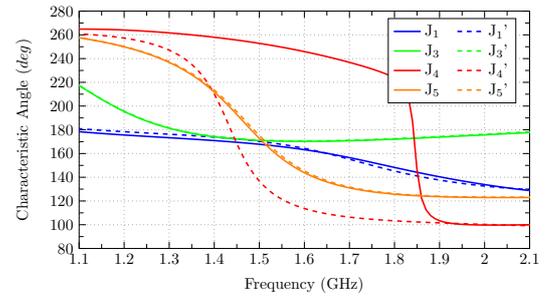
La Fig. 1(c) muestra los parámetros S simulados de este modelo preliminar. Como se puede observar, se trata de una solución de cuatro puertos de banda ancha prometedora con el inconveniente de un aislamiento bajo entre puertos, especialmente entre los puertos adyacentes P1 y P2 a 1.35-2 GHz (ver área roja y S_{21} en la Fig. 1(c)).

III. ANÁLISIS DE MODOS CARACTERÍSTICOS

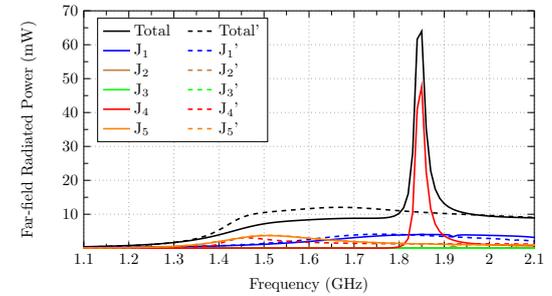
Las cavidades cuadradas cerradas se describen en la teoría electromagnética mediante los modos de cavidad. En el caso de una cavidad abierta, la información no es tan detallada y la inclusión de los elementos de alimentación no se consideraría en un análisis de modos de cavidad. Para un análisis adecuado, proponemos el uso de la teoría de modos característicos (TCM) [14].

Para facilitar el estudio, debido a la complejidad de la estructura, el análisis modal de la estructura se ha limitado al rango de frecuencia de 1.1 a 2.1 GHz, considerando solo los modos característicos de orden bajo, incluyendo la banda de 1.55-2 GHz que tiene problemas de acoplamiento. La identificación de los primeros modos resonantes a bajas frecuencias ayuda a comprender el comportamiento de la antena a frecuencias más altas.

La Fig. 2(a) muestra la variación del ángulo característico con la frecuencia de los primeros modos resonantes (J_n) del diseño inicial (líneas continuas) descrito en la Fig. 1, cuyas dimensiones se corresponden con las de la Tabla I. Dado que J_1 y J_2 son modos degenerados, solo se presenta



(a)



(b)

Fig. 2: a) Ángulo característico del diseño inicial (curvas continuas) y diseño final (curvas discontinuas); b) Contribución en potencia en campo lejano del diseño inicial (curvas continuas) y diseño final (curvas discontinuas).

el ángulo característico de J_1 . Como se observa, todos los modos analizados resuenan ($\alpha_n=180^\circ$) por debajo de 2 GHz. La Fig. 3 muestra la distribución de corriente asociado a cada modo en resonancia. J_1 (Fig. 3(a)) y J_2 (Fig. 3(b)) son los modos fundamentales horizontal y vertical, J_3 (Fig. 3(c)) es un modo con corriente nulos en las esquinas de la cavidad y con corriente máxima en el centro de las paredes exteriores de la cavidad. J_4 (Fig. 3(e)) es un modo radial, en el que las corrientes fluyen desde el centro de la cavidad a los cuatro monopolos y E_4 (Fig. 4(b)) tiene un máximo en el centro de la cavidad, con dirección perpendicular. J_5 (Fig. 3(d)) tiene una distribución similar a la de J_3 pero en este caso los nulos actuales están en el centro de las paredes exteriores y no en las esquinas. En cuanto a la distribución del campo eléctrico de los modos (solo se muestra E_4) todos tienen una distribución TE excepto E_4 , que tiene una distribución de campo TM.

La Fig.2(b) presenta la contribución en potencia en campo lejano obtenida cuando se excita el puerto P1. De la gráfica se puede extraer que cuando el puerto P1 (o el puerto P3) está activo, solo los modos J_1 , J_4 y J_5 se excitan. Debido a su simetría, cuando el puerto P2 (o el puerto P4) está activo, solo los modos J_2 , J_4 y J_5 contribuirán a la potencia radiada. El modo J_3 no se excita en ningún caso.

También se observa que por debajo de 1.8 GHz no existe un modo dominante, pero una vez que el modo J_4 resuena (a 1.84 GHz), se vuelve dominante, contribuyendo con casi el total de la potencia radiada. En la Fig. 1(c) se puede ver que el acoplamiento máximo entre los puertos P1 y P2 ocurre exactamente cuando resuena el modo J_4 .

