

# Estudio del Desalineamiento entre Capas para Reducir el Acoplamiento en Metasuperficies

Pablo Mateos-Ruiz, Elena Abdo-Sánchez, y Carlos Camacho-Peñalosa

{pablomr, elenaabdo, ccp}@ic.uma.es

Instituto Universitario de Investigación en Telecomunicación (TELMA), Universidad de Málaga,  
E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Bulevar Louis Pasteur 35, 29010, Málaga (España)

**Resumen**—La obtención de celdas unidad es un factor clave en el diseño de metasuperficies. Éstas suelen estar compuestas por varias capas de geometrías metálicas apiladas a través de sustratos. Para sintetizar unos parámetros  $S$  dados a partir de estas celdas, suelen usarse modelos circuitales sencillos. Sin embargo, éstos quedan comúnmente invalidados por los efectos del acoplamiento mutuo entre capas, lo que hace necesario recurrir a otros modelos más complejos y demandantes. Con el objetivo de evitarlo, este trabajo analiza el efecto del desalineamiento entre capas de las celdas en la disminución del acoplamiento mutuo. Para ello, se analiza detalladamente esta técnica en una celda de ejemplo, y luego se prueba en dos metasuperficies reales, comprobándose así su efectividad y limitaciones.

## I. INTRODUCCIÓN

El diseño de superficies periódicas ha ganado mucha relevancia en las últimas décadas debido a que es un factor clave en la realización de aplicaciones populares tales como superficies selectoras en frecuencia (FSS), reflectarrays/transmitarrays o, en mayor medida en los últimos años, metasuperficies. El atractivo fundamental de estas estructuras reside en su capacidad de transformar el campo electromagnético que incide en un plano. Para cada aplicación concreta, primero debe obtenerse la condición de contorno necesaria que debe presentar la estructura planar (diseño macroscópico) que, en general, requerirá de un estudio teórico distinto en cada caso. Sin embargo, cualquiera de estas superficies se enfrenta a la problemática general de cómo obtener el diseño físico que realmente sintetice las condiciones de contorno requeridas (diseño microscópico).

Estas superficies están formadas por celdas unidad eléctricamente pequeñas para así poder asumirse homogéneas, obteniendo un muestreo espacial fino de la condición de contorno teórica a implementar. La realización física más extendida para las celdas consta de varias capas de geometrías metálicas planas cascadeadas a través de dieléctricos, ya que es fácilmente fabricable con PCBs multicapa. Para poder caracterizar estas celdas de manera analítica, comúnmente se emplea un modelo circuital por el que las geometrías impresas son admitancias en paralelo que están conectadas por líneas de transmisión, que representan los sustratos entre las capas, siempre que no haya polarización cruzada [1]–[3].

Sin embargo, este modelo circuital solo funciona bien mientras el acoplamiento entre las geometrías de las distintas capas sea despreciable. Por tanto, si los sustratos usados son muy finos o presentan una baja permitividad, es necesario pasar a modelos que sean capaces de tener en cuenta los efectos del acoplamiento mutuo entre capas, considerablemente más complejos, cuando no se optimiza directamente mediante simulaciones electromagnéticas.

Por tanto, resultaría deseable poder reducir el acoplamiento entre capas para hacer que el sencillo modelo en línea de transmisión siga obteniendo resultados precisos. Este trabajo pretende evaluar la posibilidad de reducir el acoplamiento mutuo introduciendo un cierto grado de desalineamiento entre las capas. Para ello, se muestran algunos ejemplos de diseño de celdas unidad y el efecto que produce el desalineamiento en sus parámetros  $S$ , y se comprueba el potencial y las limitaciones de esta técnica a través de distintos diseños de metasuperficies.

