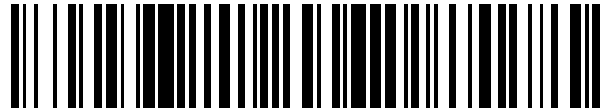


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 930 559**

21 Número de solicitud: 202230926

51 Int. Cl.:

H01Q 5/42 (2015.01)

H01Q 21/24 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

27.10.2022

43 Fecha de publicación de la solicitud:

16.12.2022

71 Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE SEVILLA (35.0%)
Paseo de las Delicias s/n (Pabellón de Brasil)
41013 Sevilla (Sevilla) ES;
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
(25.0%);
UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS (10.0%) y
UNIVERSIDAD DE ALCALÁ (30.0%)

72 Inventor/es:

RODRÍGUEZ BOIX, Rafael;
FLORENCIO DÍAZ, Rafael;
ENCINAR GARCINUÑO, José Antonio;
MARTÍNEZ DE RIOJA DEL NIDO, José Daniel y
MARTÍNEZ DE RIOJA, Eduardo

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

54 Título: **Antena reflectarray plana multi-banda con separación de haces de polarización circular y método para su diseño**

57 Resumen:

Antena reflectarray plana multi-banda con separación de haces de polarización circular y método para su diseño.

Una antena reflectarray plana (100) compuesta por celdas desfasadoras (12), en la que cada celda (12) contiene dos conjuntos superpuestos de cuatro anillos conductores partidos que forman arcos concéntricos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), impresos sobre varias capas de dieléctrico (15, 16), apiladas en un sustrato multicapa limitado por un plano conductor (14). El reflectarray (100) genera dos haces independientes en dos bandas de frecuencia, uno con polarización circular a derechas, y el otro, a izquierdas. En una primera etapa de diseño, los anillos de mayor radio se ajustan para colimar el haz en una única dirección en la banda inferior sin discriminar el sentido de la polarización circular, y los anillos de menor radio se ajustan para conseguir el mismo comportamiento en la banda superior. En la segunda etapa de diseño, los anillos se giran para separar los haces en polarización circular a derechas e izquierdas en direcciones de apuntamiento distintas, todo ello en ambas bandas.

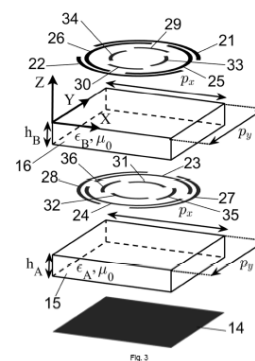


Fig. 3

DESCRIPCIÓN

Antena reflectarray plana multi-banda con separación de haces de polarización circular y método para su diseño

5

OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención se encuadra, dentro del sector tecnológico de las radiocomunicaciones, en el campo técnico de los sistemas de antenas tipo “reflectarray” o agrupación reflectora (del inglés: reflective array, reflectarray) y, de forma más particular, se enmarca dentro de los sistemas de antenas tipo reflectarray aplicables en redes de comunicaciones terrestres y satelitales en bandas de ondas milimétricas para quinta o sexta generación (5G y 6G respectivamente), y en tecnología espacial.

15 Particularmente, la presente invención se refiere a una antena reflectarray plana que opera en dos o más bandas de frecuencia con capacidad de separar haces de polarización circular ortogonal en cada banda.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

20

En las últimas décadas ha habido un importante aumento en la utilización de antenas multihaz para satélites de comunicaciones. Estas antenas multihaz proporcionan cobertura a una región específica de la Tierra, usando un gran número de haces que cubren tanto el radioenlace descendente en transmisión (TX) como el ascendente en recepción (RX). Las antenas multihaz tienen ventajas sobre las antenas de haz contorneado porque: a) hacen un uso más eficiente del espectro al repartir las frecuencias de operación entre los diferentes haces; b) tienen mayores ganancias por utilizar haces más pequeños, lo cual supone una mayor potencia isotropa radiada equivalente (EIRP en inglés) en el radioenlace descendente y una mayor relación ganancia/temperatura de ruido (G/T) en el radioenlace ascendente; y c) requieren terminales en Tierra más pequeños. Estas antenas multihaz han sido utilizadas en satélites geoestacionarios destinados a comunicaciones personales, comunicaciones militares, radiodifusión y servicios de comunicaciones móviles [S. K. Rao & M. Q. Tang, “Stepped reflector antennas for dual-band multiple beam satellite communication payloads”, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 54, pp. 801-811, March 2006].

35

Los satélites de comunicaciones desempeñan un papel clave en las redes de comunicaciones,

proporcionando conectividad en zonas rurales o aisladas, y en escenarios de movilidad (aeronáuticos y marítimos), complementando los servicios proporcionados por las redes terrestres [K. Liolis, et al. “Use cases and scenarios of 5G integrated satellite-terrestrial networks for enhanced mobile broadband. The SaT5G approach”, Intl. J. Satell. Commun. Network, 37 (2019), 91–112.]. Actualmente, se utilizan satélites geoestacionarios que operan en banda Ka, conocidos como satélites de alto rendimiento (“high throughput satellites” en inglés). Las antenas empleadas en estos satélites utilizan un esquema de re-utilización de frecuencia y polarización para cubrir totalmente la zona de cobertura sin interferencias con “cuatro colores” generados a partir de dos frecuencias próximas y dos polarizaciones ortogonales, tanto en TX (frecuencia central en torno a 20 GHz) como en RX (frecuencia central en torno a 30 GHz) [S. K. Rao, “Parametric design and analysis of multiple-beam reflector antennas for satellite communications”, IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 45, pp. 26-33, Aug. 2003].

La zona de cobertura queda totalmente cubierta con haces independientes de estos cuatro colores de manera que nunca solapen haces del mismo color. Tradicionalmente se han utilizado reflectores parabólicos para estas antenas multihaz debido al ahorro de peso, y al alto grado de madurez tecnológica alcanzada en el diseño de dichos reflectores. En un principio, se trabajó con ocho reflectores multihaz, cuatro para cubrir las dos frecuencias y las dos polarizaciones en TX, y otros cuatro para conseguir el mismo funcionamiento en RX. Posteriormente, se redujo a cuatro el número de reflectores parabólicos al utilizarse reflectores de doble banda, cada uno de los cuales daba cuenta de una frecuencia y una polarización (un color), tanto en TX como en RX. El principal problema de esta configuración de cuatro reflectores es que ocupa dos laterales del satélite y no deja espacio para otras misiones [N. G. J. Fonseca & Cyril Mangenot, “Low-profile polarizing surface with dual-band operation in orthogonal polarizations for broadband satellite applications”, Proc. 8th European Conf. Antennas Propag. EuCAP 2014, pp. 471-475]. Por tanto, se han buscado soluciones que reduzcan a dos el número total de reflectores parabólicos, bien mediante el diseño de reflectores que generen los cuatro colores en una sola banda (esto es, o en TX, o en RX), bien mediante el diseño de reflectores de doble banda que generen dos colores, tanto en TX como en RX. Esto se puede conseguir pasando de configuraciones de un alimentador por haz a configuraciones de múltiples alimentadores por haz. No obstante, esta última estrategia requiere recurrir al diseño de sofisticadas redes generadoras de haz, y además, las prestaciones de los reflectores con múltiples alimentadores por haz son inferiores a las de los reflectores con un solo alimentador por haz [M. Zhou & S. B. Sorensen, “Multi-spot beam reflectarrays for satellite telecommunication applications in Ka-band”, Proc. 10th European

Conf. Antennas Propag. EuCAP 2016]. Debido a estos problemas, se han buscado soluciones alternativas basadas en sustituir los reflectores por antenas reflectarray (también denominadas reflectarrays a lo largo del presente documento), o al menos, en combinar los reflectores con este tipo de antenas. Los reflectarrays son agrupaciones planas de celdas reflectoras en las que cada celda introduce una corrección de fase al incidir sobre ella una onda electromagnética, de forma que es posible conseguir un haz colimado en reflexión cuando el conjunto de celdas es iluminado por un alimentador primario, que típicamente es una antena de bocina. Los reflectarrays tienen ventajas sobre los reflectores parabólicos tales como menor peso, menor coste, un perfil más delgado y un nivel más bajo de polarización cruzada [D. M. Pozar, "Design of millimeter-wave reflectarrays", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 45, pp. 287-296, Feb. 1997].

En el caso de antenas multihaz de polarización lineal, se han diseñado reflectarrays con celdas compuestas por dos conjuntos ortogonales de ocho dipolos paralelos apilados en dos capas dieléctricas que han demostrado su capacidad para conseguir dos haces separados en polarización horizontal y vertical (esto es, dos colores) en dos bandas (TX y RX) [E. Martínez de Rioja, J. A. Encinar, R. Florencio & R. R. Boix, "Reflectarray in K and Ka bands with independent beams in each polarization", Proc. IEEE Int. Symp. Antennas, Propag. 2016, pp. 1199-1200], con lo cual, dos de estos reflectarrays en configuración multihaz (con un sólo alimentador por cada dos haces) serían suficientes para satisfacer toda la cobertura de un satélite de banda Ka en transmisión y en recepción. Asimismo, se han diseñado reflectarrays con celdas también compuestas por conjuntos ortogonales de dipolos paralelos, que son capaces de generar cuatro haces adyacentes con dos polarizaciones lineales ortogonales y dos frecuencias próximas (esto es, cuatro colores) en una única banda de frecuencias, con lo cual, sólo serían necesarios también dos de estos reflectarrays para generar toda la cobertura de un satélite de banda Ka, uno para TX y otro para RX [E. Martínez de Rioja et al., IEEE Antennas Propag. Mag., Vol. 61, pp. 77-86, Oct. 2019]. En esta última configuración la separación de haces a dos frecuencias próximas se lleva a cabo aprovechando el fenómeno de modificación en la dirección del haz con la frecuencia ("beam squint" en inglés) que se produce en reflectarrays en los que la dirección de apuntamiento no coincide con la dirección de reflexión especular relativa a la dirección de incidencia de la onda emitida por el alimentador.