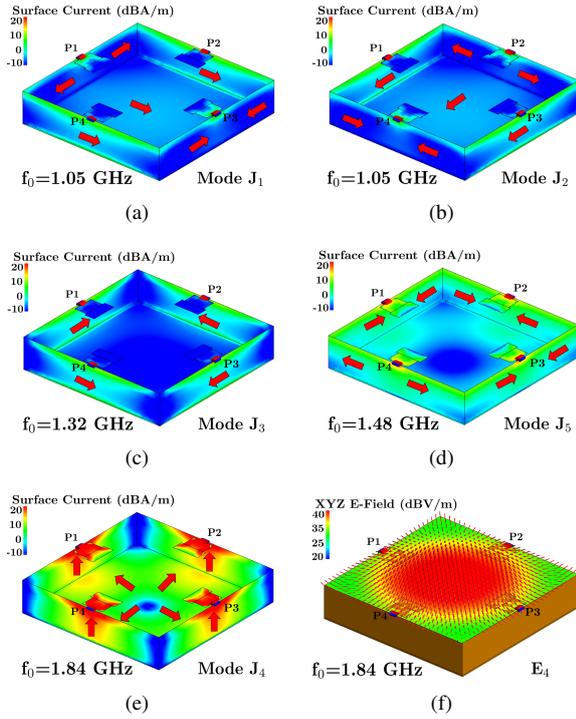


Fig. 3: Corriente modal J_n y campo eléctrico modal E_n : a) J_1 ; b) J_2 ; c) J_3 ; d) J_5 ; e) J_4 ; y f) E_4 .

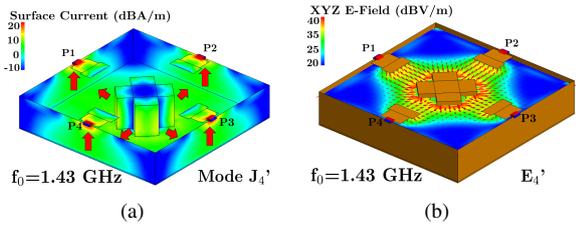


Fig. 4: a) Distribución de corriente modal J_4' , b) Distribución de campo eléctrico modal E_4'

IV. METODOLOGÍA PARA MEJORAR EL AISLAMIENTO

El diseño inicial presenta un aislamiento insuficiente entre puertos adyacentes entre 1.55 y 2 GHz. Se ha realizado un análisis de onda completa sin proporciona información clara sobre la naturaleza del acoplamiento, ya que las corrientes y campos totales son una combinación de varios modos. En la sección III, se ha aplicado CMA para identificar los modos de la cavidad cuadrada que se excitan cuando se alimenta con los monopolos. El objetivo de esta sección es utilizar CMA para identificar y atenuar los modos que están causando el acoplamiento.

Como se ha visto en el apartado anterior, la potencia radiada en campo lejano desde 1.55 a 2 GHz obtenida cuando se excita el puerto P1, se produce principalmente por la radiación de los modos J_1 y J_4 (Fig. 2(b)). La distribución del Modo J_1 (Fig. 3(a)) muestra que las corrientes asociadas a este modo fluyen desde el puerto P1 al puerto P3. Dado que este flujo de corriente es ortogonal a los puertos P2 y P4, se puede concluir que el modo J_1 no es responsable del alto acoplamiento observado entre puertos adyacentes. Por otro lado, el modo J_4

tiene una contribución muy elevada en potencia a la frecuencia en la que el acoplamiento entre los puertos P1 y P2 es máximo (Fig 1(c)). Además, la distribución de corriente del modo J_4 (Fig. 3(e)) muestra que este modo tiene una corriente mínima en el centro de la cavidad y las corrientes fluyen de forma radial hacia los cuatro monopolos. La intensidad de corriente asociada al modo J_4 es alta dentro de la cavidad y todos los puertos tienen corrientes inducidas, lo que se convierte en acoplamiento entre puertos.

El análisis modal revela que el modo J_4 es el responsable del alto acoplamiento entre puertos adyacentes. Como se ve en la Fig. 3(f), el campo eléctrico fluye en la dirección del eje z y exhibe un máximo en el centro de la cavidad. La solución utilizada para desvanecer este modo es colocar un bloque metálico en el centro de la cavidad en forma de X. Un bloque metálico colocado en el centro cancela el campo eléctrico en la dirección z, cambiando las condiciones de contorno de la cavidad. El diseño final se describe en la Fig. 5 y sus dimensiones se detallan en la Tabla II. En este nuevo escenario, la distribución de campo eléctrico E_4 del modo J_4 no puede existir. La geometría en forma de X ha sido escogida ya que atenúa el modo J_4 y además resulta casi inocuo para el resto de modos.