## II. DISEÑO DE CELDAS UNIDAD

Considerando la suposición razonable de que las características de los sustratos a usar están fijas, el número de grados de libertad en el diseño de una celda unidad va ligado al número de capas usadas. El caso más general, como pueden ser las metasuperficies de Huygens bianisótropas (BHMS) [4], requiere de celdas unidad capaces de sintetizar parámetros  $S$  arbitrarios de bipuerto recíproco y sin pérdidas, lo cual se traduce en tres grados de libertad necesarios. Así, existe una solución analítica única que relaciona los tres grados de libertad de los parámetros  $S$  con las tres admitancias necesarias en el modelo circuital para sintetizarlos. Sin embargo, las geometrías impresas reales tendrán ciertas pérdidas, por lo que normalmente suelen usarse más capas para aumentar el espacio de soluciones posibles y quedarse con la que menos pérdidas totales ofrezca.

Una vez escogida la frecuencia y el sustrato, en este caso 15 GHz y Rogers RO3003 (espesor  $t = 60$  mil,  $\epsilon_r = 3$  y  $\tan \delta = 0.0013$ ), es necesario elegir las geometrías impresas que sinteticen las distintas admitancias. Primero debe elegirse el tamaño lateral que tendrá la celda, donde existe un compromiso entre hacerla suficientemente menor a la longitud de onda y su facilidad de fabricación. Las celdas elegidas aquí tienen  $\lambda_0/6 \times \lambda_0/4$  que, aunque no significativamente pequeñas eléctricamente, se ha comprobado heurísticamente su validez (técnica conocida como “discretización agresiva” [5]). Dentro de este área, puede elegirse cualquier forma geométrica arbitraria, parametrizarla y simularla bajo condiciones de periodicidad infinita e incidencia de onda plana, obteniendo así el rango de impedancias que es posible conseguir con ella para la polarización elegida, en este caso lineal con el campo eléctrico en dirección  $x$ . Con el fin de seguir cierta lógica electromagnética, las reactancias negativas se consiguen aquí con geometrías en forma de condensador de placas paralelas (véase Fig. 1), mientras que para reactancias positivas se usan las conocidas *meander lines* con un solo zigzag.

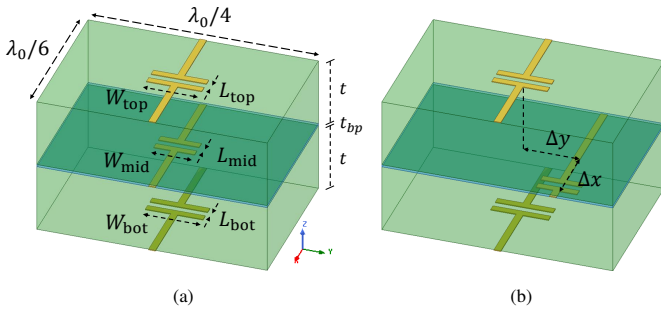


Fig. 1. Celda unidad (a) totalmente alineada y (b) con la capa intermedia desalineada.

### A. Caso de ejemplo

Ya con todas las herramientas necesarias, se muestra un ejemplo ilustrativo de diseño concreto de celda unidad. Se propone sintetizar los parámetros S objetivo de la Tabla I. Con vistas a la fabricabilidad, se insertan láminas de adhesivo Rogers 2929 Bondply (espesor  $t_{bp} = 2$  mil,  $\epsilon_r = 2.94$  y  $\tan \delta = 0.003$ ) entre cada par de láminas de RO3003 para mantenerlas pegadas, y que se añaden al modelo como líneas de transmisión adicionales. Si sólo usamos tres capas de geometrías metálicas, la obtención de los valores de admitancias necesarias es directa:  $X_{bot} = -111.68 \Omega$ ,  $X_{mid} = -44.04 \Omega$  y  $X_{top} = -128.73 \Omega$ . Al ser las tres reactancias negativas, todas son sintetizadas a partir de la geometría de condensadores, y cuyas dimensiones requeridas se obtienen a partir de la parametrización realizada previamente en simulación ( $W_{bot} = 1.25$  mm,  $W_{mid} = 0.88$  mm,  $W_{top} = 1.20$  mm,  $L_{bot} = L_{mid} = L_{top} = 0.15$  mm). Así, la celda completa diseñada se muestra en la Fig. 1a y, teniendo en cuenta las pérdidas reales de cada capa, los parámetros S que sintetiza según el modelo circuital se muestran en la segunda fila de la Tabla I.