Si bien se han propuesto soluciones relativamente sencillas para conseguir reducir a dos el número de antenas reflectarray multihaz de un satélite de banda Ka que trabaje con polarización lineal en TX y RX, el problema es mucho más complicado cuando el satélite

trabaja con polarización circular. En [M. R. Chaharmir & J. Shaker, "Design of a multilayer X-/Ka-band frequency-selective surface backed-reflectarray for satellite applications", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 63, pp. 1255-1262, April 2015] y en [R. Deng et al., "An FSS-backed 20/30-GHz dual band circularly polarized reflectarray with suppressed mutual coupling and enhanced performance", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 65, pp. 926-931, Feb. 2017] se diseñan dos reflectarrays capaces de operar a 20 y a 30 GHz en polarización circular. En los dos casos se diseñan las antenas de 20 y 30 GHz independientemente, y dichas antenas se apilan separadas por una superficie selectiva en frecuencia que actúa como una superficie reflectora a 30 GHz, y como una superficie transmisora a 20 GHz. La superficie selectiva en frecuencia impide que las antenas a 30 y 20 GHz se acoplen, lo cual permite diseñarlas de forma independiente. El problema principal de estos reflectarrays es que tienen cuatro niveles de metalización sobre tres capas de dieléctrico que se encuentran separadas unos milímetros, resultando un espesor total del orden de un centímetro, lo cual significa que el proceso de fabricación es complejo. Además, resulta muy difícil mantener una separación entre capas uniforme y con tolerancias del orden de 0.1 mm, sobre todo en aplicaciones para espacio donde los materiales sufren distorsiones termoelásticas. En [T. Smith et al., "Design, manufacturing and testing of a 20/30 GHz dual-band circularly polarized reflectarray antenna", IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett., vol. 12, pp. 1480-1483, 2013] se propone una solución mucho más sencilla y barata para el mismo problema ya que el reflectarray para polarización circular diseñado a 20 y 30 GHz tiene una sola capa de dieléctrico de 0.79 mm de espesor y un único nivel de metalización. En este caso las celdas desfasadoras contienen dos anillos partidos concéntricos que se rotan para ajustar las fases requeridas en polarización circular en las dos bandas mientras que las longitudes de los arcos de los anillos se modifican en función de los ángulos de rotación de forma que se mantenga una diferencia de fase de 180 grados entre los coeficientes de reflexión de las dos componentes lineales ortogonales de las ondas polarizadas circularmente, tal y como se exige la técnica de la rotación variable (TRV) introducida en [J. Huang & R. J. Pogorzelski, "A Ka-band microstrip reflectarray with element having variable rotation angles", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 46, pp. 650-656, May 1998]. La técnica de diseño de este tipo de reflectarrays es más compleja que la de los reflectarrays que utilizan una superficie selectiva en frecuencia ya que aunque los anillos partidos externos se ajusten a 20 GHz sin que los anillos partidos internos tengan un efecto importante a esta frecuencia, a 30 GHz sí hay acoplamiento entre los anillos externos y los internos, y los dos anillos tienen que ser tenidos en cuenta en cada celda a la hora de ajustar la fase de la celda en la banda de RX.

35

En los trabajos que se acaban de describir, el reflectarray genera un solo haz de polarización

circular en dos frecuencias (Tx y Rx) para cada alimentador. Al margen de este régimen de operación, se han propuesto diseños de reflectarrays capaces de generar dos haces de polarización circular ortogonal por cada alimentador operando en doble polarización y en una única banda de frecuencias. Una posible manera de atacar el problema es utilizar

5 convertidores/separadores de polarización capaces de transformar ondas de polarización circular a derechas/izquierdas en ondas de polarización lineal horizontal/vertical. Estos convertidores se colocan delante de un reflectarray diseñado para generar haces independientes en cada polarización lineal, y de esa manera, el problema de separación de haces de polarización circular se convierte en un problema de separación de haces de

10 polarización lineal, que es mucho más sencillo. En [M.-A. Joyal et al, "A reflectarray-based dual-surface reflector working in circular polarization", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 63, pp. 1306-1313, April 2015] se utiliza un convertidor de polarización plano basado en líneas conductoras en forma de meandros con tres niveles de metalización que precede a un reflectarray situado delante de un reflector parabólico. El reflectarray refleja y

15 colima la polarización lineal horizontal procedente del convertidor de polarización, y es transparente a la polarización lineal vertical, que es a su vez reflejada y colimada por el reflector situado detrás. El problema es que la estructura "reflector parabólico+reflectarray+convertidor de polarización" es muy voluminosa. Otra posible configuración de reflectarray separador de haces con convertidor de polarización

20 circular/lineal es la propuesta en [C. S. Geaney, M. Hosseini & S. V. Hum, "Reflectarray antennas for independent dual linear and circular polarization control", vol. 67, pp. 5908-5918, Sept. 2019]. En este caso, el convertidor de polarización se sitúa encima de un reflectarray de doble polarización lineal, con una separación del orden de 1 cm, con lo cual, se elimina el reflector y se reduce el volumen de la estructura. Aun así, el reflectarray con convertidor de

25 polarización resulta ser una estructura multicapa con cinco niveles de metalización (tres para el polarizador y dos para el reflectarray) grabadas sobre cuatro láminas delgadas de dieléctrico. Esta estructura es complicada de fabricar debido a que las láminas de dieléctrico con metalizaciones deben mantenerse en una superficie plana, con valores de error cuadrático medio (RMS, siglas en inglés) de desviación de la superficie plana inferiores a 0.1

30 mm, tal y como como se requiere para las antenas de espacio. En [M. Zhou & S. B. Sorensen, "Multi-spot beam reflectarrays for satellite telecommunication applications in Ka-band", Proc. 10th European Conf. Antennas Propag. EuCAP 2016] se recurre a un reflectarray impreso sobre un reflector parabólico para conseguir la separación de haces en polarización circular. El concepto de reflectarray sobre reflector parabólico fue introducido por primera vez en

35 US006031506A [M. E. Cooley, T. J. Chwalek & P. Ramanujam, "Method for improving pattern bandwidth of shaped beam reflectarray", Feb. 2000] como concepto destinado a aumentar el

ancho de banda de reflectarrays convencionales. En el artículo de Zhou y Sorensen se lleva a cabo la separación de haces en polarización circular mediante la TRV anteriormente mencionada, utilizando el grado de libertad de rotación de los elementos impresos, que en el caso de reflectarrays planos sirve para colimar una onda incidente polarizada circularmente, y en el caso de reflectarrays parabólicos sirve para separar dos ondas incidentes polarizadas circularmente a izquierdas y a derechas en dos haces diferentes después de la reflexión. Esta separación de haces de polarización circular a una única frecuencia se ha conseguido con un reflectarray plano de bajo perfil (menos de 2 mm de espesor) en [R. Florencio et al., “Flat reflectarray that generates adjacent beams by discriminating in dual circular polarization”, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 67, pp. 3733-3742, June 2019]. En este caso se utiliza una celda formada por dos conjuntos ortogonales de tres dipolos paralelos impresos sobre dos capas dieléctricas apiladas para diseñar primero un reflectarray capaz de enfocar haces polarizados circularmente a izquierdas y a derechas en la misma dirección mediante la técnica de variación del tamaño de la celda (TVTC). A continuación, se aplica la TRV sobre la superficie del reflectarray para modificar la dirección de apuntamiento del haz polarizado circularmente a derechas en un sentido, y la del haz polarizado circularmente a izquierdas en sentido contrario.