En la Fig. 2 se puede observar la comparativa del ángulo característico y la potencia radiada en campo lejano entre el diseño inicial (líneas continuas) y el diseño final (líneas discontinuas), en la banda que tenía problemas de acoplamiento (1,55-2 GHz). Los modos J_1 , J_2 y J_3 no se ven afectados por la inclusión del bloque (ver J_1' , J_2' y J_3' en la Fig. 4). Sin embargo, J_4 se desplaza a frecuencias más bajas (ver J_4') y el pico de potencia a 1,85 GHz se desvanece debido a la presencia del bloque en forma de X. La Fig. 4 ilustra la distribución del campo eléctrico y de corriente del modo J_4' . Su distribución de campo eléctrico no tiene ningún componente en el eje z y muestra una distribución de campo similar a TEM.

En conclusión, el modo J_4 es responsable del acoplamiento en el diseño inicial. Para mejorar el aislamiento, se usa un bloque para atenuar el modo J_4 y las nuevas condiciones de contorno crean un nuevo modo J_4' . El nuevo modo J_4' no tiene impacto en el acoplamiento porque sus campos eléctricos y magnéticos son máximos en el centro de la cavidad que rodea el bloque de aislamiento.

V. DISEÑO FINAL. FABRICACIÓN Y RESULTADOS

El diseño final incluye una PCB con un substrato Rogers R04003C ($\epsilon_r=3.55$, $\tan \delta = 0.0027$ y espesor $t=0.6$ mm) que contiene los 4 monopolos (Fig. 6(a)). Se ha recurrido al uso de una PCB para dar soporte mecánico a los 4 monopolos y facilitar el proceso de fabricación. La PCB está incluida en todos los resultados medidos y simulados del diseño final.

La cavidad y el bloque aislante en forma de X se han fresado en un bloque de aluminio y se ha colocado la PCB en la parte superior. Por último, se han instalado cuatro puertos coaxiales en los cuatro lados de la cavidad, soldando el conductor interno a cada monopolo. En la Fig. 6(b) se muestra el diseño final fabricado desmontado para identificar correctamente todos los componentes. En la Fig. 6(c) se muestran las medidas de parámetros S del diseño final medido y simulado.

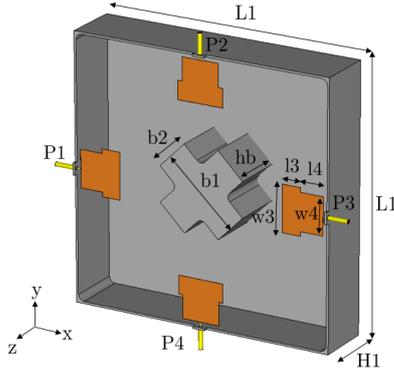


Fig. 5: a) Vista de la antenna final incluyendo la cavidad y el bloque en gris y los 4 monopolos en naranja. Dimensiones detalladas en la Tabla II.

L1	H1	w3	w4	l3	l4	b1	b2	hb
129.5	28.2	23.15	18.7	9.3	11.5	42.6	17.8	26.6

TABLA II: Dimensiones del diseño final (unidades: mm)

VI. CONCLUSIÓN

Se ha presentado una antenna de cuatro puertos de banda ancha con diagramas de radiación unidireccionales e independientes (no mostrado) para aplicaciones de estaciones base interiores. Las medidas y simulaciones muestran un ancho de banda ($S_{11} < -10$ dB) del 118 % (1.55-6 GHz), eficiencia total superior al 84 % (no mostrado), aislamiento entre puertos superior a 16 dB. La antenna tiene unas dimensiones de $129.5 \times 129.5 \times 28.2$ mm³ y proporciona cuatro puertos independientes en un espacio limitado gracias al uso de un bloque aislante que aumenta de 10.5 dB a 16 dB el aislamiento entre puertos. Además, el diseño no precisa de alimentación diferencial (limitaría el número de puertos independientes) evitando el uso de acopladores híbridos o baluns. Esta característica convierte esta antenna en una alternativa de fabricación sencilla y de bajo coste.

Para el diseño del bloque aislante, se ha utilizado una metodología basada en CMA para identificar los modos que provocaban el acoplamiento entre puertos en el diseño inicial. La descomposición de las corrientes y campos totales en corrientes y campos modales ha proporcionado información suficiente para identificar que el modo (J_4) era el causante del acoplamiento.