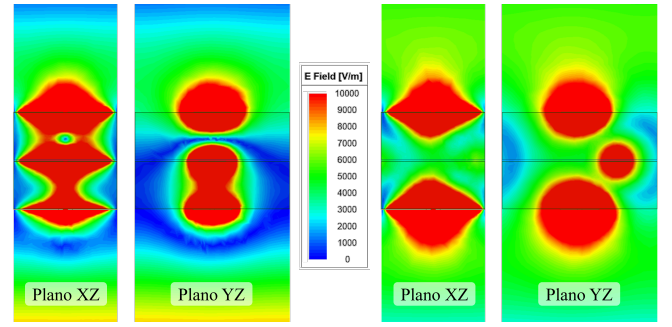
TABLA I  
PARÁMETROS S DE LA CELDA UNIDAD DE EJEMPLO.

	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{22}$
<b>Objetivo</b>	$0.250 \angle -76.0^\circ$	$0.968 \angle 52.0^\circ$	$0.250 \angle 0.0^\circ$
<b>Sintetizado</b>	$0.276 \angle -86.4^\circ$	$0.892 \angle 53.5^\circ$	$0.206 \angle -15.1^\circ$
<b>Simulado</b>	$0.468 \angle -167.7^\circ$	$0.846 \angle 96.4^\circ$	$0.460 \angle -174.6^\circ$

Sin embargo, cuando esta celda unidad completa se simula bajo condiciones periódicas, los parámetros S simulados (Tabla I) se alejan considerablemente de los diseñados. Esto se debe a que el modelo circuital usado sólo es válido si el acoplamiento mutuo entre las distintas capas sea despreciable, lo cual parece no cumplirse en este caso. De hecho, esto se visualiza en la Fig. 2a a través de dos cortes del campo eléctrico a lo largo de la celda, donde se aprecia cómo los campos difractados por las tres capas interactúan entre ellos.

### III. EFECTO DEL DESALINEAMIENTO

El objetivo es conseguir que el acoplamiento mutuo entre las distintas capas disminuya para así conseguir que el modelo circuital sencillo siga siendo preciso, y evitar pasar a modelos más complejos. Una opción podría ser aumentar el grosor del sustrato para así separar más las capas, pero esto tiene dos problemas principales: no suele haber sustratos comerciales tan gruesos y, además, para que la teoría subyacente al



(a) Capa intermedia alineada.

(b) Capa intermedia desalineada.

Fig. 2. Perfiles de intensidad del campo eléctrico total para la celda unidad estudiada bajo incidencia de onda plana.

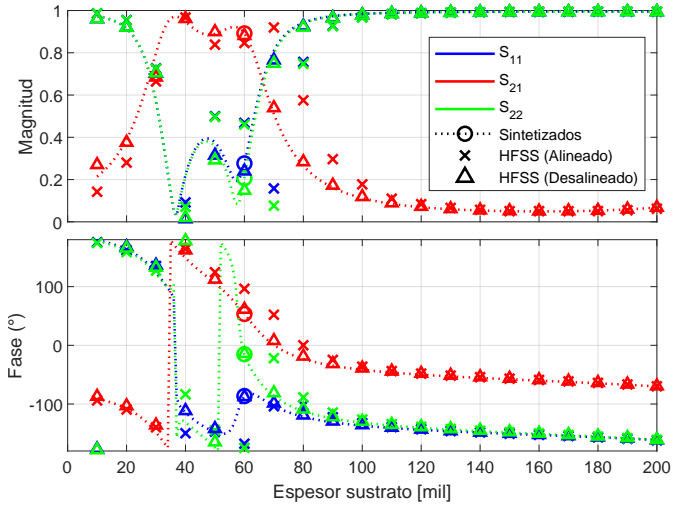


Fig. 3. Comparación entre los parámetros S obtenidos a través del modelo circuital y de simulación (tanto para el caso alineado como desalineado) en función del espesor del sustrato utilizado.

diseño de este tipo de superficies funcione correctamente, la estructura debe ser eléctricamente fina. También puede usarse una permitividad dieléctrica muy alta, pero entonces las tolerancias en fabricación crecen.