Si bien los trabajos mencionados en los dos párrafos anteriores han supuesto avances en el diseño de antenas reflectarray para aplicaciones de satélite que trabajan con polarización circular, para conseguir reducir a dos el conjunto de antenas multihaz de un satélite de banda Ka y polarización circular, hacen falta reflectarrays que no sólo sean capaces de separar los haces de polarización circular a derechas y a izquierdas, sino que también generen haces de alta directividad, colimados o conformados, y lo hagan en las dos bandas de TX y RX. Un primer paso, planteado como “prueba de concepto” en el estado de la técnica, se da en [D. Martínez-de-Rioja et al., “Dual-band reflectarray to generate two spaced beams in orthogonal circular polarization by variable rotation technique”, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 68, pp. 4617-4626, June 2020], donde se propone un reflectarray plano en el que las celdas desfasadoras están compuestas por un anillo partido que rodea a dos conjuntos ortogonales de tres dipolos paralelos en dos capas dieléctricas superpuestas. Mientras que el anillo partido se utiliza para ajustar la fase en TX, los dipolos y los anillos se utilizan simultáneamente para ajustar la fase en RX. La separación de haces se consigue mediante la TRV. Las rotaciones de anillos y dipolos se llevan a cabo en sentidos contrarios, lo cual permite que la dirección de apuntamiento del haz con polarización circular a derechas en TX coincida con la del haz con polarización circular a izquierdas en RX y viceversa. Este comportamiento es un requisito que se exige en las antenas embarcadas en satélites para

minimizar interferencias. La presencia de los dipolos ortogonales es clave a la hora de mejorar las prestaciones de la celda en RX. Gracias al hecho de que los dipolos utilizados pueden tener diferentes longitudes, se lleva a cabo una optimización de las dimensiones de los dipolos a la frecuencia central y a las frecuencias extremas de la banda de RX que permite reducir la polarización cruzada en esta banda en casi 10 dB. El principal problema del reflectarray plano mencionado, basado en anillos partidos y dipolos ortogonales, es que, aunque permite la separación de haces de polarización circular en dos bandas, no permite colimar dichos haces ya que el elemento utilizado en la celda desfasadora no tiene grados de libertad suficientes para conformar el haz en las bandas de operación. Por este motivo, dicho reflectarray sólo puede replicar el diagrama de radiación de la antena de bocina utilizada como alimentador, consiguiendo una ganancia comprendida entre 20 y 25 dBi, que es claramente insuficiente para aplicaciones de antenas embarcadas en satélites, donde se llegan a requerir ganancias superiores a 45 dBi.

Para conseguir simultáneamente, tanto la separación de haces de polarización circular en dos bandas diferentes como la colimación de dichos haces, se ha recurrido a la solución del reflectarray parabólico. En [M. Zhou et al., "Doubly curved reflectarray for dual-band multiple spot beam communication satellites", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 68, pp. 2087-2096, March 2020] se utiliza un reflectarray sobre reflector parabólico para separar los haces de polarización circular en TX y RX. Mientras que las celdas desfasadoras del reflectarray se encargan de separar los dos haces, el reflector se encarga de colimarlos. Como elementos de doble banda se usan parches conductores rectangulares rodeados por anillos hexagonales partidos, de forma que los anillos hexagonales se utilizan para controlar la fase en TX, y los parches rectangulares, en RX. La separación de haces se lleva a cabo mediante la TRV, y si bien el ajuste de la fase en TX sólo depende de la rotación de los anillos hexagonales, el ajuste de la fase en RX requiere trabajar conjuntamente con los ángulos de rotación de los parches rectangulares y los anillos ya que el acoplamiento mutuo entre parches y anillos es importante en esa banda. Los haces emitidos por el reflectarray diseñado tienen ganancias en torno a los 40 dBi, lo cual demuestra la capacidad de colimación aportada por la superficie parabólica. En [D. Martínez-de-Rioja et al., "Transmit-receive parabolic reflectarray to generate two beams per feed for multispot satellite antennas in Ka-band", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 69, pp. 2673-2685, May 2021] se utiliza un enfoque similar, haciendo uso de un reflectarray sobre reflector parabólico para separar los haces de polarización circular en TX y RX. En este caso las celdas desfasadoras del reflectarray, basadas en un anillo partido con dos conjuntos ortogonales de tres dipolos paralelos, están tomadas del artículo anteriormente mencionado sobre reflectarray plano con separación de

haces a dos bandas [D. Martínez-de-Rioja et al., “Dual-band reflectarray to generate two spaced beams in orthogonal circular polarization by variable rotation technique”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, pp. 4617-4626, June 2020]. De nuevo, la presencia de la superficie parabólica permite colimar los haces y conseguir ganancias superiores a 40 dBi.

5 Una novedad importante introducida en el reflectarray parabólico basado en anillos partidos y dipolos es que en su diseño se aplica la técnica de corrección en fase selectiva que se describe en [J. A. Encinar Garcinuño, J. D. Martínez de Rioja del Nido, E. M. Martínez de Rioja del Nido, R. Florencio Díaz y R. Rodríguez Boix, “Antena reflectora con corrección de fase multi-frecuencia para aplicaciones espaciales y método de diseño de la misma”, patente española ES 2791798 B2, Marzo 2021] a una porción de las celdas situadas en una corona circular junto al borde del reflectarray en la banda de RX (esta técnica consiste en modificar en 180 grados la fase objetivo del campo reflejado en la banda de RX a una porción elegida aleatoriamente de las celdas situados en la citada corona circular), sin hacer modificaciones al diseño en la banda de TX. La técnica de corrección selectiva de fase permite igualar las ganancias y los anchos de haz en TX y en RX (en condiciones normales, la ganancia de cada haz en TX es inferior que en RX, y el ancho de haz en TX superior al de RX, debido a que la antena tiene un tamaño eléctrico mayor en RX que en TX por ser la frecuencia también mayor), lo cual posibilita que los niveles de potencia en las zonas de cobertura sean iguales para el radioenlace descendente y el radioenlace ascendente.

20 A pesar de su buena respuesta, los dos reflectarrays sobre reflectores parabólicos con capacidad para separar haces de polarización circular en dos bandas de frecuencia (TX y RX) que se han descrito en el párrafo anterior tienen el problema de que son voluminosos y complejos de fabricar. En consecuencia, el problema técnico objetivo que se presenta es proveer una antena reflectarray capaz de separar haces de polarización circular en dos bandas de frecuencia, en especial para acceso a internet de banda ancha por satélite, con una menor complejidad de diseño, un menor coste, un menor peso y un menor volumen.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

30 La presente invención sirve para solucionar el problema mencionado anteriormente, mediante la provisión de una antena reflectarray plana con una agrupación de celdas correctoras de fase (celdas desfasadoras o celdas de reflectarray), en la que cada celda contiene dos conjuntos superpuestos de cuatro anillos conductores partidos, concéntricos entre sí. Los conjuntos de cuatro anillos partidos están impresos sobre las caras de una o varias capas de dieléctrico, y las capas de dieléctrico están apiladas para formar el sustrato multicapa de la antena, limitado

inferiormente por un plano conductor. La antena trabaja en (al menos) dos bandas de frecuencia y es capaz de generar dos haces diferentes en cada banda, uno con polarización circular a derechas y otro con polarización circular a izquierdas.

5 La presente invención tiene aplicación en antenas pensadas para generar coberturas multicelulares desde satélites o plataformas de gran altitud, permitiendo reducir el número total de antenas necesario para generar toda la cobertura, tanto en transmisión como en recepción. Más concretamente, su aplicación principal es en antenas embarcadas en satélites que deben transmitir y recibir señales en diferentes bandas de frecuencia en redes de comunicación heterogéneas para 5G y 6G, lo que incluye: satélites de órbita terrestre baja o LEO (del inglés
10 “Low Earth Orbit”) y satélites de órbita geostacionaria o GEO (del inglés “Geosynchronous Equatorial Orbit”), plataformas de gran altitud HAPS (“High Altitude Pseudo-Satellites” en inglés), redes terrestres y redes de comunicaciones de banda ancha no terrestres (NTN, siglas de “Non-Terrestrial Networks” en inglés) en 5G y 6G.

15 En una primera etapa de diseño de la antena que aquí se describe, las dimensiones de los anillos partidos de mayor radio se ajustan para colimar el haz radiado o recibido en una única dirección en la banda de frecuencias más baja (todo ello sin discriminar el sentido de la polarización circular). A continuación, las dimensiones de los anillos partidos de menor radio se ajustan para conseguir el mismo comportamiento en la banda de frecuencias más alta. En una segunda etapa
20 de diseño, los anillos partidos se giran para separar los haces radiados en polarización circular a derechas y a izquierdas en direcciones de apuntamiento distintas, tanto a las frecuencias más bajas como a las más altas.

La antena reflectarray plana que se presenta se puede generalizar a más de dos bandas de
25 frecuencia, permitiendo utilizar una misma antena para varias misiones espaciales, en las cuales se generen haces contorneados en unas determinadas bandas de frecuencia y haces múltiples en otras bandas. Por tanto, el tipo de antena reflectarray que se presenta tiene una clara aplicación en la industria espacial como alternativa de coste reducido, ligera y poco voluminosa a los reflectores parabólicos y de rejilla, o a los reflectores de superficie conformada para
30 generación de haces contorneados, permitiendo reducir los costes del sistema de antenas en satélites de comunicaciones, con especial interés en los satélites de coste reducido, como los denominados SmallGEO y LEO, y permitiendo reducir el número total de antenas necesario para generar toda la cobertura, tanto en transmisión como en recepción.