La antenna se ha fabricado fresando la cavidad en un bloque de aluminio y colocando una PCB con un substrato Rogers R04003C en la parte superior de la cavidad. El diseño propuesto es un buen candidato para ser instalado como antenna de una estación base interior 5G sub-6 GHz debido a su tamaño compacto, su número de puertos y su gran ancho de banda. Además, es compatible con la tecnología MIMO ya que incluye 4 puertos aislado con diagramas de radiación independientes.

REFERENCIAS

[1] A. Alieldin, Y. Huang, S. J. Boyes, M. Stanley, S. D. Joseph, Q. Hua, and D. Lei, "A triple-band dual-polarized indoor base station antenna for 2G, 3G, 4G and sub-6 GHz 5G applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 49 209–49 216, 2018.

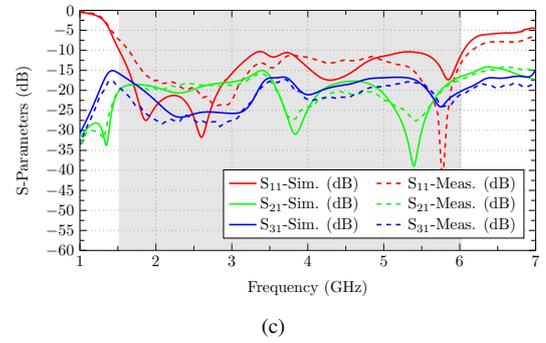
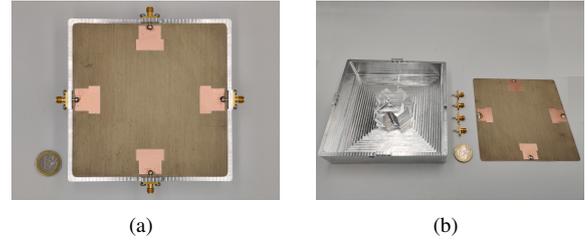


Fig. 6: a) Antena fabricada b) Antena desmontada c) Parámetros S medidos y simulados del diseño final.

[2] Q. Hua, Y. Huang, C. Song, M. O. Akinsolu, B. Liu, T. Jia, Q. Xu, and A. Alieldin, "A novel compact quadruple-band indoor base station antenna for 2G/3G/4G/5G systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 151 350–151 358, 2019.

[3] Q. Liu, H. Liu, W. He, and S. He, "A low-profile dual-band dual-polarized antenna with an amc reflector for 5G communications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 24 072–24 080, 2020.

[4] Z.-Y. Zhang, G. Fu, W.-J. Wu, J. Lei, and S.-X. Gong, "A wideband dual-sleeve monopole antenna for indoor base station application," *IEEE antennas and wireless propagation letters*, vol. 10, pp. 45–48, 2011.

[5] S. X. Ta, D. M. Nguyen, K. K. Nguyen, C. Dao-Ngoc, and N. Nguyen-Trong, "A tripolarized antenna with ultra-wide operational bandwidth," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020.

[6] Y. Zhao, C. Rakluea, T. Hongnara, and S. Chaimool, "A compact dual-broadband multiple-input multiple-output (MIMO) indoor base station antenna for 2G/3G/LTE systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82 238–82 245, 2019.

[7] K.-L. Wong, J.-Z. Chen, and W.-Y. Li, "Four-port wideband annular-ring patch antenna generating four decoupled waves for 5G multi-input-multi-output access points," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020.

[8] J. Molins-Benlliure, A. Llanga-Vargas, D. K. Park, M. Ferrando-Bataller, and M. Cabedo-Fabrés, "MIMO antenna for indoor low-band 5G base stations," in *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. IEEE, 2019, pp. 151–152.

[9] J.-N. Hwang and S.-J. Chung, "Isolation enhancement between two packed antennas with coupling element," *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, vol. 10, pp. 1263–1266, 2011.

[10] M. Singh and M. S. Parihar, "A compact 4×4 MIMO antenna with high isolation for 5G application," in *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. IEEE, 2019, pp. 688–690.

[11] S. Fu, Z. Cao, X. Quan, and C. Xu, "A broadband dual-polarized notched-band antenna for 2/3/4/5G base station," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 69–73, 2019.

[12] D.-W. Kim and S. Nam, "Systematic design of a multiport MIMO antenna with bilateral symmetry based on characteristic mode analysis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 3, pp. 1076–1085, 2017.

[13] J. Dong, S. Wang, and J. Mo, "Design of a twelve-port MIMO antenna system for multi-mode 4G/5G smartphone applications based on characteristic mode analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 90 751–90 759, 2020.

[14] R. Harrington and J. Mautz, "Theory of characteristic modes for conducting bodies," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 19, no. 5, pp. 622–628, 1971.