De manera intuitiva, si el acoplamiento entre capas se debe de manera significativa al efecto capacitivo entre las distintas geometrías, otra opción sería intentar minimizar el solapamiento entre ellas. Para ello, se propone desalinear alguna de las capas, tal y como se muestra en la Fig. 1b con la celda anteriormente diseñada y la capa intermedia desalineada con  $\Delta y = \Delta x = 1.2$  mm. A nivel de capa individual, mientras se mantengan las dimensiones de la propia geometría y el tamaño de la celda, un desalineamiento arbitrario no afecta a las impedancias que sintetiza, ya que la superficie periódica infinita que genera es idéntica. Así, además, se evita tener que recurrir al largo proceso de intentar obtener otras geometrías distintas que sinteticen rangos de impedancias parecidos sin acoplarse demasiado con las otras en uso.

Por tanto, las diferencias en los parámetros S que presente la celda completa para distintos desalineamientos de sus capas se deberá únicamente al efecto del acoplamiento mutuo entre capas. Para probar esta hipótesis, se simulan ambas versiones de la celda mostradas en la Fig. 1 variando el espesor  $t$  de los sustratos, y los resultados se comparan con la predicción teórica del modelo circuital en la Fig. 3.

Primero, se comprueba que tanto para el caso alineado como el desalineado, efectivamente, cuando el espesor del sustrato es suficientemente grande, los efectos del acoplamiento mutuo dejan de ser apreciables y ambos casos convergen a la solución del modelo circuital sencillo. Sin embargo, para espesores más pequeños del sustrato, los resultados de la celda con la capa intermedia alineada difieren de los del modelo circuital (como ya se comprobó anteriormente para el caso concreto de  $t = 60$  mil, identificado con círculos en las curvas teóricas), mientras que el caso desalineado consigue coincidir con el modelo incluso para espesores del sustrato considerablemente pequeños. Se obtiene así una visión más amplia de los valores concretos de parámetros  $S$  que se dieron anteriormente. Además, se puede observar también visualmente la disminución del acoplamiento entre capas gracias al desalineamiento en la Fig. 2b.

Por supuesto, para cada diseño distinto de celda unidad, el comportamiento concreto del acoplamiento mutuo será diferente, pero se ha comprobado heurísticamente que la mejora con el desalineamiento suele mantenerse. Además, el nivel de acoplamiento también depende del grado de desalineamiento. En superficies totalmente periódicas el desalineamiento puede ser tan pronunciado como se desee, pero en metasuperficies donde cada celda puede ser distinta, existirá un compromiso entre cuánto puede disminuirse el acoplamiento mutuo entre capas y cuánto puede adentrarse una capa desalineada en la celda adyacente.

#### IV. PRUEBAS EN METASUPERFICIES REALES

Con la finalidad de poner a prueba la viabilidad de esta técnica, se hacen un par de pruebas en aplicaciones concretas.

##### A. Refracción anómala

Uno de los ejemplos clásicos en la literatura de metasuperficies es la refracción anómala, con la que puede conseguirse un control total sobre el ángulo de refracción de una onda plana al incidir sobre una metasuperficie, además de no producir reflexión especular alguna idealmente. Siguiendo la teoría de [4], es posible conseguir los parámetros  $S$  de una metasuperficie que implemente esta funcionalidad. Para este ejemplo se escoge un ángulo de incidencia  $\theta_{in} = 0^\circ$  y periodo de la metasuperficie  $p = 5/4\lambda_0$ , obteniendo un ángulo de salida  $\theta_{out} = 53.13^\circ$ .