35 Un aspecto de la invención se refiere a una antena reflectarray plana multibanda que comprende los siguientes componentes:

- un alimentador para generar ondas (haces) con una polarización circular a derechas y a izquierdas, a cada onda correspondiéndole un campo eléctrico complejo con una componente de campo eléctrico en un primer eje de coordenadas y una componente de campo eléctrico en un segundo eje ortogonal al primer eje de coordenadas;
- 5 - una agrupación de celdas reflectarray (celdas desfasadoras) dispuestas sobre una retícula (plana) que refleja las ondas generadas por el alimentador, donde cada celda comprende un plano (de masa) conductor y múltiples capas dieléctricas superpuestas sobre el plano conductor;

en cada celda desfasadora, la antena reflectarray además comprende dos conjuntos
 10 superpuestos de cuatro anillos conductores concéntricos partidos en dos arcos, teniendo en total dieciséis arcos, donde un primer conjunto de cuatro anillos conductores partidos en dos arcos está impreso sobre una cara (de las dos caras) de una de las capas dieléctricas, denominada primera capa o capa superior, y donde un segundo conjunto de cuatro anillos conductores partidos en dos arcos está impreso sobre (la) otra cara de la misma capa mencionada
 15 anteriormente, capa superior, o sobre una de las dos caras de otra capa distinta, segunda capa o capa inferior, de la pluralidad de capas dieléctricas; y del total de dieciséis arcos en cada celda desfasadora:

- ocho arcos de los anillos (más) externos (los de mayor radio), que pertenecen a cuatro anillos que son los dos anillos partidos de mayor radio de los dos conjuntos de anillos,
 20 tienen unas longitudes para ajustar en fase las ondas del alimentador que se reflejan en cada celda desfasadora manteniendo el sentido de la polarización circular después de la reflexión a la frecuencia central de una primera banda de funcionamiento de la antena reflectarray, denominada frecuencia inferior, estando:
 - cuatro arcos externos orientados en una primera dirección según el primer eje de
 25 coordenadas, ajustados para controlar un desfase de la componente del campo eléctrico reflejado según el primer eje, y
 - cuatro arcos orientados en una segunda dirección, según el segundo eje de coordenadas, ajustados para controlar un desfase de la componente del campo eléctrico reflejado según el segundo eje, existiendo una diferencia de 180 grados
 30 entre los desfases de las dos componentes del campo eléctrico reflejado para mantener el sentido de la polarización circular a la frecuencia inferior;
- ocho arcos de los anillos (más) internos (los de menor radio), que pertenecen a cuatro anillos que son los dos anillos partidos de menor radio de los dos conjuntos de anillos,
 35 tienen unas longitudes para ajustar en fase las ondas del alimentador que se reflejan en cada celda desfasadora manteniendo el sentido de la polarización circular después de la reflexión a la frecuencia central de una segunda banda de funcionamiento de la antena

reflectarray, denominada frecuencia superior, estando:

- cuatro arcos internos orientados en una primera dirección, según el primer eje de coordenadas, ajustados para controlar un desfase de la componente del campo eléctrico reflejado según el primer eje, y
 - 5 • cuatro arcos orientados en una segunda dirección, según el segundo eje de coordenadas, ajustados para controlar un desfase de la componente del campo eléctrico reflejado según el segundo eje, manteniendo una diferencia de 180 grados entre los desfases de las dos componentes del campo eléctrico reflejado para mantener el sentido de la polarización circular a la frecuencia superior;
- 10 y a la frecuencia inferior, los ocho arcos de los anillos más externos son rotados solidariamente, aplicando la técnica de rotación variable para desviar las ondas de polarización circular a derechas e izquierdas un (primer) ángulo prefijado en direcciones opuestas con respecto a la dirección de las ondas reflejadas antes de rotar los ocho arcos de los anillos externos; y a la frecuencia superior, los ocho arcos de los anillos más internos son rotados solidariamente,
- 15 aplicando la técnica de rotación variable para desviar las ondas de polarización circular a derechas e izquierdas un (segundo) ángulo prefijado en direcciones opuestas con respecto a la dirección de las ondas reflejadas antes de rotar los ocho arcos de los anillos externos.

Otro aspecto de la invención se refiere a un método de diseño de antenas para obtener la antena reflectarray descrita anteriormente con separación de haces de polarización circular en al menos dos bandas de frecuencia (el método es aplicable tanto para haces colimados como para haces contorneados y funciona para dos bandas de frecuencia siendo generalizable para más de dos bandas de frecuencia). El método comprende los siguientes pasos:

- a) definir la antena reflectarray en forma y dimensiones, en un sistema de coordenadas (X, Y, Z), la antena reflectarray formada con una agrupación de celdas desfasadoras en una retícula plana periódica de período prefijado y un alimentador configurado para radiar en las, al menos dos, bandas de frecuencia, ondas polarizadas circularmente a derechas y a izquierdas que inciden en las celdas desfasadoras, comprendiendo cada celda desfasadora:
- 25 -
 - 30 - un plano conductor,
 - una pluralidad de capas dieléctricas,
 - un primer conjunto superior de cuatro anillos conductores partidos concéntricos impreso sobre una de las caras de una capa de la pluralidad de capas dieléctricas, estando cada uno de los anillos partido en dos arcos iguales, formando ocho arcos
 - 35 del primer conjunto;
 - un segundo conjunto inferior de cuatro anillos conductores partidos concéntricos

impreso sobre la cara opuesta a la cara de la capa dieléctrica sobre la que está impreso el primer conjunto, o sobre una cara de una capa diferente a la de la capa dieléctrica sobre la que está impreso el primer conjunto de entre la pluralidad de capas dieléctricas;

- 5 b) definir unas direcciones de apuntamiento de los haces de polarización circular a separar en una primera banda de funcionamiento y una segunda banda de funcionamiento, y definir una frecuencia central de la primera banda de funcionamiento y una frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento;
- 10 c) a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento y a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, determinar una distribución de unos valores de desfase para ondas incidentes con polarización lineal en un primer eje (X) y polarización lineal en un segundo eje (Y) para colimar o contornear los haces de polarización circular en una dirección intermedia a las direcciones de apuntamiento de cada uno de los haces a separar, donde la distribución de desfases para la polarización lineal en el primer eje
- 15 (X) difiere en 180 grados de la distribución de desfases para la polarización lineal en un segundo eje (Y), para colimar o contornear las ondas polarizadas circularmente a derechas e izquierdas que inciden sobre las celdas desfasadoras de la antena reflectarray manteniendo el sentido de la polarización circular después de ser reflejadas por las celdas desfasadoras;
- 20 d) a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento, ajustar unas longitudes de unos arcos externos, donde los arcos externos son los arcos de mayor radio de los dos conjuntos de anillos partidos, ajustando las longitudes de un primer subconjunto de cuatro arcos externos de anillos partidos orientados en la dirección del primer eje (X), siendo el desfase introducido por la celda desfasadora igual al calculado en el paso c) para el caso de polarización lineal en el primer eje (X), y ajustando las longitudes de un segundo subconjunto de cuatro arcos externos en la dirección del segundo eje (Y) siendo el desfase introducido por la celda desfasadora igual al calculado en el paso c) para el caso de polarización lineal en el segundo eje (Y);
- 25 e) a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, ajustar unas longitudes de unos arcos internos, donde los arcos internos son los arcos de menor radio de los dos conjuntos de anillos partidos, ajustando las longitudes de un primer subconjunto de cuatro arcos internos de anillos partidos orientados en la dirección del primer eje (X), siendo el desfase introducido por la celda desfasadora igual al calculado en el paso c) para el caso de polarización lineal en el primer eje, y ajustando las longitudes de un segundo subconjunto de cuatro arcos internos en la dirección del segundo eje (Y) siendo el desfase introducido por la celda desfasadora igual al calculado en el paso c) para el caso
- 30
- 35

de polarización lineal en el segundo eje (Y);

- 5 f) comprobar si la diferencia, para cada celda desfasadora, entre los valores de desfase determinados en el paso c) y los desfases introducidos por la celda desfasadora para las polarizaciones lineales en el primer eje (X) y segundo eje (Y), a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento y a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, es menor de un primer umbral de referencia de error de fase;
- 10 g) si la diferencia comprobada en el paso f) resulta igual o mayor al primer umbral de referencia de error de fase, repetir el paso d) ajustando las longitudes del primer subconjunto y segundo subconjunto de los arcos externos mientras se mantienen fijas las longitudes del primer subconjunto y segundo subconjunto de los arcos internos, y repetir el paso e), ajustando las longitudes del primer subconjunto y segundo subconjunto de los arcos internos mientras se mantienen fijas las longitudes del primer subconjunto y segundo subconjunto de los arcos externos;
- 15 h) iterar los pasos f) y g) hasta que los desfases introducidos para las polarizaciones lineales en el primer eje (X) y segundo eje (Y) en cada celda desfasadora difieren de los valores de desfase determinados en el paso c) en menos del primer umbral de referencia de error de fase;
- 20 i) a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento y a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, determinar unos valores de correcciones de desfase, en cada celda desfasadora, para ondas incidentes con polarización circular a derechas e izquierdas en la antena reflectarray obtenida según los pasos d) a h) para separar los haces colimados o contorneados en las direcciones de apuntamiento definidas en el paso b);
- 25 j) ajustar los ángulos de rotación de los arcos externos para rotar solidariamente los arcos externos alrededor del centro de los anillos partidos, obteniendo unos arcos de los anillos externos rotados, el ángulo de rotación ajustado independientemente para cada celda desfasadora, siendo los valores de correcciones de desfase introducidos por los arcos de los anillos externos rotados en los desfases para polarizaciones circulares a derechas e izquierdas iguales a los que se han calculado en el paso i) de acuerdo con la técnica de rotación variable a la frecuencia central de la banda inferior;
- 30 k) ajustar los ángulos de rotación de los arcos internos para rotar solidariamente los arcos internos alrededor del centro de los anillos partidos, obteniendo unos arcos de los anillos internos rotados, el ángulo de rotación ajustado independientemente para cada celda desfasadora, siendo los valores de correcciones de desfase introducidos por los arcos de los anillos internos rotados en los desfases para polarizaciones circulares a derechas e izquierdas iguales a los que se han calculado en el paso i) de acuerdo con la técnica
- 35

de rotación variable a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento;