En la Fig. 4 se muestran los parámetros  $S$  necesarios, junto con los sintetizados a partir del modelo circuital sencillo, y los simulados. En este caso, las cinco celdas se diseñan con la geometría de condensadores en sus tres capas. Al simularlas estando totalmente alineadas, como se haría normalmente, se observa en las curvas de color negro que algunas celdas se alejan de los valores predichos por el modelo, de lo que se extrae que presentan un nivel de acoplamiento mutuo considerable. La celda 1 es la que presenta una mayor desviación y es, de hecho, la que se ha diseñado y analizado en las secciones anteriores.

Se vuelven a simular estas celdas con un desalineamiento en la capa intermedia de  $\Delta x = 0.9$  mm y  $\Delta y = 1.2$  mm, manteniendo así cierta periodicidad local sin sacar ninguna geometría del área correspondiente a su celda, y los resultados se muestran en las curvas verdes, resultando obvia la mejora al conseguir mayor coincidencia con el modelo circuital.

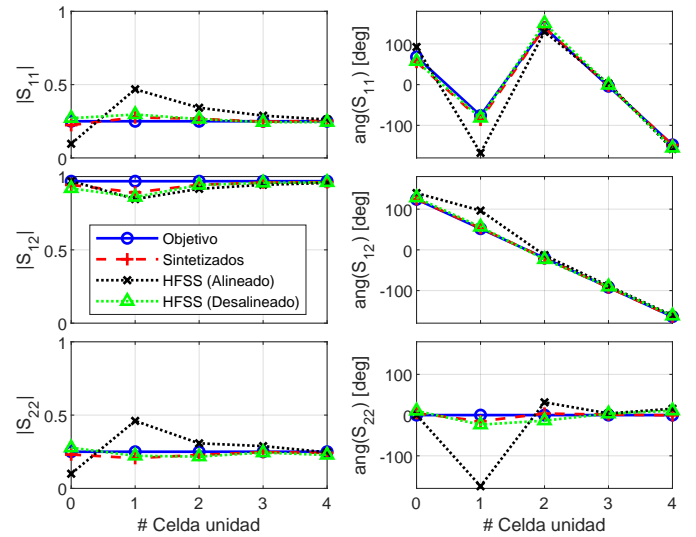


Fig. 4. Parámetros  $S$  del diseño para refracción anómala.

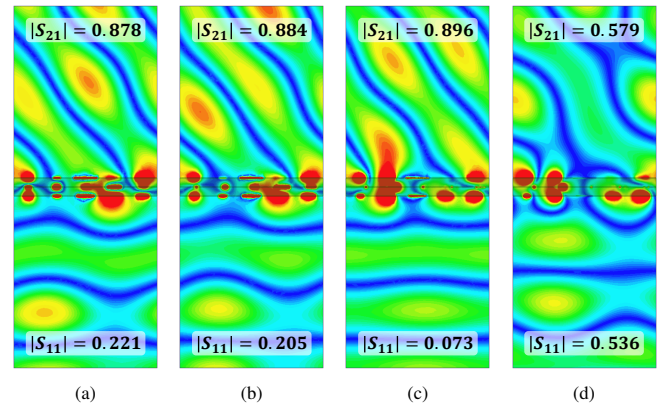


Fig. 5. Perfil de campo eléctrico de la refracción anómala para (a) el caso alineado y (b)-(d) distintos casos con desalineamientos crecientes.

Esta metasuperficie se simula en condiciones periódicas y puertos de Floquet con los tres primeros modos de Floquet, que son los que se propagan en esta estructura. En la Fig. 5 se muestran los perfiles del campo eléctrico cuando el modo fundamental (onda plana normal a la superficie) se excita desde el puerto 1 (abajo), para distintos desalineamientos. Como los parámetros  $S$  de las celdas alineadas ya seguían la tendencia correcta, se puede ver que la refracción anómala se cumple de manera suficientemente correcta en este caso (Fig. 5a). Aún así, conforme la capa intermedia de la metasuperficie se va desalineando, se va consiguiendo mejorar ligeramente sus prestaciones, obteniendo el perfil más limpio, la mayor transmisión al primer modo Floquet y, sobre todo, la menor reflexión para el caso de la Fig. 5c ( $\Delta x = 0.8$  mm,  $\Delta y = 1$  mm).