- 5 l) ajustar las longitudes de los arcos externos rotados, en cada celda desfasadora, usando un primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z') un primer ángulo con respecto al sistema de coordenadas (X , Y , Z) del paso a), para mantener la diferencia de 180 grados entre los desfases para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo de un primer eje rotado (X') y de un segundo eje rotado (Y') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z'), siendo los desfases para la polarización lineal en el primer eje rotado (X') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z') igual a los desfases para la polarización lineal en el primer eje (X) definidos en el paso c), a la frecuencia central de la de la primera banda de funcionamiento;
- 10 m) ajustar las longitudes de los arcos internos rotados, en cada celda desfasadora, usando un segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z'') un segundo ángulo con respecto al sistema de coordenadas (X , Y , Z) del paso a), para mantener la diferencia de 180 grados entre los desfases para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo de un primer eje rotado (X'') y de un segundo eje rotado (Y'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z''), siendo los desfases para la polarización lineal en el primer eje rotado (X'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z'') igual a los desfases para la polarización lineal en el primer eje (X) definidos en el paso c), a la frecuencia central de la de la segunda banda de funcionamiento;
- 15 n) comprobar si, para cada celda desfasadora, la diferencia entre los valores de desfase para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo del primer eje rotado (X') y del segundo eje rotado (Y') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z') y los desfases para la polarización lineal en el primer eje rotado (X') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z'), a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento, difieren de los valores determinados en los pasos l) y c) en menos de un segundo umbral de referencia de error de fase, y si la diferencia entre los valores de desfase para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo del primer eje rotado (X'') y del segundo eje rotado (Y'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z'') y los desfases para la polarización lineal en el primer eje rotado (X'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z''), a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, difieren de los valores determinados en los pasos m) y c) en menos del segundo umbral de referencia de error de fase;
- 20 o) si las diferencias comprobadas en el paso n) resultan iguales o mayores al segundo umbral de referencia de error de fase, repetir el paso l) ajustando a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento las longitudes de los ocho arcos externos rotados mientras se mantienen constantes las longitudes de los ocho arcos internos rotados, y
- 25
- 30
- 35

repetir el paso n) ajustando a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento las longitudes de los ocho arcos internos rotados mientras se mantienen constantes las longitudes de los ocho arcos externos rotados;

- 5 p) iterar los pasos n) y o) hasta que los desfases introducidos en cada celda desfasadora para las polarizaciones en el primer eje rotado (X') y segundo eje rotado (Y') del primer sistema de coordenadas rotado (X', Y', Z') a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento, y los desfases para las polarizaciones en el primer eje rotado (X'') y segundo eje rotado (Y'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'', Y'', Z'') a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, difieren de los valores de
- 10 desfase determinados en los pasos l) y m) en menos del segundo umbral de referencia de error de fase;
- q) generar máscaras de fotograbado para cada uno de los dos niveles de metalización de la antena reflectarray a partir de las longitudes ajustadas para los arcos y los ángulos de rotación ajustados para cada anillo partido en cada celda desfasadora.

15

Las ventajas de la presente invención frente al estado de la técnica anterior son fundamentalmente:

- A diferencia de lo que ocurre con el reflectarray descrito en el artículo anteriormente mencionado [D. Martínez de Rioja et al., "Dual-band reflectarray to generate two spaced beams in orthogonal circular polarization by variable rotation technique", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, June 2020], la presente invención provee un reflectarray plano que permite la separación de haces ortogonales de polarización circular en dos bandas, y que además permite colimar o conformar los haces sin la necesidad de recurrir a un voluminoso reflector parabólico. Esto es así porque las celdas desfasadoras utilizadas, basadas en anillos partidos concéntricos en dos niveles de metalización, sí proporcionan grados de libertad suficientes para operar en dos bandas, para separar los haces de polarización circular en esas dos bandas, y además, para colimar o conformar los haces. El reflectarray plano de la invención es un reflectarray convencional de bajo perfil (espesor en torno a dos milímetros), y es mucho más sencillo de fabricar que los reflectarrays sobre reflectores parabólicos al no necesitar sustratos dieléctricos flexibles que deban acomodarse sobre una superficie parabólica y al no necesitar moldes parabólicos. De hecho, únicamente requiere una superficie plana de alta precisión (como molde), sobre la que se fabrica el reflectarray unido a un sándwich estructural plano, que asegura la rigidez necesaria y cumple con las especificaciones mecánicas y termo-elásticas para una antena de uso espacial.

35

- 5 - La invención constituye una alternativa interesante a los reflectores parabólicos que se suelen utilizar convencionalmente para acceso a internet de banda ancha por satélite, ya que la antena reflectarray plana que se propone es aplicable como antena multihaz para generar coberturas celulares en estos escenarios, pero a menor coste, con menor peso y menor volumen ya que el reflectarray plano propuesto posee un espesor de sólo unos pocos milímetros. Además, la antena propuesta permite conseguir separación de haces de polarización circular ortogonal en dos bandas de frecuencia por cada alimentador, lo cual posibilita reducir el número de antenas que necesita el satélite en esa configuración de cuatro reflectores parabólicos a dos reflectarrays planos.
- 10 Éstas y otras ventajas pueden derivarse a la luz de la descripción de la invención que detalladamente se presenta a continuación.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

- 15 Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción un juego de dibujos en donde, con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

- 20 Figura 1. Muestra un esquema de cobertura desde un satélite geoestacionario con antenas multihaz que generan cuatro colores, utilizando dos sub-bandas de frecuencia distintas en transmisión y recepción, y dos polarizaciones distintas para cada frecuencia.

- 25 Figura 2. Muestra en perspectiva una antena reflectarray plana cuyas celdas desfasadoras contienen ocho anillos partidos en dos niveles de metalización para generar dos haces de polarizaciones circulares ortogonales en dos bandas de frecuencia, según una realización preferida de la invención.

- 30 Figura 3. Muestra en perspectiva desglosada una celda de la antena reflectarray plana para separación de haces de polarización circular a dos frecuencias, compuesta por dos conjuntos apilados de cuatro anillos conductores partidos que se imprimen sobre dos capas dieléctricas y encontrándose la capa inferior sobre un plano de masa conductor, todo ello según una realización preferida de la invención.

- 35 Figura 4A.- Muestra una vista en planta de los conjuntos de cuatro anillos conductores partidos

impresos en la capa superior de una celda de la antena reflectarray, antes de que los anillos impresos sean rotados para conseguir la separación de los dos haces ortogonales de polarización circular.

5 Figura 4B.- Muestra una vista en planta de los conjuntos de cuatro anillos conductores partidos impresos en la capa inferior de una celda de la antena reflectarray, antes de que los anillos impresos sean rotados para conseguir la separación de los dos haces ortogonales de polarización circular.

10 Figura 5A.- Muestra una gráfica con valores de la fase del coeficiente de reflexión a la frecuencia de transmisión de una celda reflectarray en entorno periódico para ondas con polarización lineal X bajo incidencia normal.

Figura 5B.- Muestra una gráfica con valores de fase del coeficiente de reflexión a la frecuencia de transmisión de una celda reflectarray en entorno periódico para ondas con polarización lineal Y bajo incidencia normal.

15

Figura 6A.- Muestra una gráfica con valores de fase del coeficiente de reflexión a la frecuencia de recepción de una celda reflectarray en entorno periódico para ondas con polarización lineal X bajo incidencia normal.

20

Figura 6B.- Muestra una gráfica con valores de fase del coeficiente de reflexión a la frecuencia de recepción de una celda reflectarray en entorno periódico para ondas con polarización lineal Y bajo incidencia normal.

25

Figura 7A.- Muestra una gráfica con la diferencia entre las fases de los coeficientes de reflexión a la frecuencia de transmisión para ondas con polarizaciones lineales X e Y, junto con los lugares geométricos de los puntos de coordenadas (Ψ'_{xi}, Ψ'_{yo}) para los que esa diferencia de fase vale ± 180 grados.

30

Figura 7B.- Muestra una curva de fase del coeficiente de reflexión para polarización lineal X a la frecuencia de transmisión cuando se recorren los lugares geométricos mostrados en la Figura 7A.

35 Figura 8A.- Muestra una gráfica con la diferencia entre las fases de los coeficientes de reflexión a la frecuencia de recepción para ondas con polarizaciones lineales X e Y, junto con los lugares

geométricos de los puntos de coordenadas $(\Psi_{xi}^u, \Psi_{yo}^u)$ para los que esa diferencia de fase vale ± 180 grados.

5 Figura 8B.- Muestra una curva de fase del coeficiente de reflexión para polarización lineal X a la frecuencia de recepción cuando se recorren los lugares geométricos mostrados en la Figura 8A.

10 Figura 9A.- Muestra una gráfica con valores de fase objetivo del coeficiente de reflexión de las celdas con los anillos impresos sin rotar de la antena reflectarray para polarización X a la frecuencia de transmisión. Las fases objetivo para polarización Y difieren de las de polarización X en ± 180 grados.