Sin embargo, en la Fig. 5d se comprueba la limitación fundamental de esta técnica: en superficies donde existen diversas celdas unidad distintas, un desalineamiento excesivo hace que el acoplamiento entre celdas adyacentes cambie de manera notable, lo que hará que las características de la metasuperficie se distorsionen gravemente. Este efecto empieza a percibirse suficientemente antes del caso límite en el que una capa se ha desalineado tanto como para estar situada en la celda adyacente, donde evidentemente dejará de

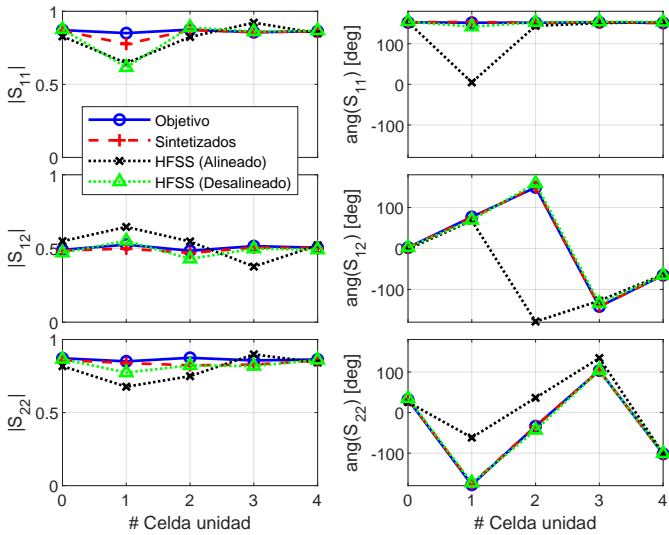


Fig. 6. Parámetros S del diseño de la antenna leaky-wave.

funcionar como se diseñó. En este caso, ese empeoramiento empieza a suceder alrededor del desalineamiento usado en la obtención de los parámetros S de la Fig. 4 (aprox.  $\lambda_0/16$ ).

### B. Antena Leaky-Wave periódica

Basándonos en [6], es posible diseñar una metasuperficie que, usada como superficie superior en una guía de placas paralelas, convierta el campo guiado dentro en una onda de fuga o *leaky-wave* con varios grados de libertad en el diseño de la antenna. Para este ejemplo se elige una altura de la guía  $d = 0.5\lambda_0$ , ángulo de apuntamiento  $\theta_{out} = -25^\circ$ , periodo  $p = 5/4\lambda_0$  y factor de fuga  $\alpha = 0.05k_0$ . A partir de estas características se obtienen los parámetros S de las 5 celdas necesarias para la metasuperficie, que se representan en la Fig. 6 junto con los sintetizados y los simulados tanto para el caso alineado como para un desalineamiento de  $\Delta x = 0.4 \text{ mm}$  y  $\Delta y = 1.2 \text{ mm}$ . En este caso, algunas celdas sintetizadas también usan la geometría de *meander lines*. De nuevo se observa que algunas celdas alineadas se alejan del comportamiento predicho por el modelo circuital debido a que existe un nivel apreciable de acoplamiento mutuo entre sus capas, el cual se reduce notablemente desalineando la capa intermedia, obteniendo así un comportamiento mucho más parecido al sintetizado.

Se simula la antenna completa con distintos desalineamientos de la metasuperficie, obteniéndose los diagramas de radiación de la Fig. 7, donde se comparan con el teórico. El caso alineado sale suficientemente bien debido a que la tendencia de los parámetros S ya era buena en ese caso. Sin embargo, aplicando un ligero desalineamiento, no sólo no empeora sino que se consigue una ligera mejora en el nivel de directividad (0.5 dB más), el ángulo de apuntamiento ( $-24.6^\circ$  desalineado frente a  $-26.1^\circ$  alineado) y los lóbulos laterales (6 dB menos), pareciéndose más al caso teórico. De nuevo, un grado de desalineamiento excesivo (en este caso  $\lambda_0/20$ , una quinta parte de la longitud de una celda) hace que el comportamiento de la metasuperficie se degrade rápidamente, resultando en un diagrama de radiación bastante distorsionado.