15 Figura 9B.- Muestra una gráfica con valores de fase objetivo del coeficiente de reflexión de las celdas con los anillos impresos sin rotar de la antena reflectarray para polarización X a la frecuencia de recepción. Las fases objetivo para polarización Y difieren de las de polarización X en ± 180 grados.

20 Figura 10A.- Muestra una gráfica con la corrección de fases objetivo de los coeficientes de reflexión para polarización circular a derechas a aplicar a la frecuencia de transmisión para la antena reflectarray diseñada con celdas no rotadas.

Figura 10B.- Muestra una gráfica con la corrección de fases objetivo de los coeficientes de reflexión para polarización circular a derechas a aplicar a la frecuencia de recepción para la antena reflectarray diseñada con celdas no rotadas.

25 Figura 11A.- Muestra una vista en planta de los conjuntos de cuatro anillos conductores partidos en la capa superior de una celda de la antena reflectarray después de ser rotados para conseguir la separación de haces ortogonales de polarización circular.

30 Figura 11B.- Muestra una vista en planta de los conjuntos de cuatro anillos conductores partidos en la capa inferior de una celda de la antena reflectarray después de ser rotados para conseguir la separación de haces ortogonales de polarización circular.

35 Figura 12A.- Muestra una gráfica con la variación de las fases de los coeficientes de reflexión a la frecuencia de transmisión para polarizaciones circulares a derechas de la celda de antena reflectarray bajo incidencia normal.

Figura 12B.- Muestra una gráfica con la variación de las fases de los coeficientes de reflexión a la frecuencia de transmisión para polarizaciones circulares a izquierdas de la celda de antena reflectarray bajo incidencia normal.

5 Figura 13A.- Muestra una gráfica con la variación de las fases de los coeficientes de reflexión a la frecuencia de recepción para polarizaciones circulares a derechas de la celda de antena reflectarray bajo incidencia normal.

10 Figura 13B.- Muestra una gráfica con la variación de las fases de los coeficientes de reflexión a la frecuencia de recepción para polarizaciones circulares a izquierdas de la celda de antena reflectarray bajo incidencia normal.

15 Figura 14A.- Muestra una representación esquemática de las máscaras del nivel de metalización situado entre las capas superior e inferior de la antena reflectarray mostrada en la Figura 2, según una realización preferida de la invención.

20 Figura 14B.- Muestra una representación esquemática de las máscaras del nivel de metalización situado encima de la capa superior de la antena reflectarray mostrada en la Figura 2, según una realización preferida de la invención.

Figura 15A.- Muestra el diagrama de radiación en el plano de elevación de la antena reflectarray a la frecuencia de transmisión.

25 Figura 15B.- Muestra el diagrama de radiación en el plano de elevación de la antena reflectarray a la frecuencia de recepción.

Figura 16. Muestra un diagrama de flujo del método de diseño de antenas reflectarray con capacidad para separar haces de polarización circular ortogonales en dos bandas de frecuencia, según una realización preferida de la invención.

30

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

Seguidamente se proporciona, con ayuda de las figuras anteriormente descritas, una explicación detallada de un ejemplo de realización preferente del objeto de la presente invención.

35

Lo que se presenta fundamentalmente es una antena tipo reflectarray plana capaz de separar

haces de polarización circular a derechas y a izquierdas en dos direcciones diferentes y en dos bandas de frecuencia distintas. Una posible aplicación de la invención es como antena multihaz para el envío y recepción de datos entre un satélite y estaciones de tierra; por ejemplo, para un satélite geoestacionario que genera una cobertura celular con reutilización de frecuencia y polarización. La antena puede estar construida con materiales y tecnologías de fabricación cualificadas para su uso en el espacio, como son telas de fibra de carbono pre-impregnadas con resinas (materiales CFRP: “Carbon-Fibre-Reinforced Polymers” en inglés), a las que se añaden una o varias capas pre-impregnadas de fibras dieléctricas, como Kevlar o cuarzo y Kapton con metalizaciones impresas mediante fotograbado. Esta tecnología es conocida en los subreflectores dicróicos de varias misiones científicas, tales como Cassini, Voyager, Mars- Express, Venus-Express, Bepi Colombo, etc.

La Figura 1 muestra esquemáticamente la cobertura desde un satélite geoestacionario con antenas multihaz que generan cuatro colores (A, B, C, D), utilizando dos sub-bandas de frecuencia distintas tanto en transmisión, TX, (F_1^{TX} , F_2^{TX}) como en recepción, RX, (F_1^{RX} , F_2^{RX}), y utilizando también dos polarizaciones distintas, P_1 y P_2 . Cada color se corresponde con una de esas dos polarizaciones, esto es, P_1 o P_2 , y con una de las dos sub-bandas de frecuencias en TX y en RX, es decir, con F_1^{TX} y F_1^{RX} , o con F_2^{TX} y F_2^{RX} . En el estado de la técnica anterior a la invención, en estos satélites se han venido utilizando cuatro reflectores parabólicos con múltiples alimentadores para generar la cobertura celular en una determinada región geográfica, estando esta cobertura compuesta por un elevado número de haces (entre 50 y 100). Cada reflector cubre el radioenlace descendente en TX (con frecuencia central en torno a 20 GHz) y el radio enlace ascendente en RX (con frecuencia central en torno a 30 GHz), y se encarga de generar una cuarta parte de los haces. Las bandas de frecuencia de TX y RX se dividen en dos sub-bandas, y cada reflector cubre una de las dos sub-bandas en TX y RX y una polarización de las dos ortogonales que existen (vertical u horizontal si se habla de polarización lineal; a derechas o izquierdas si se habla de polarización circular). De esta manera, se consiguen haces de cuatro características distintas, que son los también llamados colores (A, B, C, D), que se superponen como se muestra en la Figura 1 para generar la cobertura sin que se produzcan solapamientos entre colores iguales en una misma región (solapamientos que dan lugar a interferencias). Es deseable disponer de antenas reflectoras capaces de generar dos colores en TX y RX ya que eso permite reducir a dos el número de antenas embarcadas en el satélite, con la consiguiente reducción en peso y volumen. Una manera de hacerlo es diseñar antenas capaces de separar haces en dos polarizaciones ortogonales a dos frecuencias; esto es, capaces de generar los colores A y C, o los colores B y D, en el ejemplo de la Figura 1. Esto ya se ha conseguido con reflectarrays planos en el caso de haces de polarización lineal, y con reflectarrays parabólicos en

el caso de haces de polarización circular, pero el reflectarray plano que se propone para conseguir la separación de haces de polarización circular en TX y RX va un paso más allá, como se detalla a continuación.

5 En la Figura 2 se muestra una implementación preferida de la invención, consistente en una antena reflectarray (100) plana en la que el plano que limita superiormente la antena coincide con el plano X-Y de un sistema de coordenadas (X, Y, Z) con origen en el centro del reflectarray (100). Éste está iluminado por un alimentador (13) primario, que genera ondas polarizadas circularmente a derechas y a izquierdas. Típicamente, el alimentador comprende
10 una antena de bocina cónica o corrugada, precedida de un polarizador y de un transductor de ortomodos. El reflectarray está compuesto por una agrupación plana de celdas desfasadoras (12), también denominadas celdas reflectarray, que son las que se encargan de colimar y separar las ondas polarizadas circularmente a derechas y a izquierdas procedentes del alimentador (13). Las celdas desfasadoras están distribuidas sobre una retícula (11) periódica
15 rectangular de período $p_x \times p_y$.

En una realización preferida de la invención, el sustrato soporte del reflectarray (100) está compuesto por dos capas dieléctricas (15, 16), una primera capa o capa dieléctrica inferior (15) y una segunda capa o capa dieléctrica superior (16), apiladas sobre un plano conductor (14),
20 también denominado plano de masa, como indica la Figura 2. En cada capa de las al menos dos capas dieléctricas (15, 16) se distinguen dos caras, una cara de arriba y otra de abajo.

Cada celda desfasadora consta de dos conjuntos coplanares superpuestos de cuatro anillos conductores concéntricos, que están partidos en dos mitades iguales, lo cual da un total de
25 16 arcos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), tal y como se muestra en la Figura 3, donde se ilustra:

- un primer conjunto de cuatro anillos conductores concéntricos partidos en dos arcos e impresos sobre una de las caras de una de las capas dieléctricas, que en el ejemplo es la capa superior (16); y
- 30 - un segundo conjunto de cuatro anillos conductores concéntricos partidos en dos arcos e impresos sobre: o bien la otra cara de la misma capa dieléctrica, esto es, la capa superior (16); o bien sobre una de las caras de otra de las capas dieléctricas, que en un ejemplo de reflectarray (100) de dos capas (15, 16), sería la capa inferior (15).

35 En una realización preferida de la invención, los arcos conductores del conjunto de anillos superior están impresos sobre la cara de arriba de la capa dieléctrica superior (16), y los arcos

del conjunto de anillos inferior están impresos sobre la cara de abajo de la citada capa dieléctrica superior (16). La capa dieléctrica inferior (15) hace de separador entre la capa dieléctrica superior (16) metalizada por las dos caras -de arriba y abajo- y el plano conductor (14). Como variante, se pueden imprimir los arcos conductores sobre la cara de arriba de la capa dieléctrica inferior (15) en lugar de hacerlo sobre la cara de abajo de la capa dieléctrica superior (16). Asimismo, el sustrato multicapa puede contener una tercera capa de pegamento entre las dos capas dieléctricas (15, 16), o una cuarta capa situada por encima de la capa dieléctrica superior (16) que actúa como radomo para proteger el reflectarray (100). Finalmente, el separador entre la capa dieléctrica superior (16) y el plano conductor (14), en lugar de ser un dieléctrico sólido, puede ser un material con forma de panal de abejas (“honeycomb”, en inglés) cualificado para el espacio, para reducir la masa del reflectarray (100). Aparte de las capas indicadas previamente, que son las encargadas de proporcionar el desfase requerido en el campo electromagnético reflejado, la antena reflectarray (100) puede tener una serie de capas estructurales, necesarias para darle robustez mecánica. Las distintas capas, tanto si son soporte de metalizaciones desfasadoras como si son estructurales, pueden ir fijadas mediante pegamentos, resinas de bajas pérdidas o tornillos y arandelas de plástico distribuidos por toda la superficie del reflectarray (100) plano.

En una primera etapa de diseño del reflectarray (100), los anillos conductores partidos se disponen como muestran las Figuras 3, 4A y 4B. La Figura 3 muestra los arcos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36) de una celda desfasadora (12) que resultan de los dos conjuntos apilados de cuatro anillos conductores partidos que componen la celda desfasadora (12) y que se imprimen sobre las dos capas dieléctricas inferior y superior (15, 16), encontrándose la capa dieléctrica inferior (15) sobre el plano conductor (14). Los cuatro anillos conductores partidos impresos sobre la cara de arriba la capa dieléctrica superior (16) y sobre la cara de abajo de dicha capa dieléctrica (16) (o bien, sobre la cara de arriba de la capa dieléctrica inferior (15)) se muestran respectivamente en las Figuras 4A y 4B. La configuración del reflectarray (100), en esta primera etapa de diseño, con los anillos impresos, pero aún no rotados, permite colimar los haces de polarización circular a derechas e izquierdas en la misma dirección sin separarlos.

Las Figuras 4A y 4B muestran los radios medios de los cuatro anillos concéntricos, r_i^u , r_o^u , r_i^l y r_o^l ($r_i^u < r_o^u < r_i^l < r_o^l$), siendo el radio medio la media aritmética entre el radio externo y el radio interno de cada anillo, y siendo la diferencia entre estos dos radios igual a la anchura común de todos los anillos w . Los citados radios medios (r_i^u , r_o^u , r_i^l y r_o^l) son iguales en los dos conjuntos de anillos. Cada anillo está partido en dos arcos de la misma longitud, teniendo

también los intersticios entre esos dos arcos la misma longitud, con lo cual, todos los anillos partidos tienen un eje de simetría especular:

- En el conjunto de anillos superior (Figura 4A), los ejes de simetría especular del primer y tercer anillos más externos son paralelos a un primer eje, el eje X (según el sistema de coordenadas definido en la Figura 2), con lo cual, los arcos de estos anillos (21, 22, 29, 30) están preferentemente orientados a lo largo del eje X. Los ejes de simetría especular del segundo y cuarto anillos más externos son paralelos a un segundo eje, el eje Y, con lo cual, los arcos de estos anillos (25, 26, 33, 34) están preferentemente orientados a lo largo del eje Y.
- La orientación de los arcos es justamente la contraria en el conjunto de anillos inferior (Figura 4B). Los ejes de simetría especular del primer y tercer anillos más externos son paralelos al eje Y sus arcos (27, 28, 35, 36) están preferentemente orientados a lo largo del eje Y, mientras que los ejes de simetría especular del segundo y cuarto anillos más externos son paralelos al eje X y sus arcos (23, 24, 31, 32) están preferentemente orientados a lo largo del eje X.

Del conjunto de todos los arcos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), de los dos conjuntos de anillos, mostrados en las Figuras 3, 4A y 4B, se distinguen:

- Los arcos de los dos anillos más externos de los dos conjuntos de anillos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28), que son los arcos que se encargan de ajustar la fase de las ondas que llegan a cada celda en la banda de frecuencias inferior.
- Los arcos de los dos anillos más internos de los dos conjuntos de anillos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), arcos que se encargan de ajustar la fase de las ondas que llegan a la celda en la banda de frecuencias superior.

25

Y, más concretamente, en la banda de frecuencias inferior:

- Del conjunto de los arcos de los dos anillos más externos en los dos conjuntos de anillos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28), los que están preferentemente orientados en el eje X (21, 22, 23, 24) se encargan de ajustar la fase de las ondas polarizadas linealmente que llegan a la celda con el campo eléctrico incidente preferentemente orientado en el plano X-Z (polarización lineal X).
- Del conjunto de los arcos de los dos anillos más externos en los dos conjuntos de anillos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28), los que están preferentemente orientados en el eje Y (25, 26, 27, 28) se encargan de ajustar la fase de las ondas polarizadas linealmente con el campo eléctrico incidente preferentemente orientado a lo largo del eje Y (polarización lineal Y).

35

Análogamente, en la banda de frecuencias superior:

- Del conjunto de los arcos de los dos anillos más internos en los dos conjuntos de anillos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), los que están preferentemente orientados en la dirección X (29, 30, 31, 32) se encargan de ajustar la fase de las ondas incidentes con polarización lineal X.
- Del conjunto de los arcos de los dos anillos más internos en los dos conjuntos de anillos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), los que están preferentemente orientados en la dirección Y (33, 34, 35, 36) se encargan de ajustar la fase de las ondas incidentes con polarización lineal Y.

Esto quiere decir que la celda desfasadora (12) dispone de cuatro arcos (dos en el conjunto de anillos de arriba y dos en el conjunto de anillos de abajo) para ajustar la fase de cada polarización lineal en cada frecuencia. Y además, como se trata de dos parejas de arcos apilados en dos niveles, existe un fuerte acoplamiento entre los arcos situados en distintos conjuntos de anillos y entre sus resonancias, lo cual garantiza un amplio rango de fase para la celda en las dos polarizaciones lineales y en las dos bandas de frecuencia.

Para cada celda desfasadora (12), la selección de los períodos a lo largo de los ejes X e Y (p_x , p_y), la selección de los materiales de las capas dieléctricas y la selección de los espesores de las capas inferior (15) y superior (16) (h_A , h_B), tal y como se representan en la Figura 3, se hace en función de las frecuencias centrales de las dos bandas de operación, TX (transmisión) y RX (recepción), de acuerdo con el estado anterior de la técnica. Para el caso considerado en esta implementación concreta, se supone que la frecuencia central de la banda de frecuencia inferior, banda de TX, es de 19.7 GHz y que la frecuencia central de la banda de frecuencia superior, banda de RX, es de 29.5 GHz. De acuerdo con estos valores de frecuencias centrales de las bandas, el material seleccionado para las dos capas dieléctricas ha sido RT Duroid 5880 con las siguientes características:

- Espesor de 0.787 mm; esto es, $h_A=h_B=0.787$ mm en la Figura 3.
- Siendo ϵ_0 la permitividad eléctrica del vacío (cuyo valor es $8,8541878 \times 10^{-12}$ F/m), la capa dieléctrica inferior (15) y la capa dieléctrica superior (16) tienen una permitividad eléctrica del mismo valor: $\epsilon_A = \epsilon_B = 2.33\epsilon_0$.
- La tangente de pérdidas en las dos capas vale $\tan\delta=0.001$.

Además, se ha tomado el mismo período en las direcciones de los dos ejes X e Y $p_x=p_y=6.5$ mm, se ha tomado una anchura de los anillos $w=0.2$ mm, y para los radios medios de los anillos, se ha tomado $r'_i=1.4$ mm, $r'_o=1.8$ mm, $r'_i=2.6$ mm y $r'_o=3$ mm. Por lo que respecta a los ángulos

subtendidos por los arcos (Ψ'_{xo} , Ψ'_{xi} , Ψ'_{yi} , Ψ'_{yo} , Ψ^u_{xo} , Ψ^u_{xi} , Ψ^u_{yi} , Ψ^u_{yo}) de los cuatro anillos concéntricos desde su centro, representados en las Figuras 4A y 4B, estos ocho ángulos se escalan para los arcos del conjunto de anillos internos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), encargados de la banda superior (de RX, en el ejemplo), en función de los ángulos de los arcos del conjunto de anillos externos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28), encargados de la banda inferior (de TX, en el ejemplo), de forma que se cumple que $\Psi'_{xo}=\Psi'_{xi}$, $\Psi'_{yi}=0.95\Psi'_{yo}$, $\Psi^u_{xo}=0.7\Psi^u_{xi}$ y $\Psi^u_{yi}=1.125\Psi^u_{yo}$. Este escalado no es vinculante, y se puede optimizar con vistas a aumentar el ancho de banda del reflectarray (100) en cada una de sus dos bandas de funcionamiento, TX y RX, o con vistas a reducir el nivel de polarización cruzada de la radiación emitida en cada una de las dos bandas.

Una vez hecho el escalado, las cuatro variables independientes de ángulos Ψ'_{xi} , Ψ'_{yo} , Ψ^u_{xi} y Ψ^u_{yo} que quedan son las que se utilizan para ajustar los desfases introducidos por cada celda desfasadora (12) en el diseño de la antena reflectarray (100).