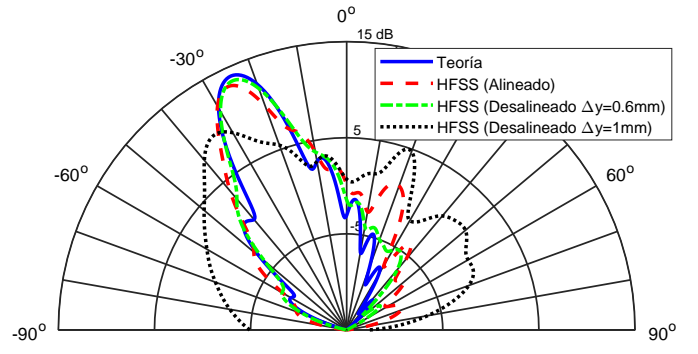


Fig. 7. Directividad de la antenna leaky-wave teórica y simulada para distintos grados de desalineamiento.

## V. CONCLUSIONES

Se ha evaluado la eficacia del desalineamiento entre las capas de metasuperficies como una técnica sencilla con potencial para reducir el acoplamiento mutuo. De este manera, los parámetros sintetizados a través del modelo en línea de transmisión sencillo pueden seguir siendo precisos para separaciones menores entre las geometrías impresas en las celdas unidad, evitando tener que usar otras geometrías distintas o recurrir a modelos más complejos.

Esta técnica se ha probado en dos casos de metasuperficies con distintas celdas, comprobando que los parámetros S obtenidos del diseño microscópico desalineado se asemejan en mayor medida a los sintetizados por el modelo. Además, las metasuperficies completas simuladas parecen indicar que un ligero desalineamiento no solo no afecta negativamente a la estructura, sino que puede mejorarla ligeramente, siempre que el caso alineado no fuese suficientemente satisfactorio desde el comienzo. Sin embargo, un desalineamiento excesivo distorsiona gravemente el comportamiento de las metasuperficies, por lo que esta técnica debe aplicarse con cautela.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Universidades bajo la ayuda FPU20/03240, por MCI/AEI/FEDER bajo la ayuda RTI2018-097098-J-I00, por la Junta de Andalucía bajo la ayuda PY20\_00452 (PAIDI 2020) y por la Universidad de Málaga bajo la ayuda UMA20-FEDERJA-001.

## REFERENCIAS

- [1] F. Monticone, N. M. Estakhri, and A. Alù, "Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, p. 203903, May 2013.
- [2] C. Pfeiffer and A. Grbic, "Bianisotropic metasurfaces for optimal polarization control: Analysis and synthesis," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 2, p. 044011, Oct 2014.
- [3] M. Chen, E. Abdo-Sánchez, A. Epstein, and G. V. Eleftheriades, "Theory, design, and experimental verification of a reflectionless bianisotropic huygens' metasurface for wide-angle refraction," *Phys. Rev. B*, vol. 97, p. 125433, Mar 2018.
- [4] A. Epstein and G. V. Eleftheriades, "Arbitrary power-conserving field transformations with passive lossless omega-type bianisotropic metasurfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 9, pp. 3880–3895, 2016.
- [5] A. M. H. Wong and G. V. Eleftheriades, "Perfect anomalous reflection with an aggressively discretized huygens' metasurface," in *2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, 2017, pp. 1–3.
- [6] E. Abdo-Sánchez, M. Chen, A. Epstein, and G. V. Eleftheriades, "A leaky-wave antenna with controlled radiation using a bianisotropic huygens' metasurface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 1, pp. 108–120, 2019.