A la hora de diseñar el reflectarray (100) plano, los desfases introducidos por cada celda desfasadora (12) para colimar el haz se calculan suponiendo que la celda se encuentra en un entorno periódico, lo cual se conoce como "hipótesis de periodicidad local". Si bien la hipótesis de periodicidad local es una aproximación, su utilidad ha sido contrastada por el hecho de que las medidas de los diagramas de radiación de reflectarrays fabricados sobre la base de esa aproximación han demostrado una buena concordancia con las predicciones teóricas.

Supongamos que sobre una celda de reflectarray situado en un entorno periódico incide una onda electromagnética a la que corresponde un vector campo eléctrico complejo $\mathbf{E}_i = E_{i,x}\hat{\mathbf{x}} + E_{i,y}\hat{\mathbf{y}} + E_{i,z}\hat{\mathbf{z}}$ sobre la superficie del reflectarray (donde $E_{i,x}$, $E_{i,y}$ y $E_{i,z}$ son las componentes cartesianas del campo eléctrico complejo de la onda incidente; y donde $\hat{\mathbf{x}}$, $\hat{\mathbf{y}}$ y $\hat{\mathbf{z}}$ son tres vectores unitarios a lo largo de tres ejes X, Y y Z definidos en la celda de forma análoga a como se definen en la Figura 2), y supongamos que a la onda reflejada por la celda en entorno periódico le corresponde un campo eléctrico complejo $\mathbf{E}_r = E_{r,x}\hat{\mathbf{x}} + E_{r,y}\hat{\mathbf{y}} + E_{r,z}\hat{\mathbf{z}}$ sobre la superficie del reflectarray (donde $E_{r,x}$, $E_{r,y}$ y $E_{r,z}$ son ahora las componentes cartesianas del campo eléctrico complejo de la onda reflejada). Se define la matriz de reflexión de la celda para polarización lineal, (\mathbf{R}_{PL}), como una matriz 2x2 de números complejos, dada por la siguiente relación:

$$\begin{pmatrix} E_{r,x} \\ E_{r,y} \end{pmatrix} = (\mathbf{R}_{PL}) \cdot \begin{pmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{pmatrix} \quad (1)$$

donde R_{xx} es la razón entre $E_{r,x}$ y $E_{i,x}$ cuando $E_{i,y}$ es nula; R_{xy} es la razón entre $E_{r,x}$ y $E_{i,y}$ cuando $E_{i,x}$ es nula; R_{yx} es la razón entre $E_{r,y}$ y $E_{i,x}$ cuando $E_{i,y}$ es nula; y finalmente, R_{yy} es la razón entre $E_{r,y}$ y $E_{i,y}$ cuando $E_{i,x}$ es nula. Para celdas con bajo nivel de polarización

cruzada como la que aparece en la Figura 3, se cumple que $R_{xy} \approx R_{yx} \approx 0$, y que $|R_{xx}| \approx |R_{yy}| \approx 1$, siendo las fases de R_{xx} y R_{yy} (a R_{xx} y R_{yy} se les conoce como coeficientes de reflexión para polarización lineal X y polarización lineal Y respectivamente), denotadas aquí como $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$, las que determinan la conducta de la celda desfasadora (12) en el reflectarray (100). De hecho, $\angle R_{xx}$ es la que determina la contribución de la celda (12) al diagrama de radiación generado por el reflectarray (100) para una onda incidente con polarización lineal X (campo eléctrico preferentemente contenido en el plano X-Z), y $\angle R_{yy}$, la que determina la contribución de la celda desfasadora (12) al diagrama de radiación generado por una onda incidente con polarización Y (campo eléctrico preferentemente orientado en la dirección del eje Y).

10

Si consideramos ahora la celda desfasadora (12) de la Figura 3 en el caso concreto en que los materiales y las dimensiones se eligen como se ha mencionado anteriormente, los valores que se obtienen para las fases $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ a 19.7 GHz en función de Ψ'_{xi} y Ψ'_{yo} cuando $\Psi^u_{xi}=115^\circ$ y $\Psi^u_{yo}=100^\circ$ son los que se muestran en las Figuras 5A y 5B respectivamente, y los valores que se obtienen para las fases $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ a 29.5 GHz en función de Ψ^u_{xi} y Ψ^u_{yo} cuando $\Psi'_{xi}=105^\circ$ y $\Psi'_{yo}=95^\circ$ son los que se muestran en las Figuras 6A y 6B respectivamente.

15

La Figura 5A muestra que el valor de la fase $\angle R_{xx}$ a 19.7 GHz está controlado por la longitud de los cuatro arcos más externos de los dos conjuntos de anillos preferentemente orientados en la dirección X (21, 22, 23, 24), y que es prácticamente independientemente de la longitud de los cuatro arcos más externos de los dos conjuntos de anillos preferentemente orientados en la dirección Y (25, 26, 27, 28). Lo mismo se puede decir de la Figura 5B si intercambiamos $\angle R_{xx}$ por $\angle R_{yy}$, y si intercambiamos los arcos orientados en la dirección X por los arcos orientados en la dirección Y.

25

Análogamente, la Figura 6A muestra que el valor de la fase $\angle R_{xx}$ a 29.5 GHz está controlado por la longitud de los cuatro arcos más internos de los dos conjuntos de anillos preferentemente orientados en la dirección X (29, 30, 31, 32), y que es prácticamente independientemente de la longitud de los cuatro arcos más internos de los dos conjuntos de anillos preferentemente orientados en la dirección Y (33, 34, 35, 36). De nuevo, la misma afirmación se mantiene para la Figura 6B si intercambiamos $\angle R_{xx}$ por $\angle R_{yy}$, y si intercambiamos los arcos dirigidos en la dirección X por los arcos dirigidos en la dirección Y.

30

Por tanto, de los 16 arcos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36) que tiene la celda desfasadora (12) en dos niveles de metalización, disponemos de cuatro arcos para controlar cada una de las dos polarizaciones lineales de las ondas incidentes (la X y la Y) en

35

cada una de las dos bandas de frecuencia (la de TX y la de RX).

Los mapas de fase mostrados en las Figuras 5 y 6 son suficientes para diseñar reflectarrays capaces de enfocar haces de polarización lineal X e Y en una misma dirección en dos bandas de frecuencia centradas en 19.7 GHz y en 29.5 GHz. Si además queremos que el reflectarray enfoque haces de polarización circular, hay que imponer la condición adicional $\angle R_{xx} - \angle R_{yy} = \pm 180^\circ$ a fin de que la onda polarizada circularmente procedente del alimentador se refleje en el reflectarray manteniendo el sentido de la polarización circular (a derechas o a izquierdas).

En la Figura 7A se representa la diferencia de fases $\angle R_{xx} - \angle R_{yy}$ en función de los ángulos Ψ'_{xi} y Ψ'_{yo} a 19.7 GHz (la diferencia $\angle R_{xx} - \angle R_{yy}$ se obtiene a partir de los valores de las fases $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ representados en las Figuras 5A y 5B), y se muestran dos curvas que indican claramente las parejas de valores de ángulos (Ψ'_{xi}, Ψ'_{yo}) que permiten satisfacer la condición $\angle R_{xx} - \angle R_{yy} = \pm 180^\circ$. En la Figura 7B se representa la curva de fase para $\angle R_{xx}$ que se describe al variar el ángulo Ψ'_{xi} entre 70 y 120 grados y recorrer las dos curvas indicadas en la Figura 7A. Los valores de $\angle R_{yy}$ se pueden obtener sumando $\pm 180^\circ$ a los de $\angle R_{xx}$, de acuerdo con la Figura 7A. El rango de fase obtenido para $\angle R_{xx}$ es de 543 grados, que es más que suficiente para diseñar un reflectarray (en este caso, de polarización circular). La curva de fase para $\angle R_{xx}$ de la Figura 7B no tiene grandes cambios de pendiente, lo cual es debido al comportamiento multiresonante de los arcos exteriores apilados en dos niveles de metalización de la Figura 3 que están dirigidos preferentemente en la dirección X (21, 22, 23, 24). Este comportamiento suave de la curva de fase para $\angle R_{xx}$ hace que la celda desfasadora (12) de la Fig. 3 sea una celda de banda ancha para ondas incidentes con polarización X. El mismo perfil suave se puede obtener también para $\angle R_{yy}$ (que difiere de $\angle R_{xx}$ en una constante), lo cual se debe en este caso al comportamiento multiresonante de los arcos exteriores apilados de la Fig. 3 dirigidos preferentemente en la dirección Y (25, 26, 27, 28), que hacen que la celda tenga una respuesta de banda ancha para ondas incidentes con polarización Y.

Las observaciones realizadas para las Figuras 7A y 7B a 19.7 GHz son extensibles a las Figuras 8A y 8B a 29.5 GHz. En la Figura 8A se muestran de nuevo las dos curvas que deben recorrer las parejas de valores de ángulos $(\Psi^u_{xi}, \Psi^u_{yo})$ para que se cumpla la condición $\angle R_{xx} - \angle R_{yy} = \pm 180^\circ$ (en este caso $\angle R_{xx} - \angle R_{yy}$ se ha obtenido a partir de los valores de $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ representados en las Figuras 6A y 6B), y así poder enfocar el haz de polarización circular procedente del alimentador sin cambiar el sentido de la polarización circular, en este caso, a

29.5 GHz. La Figura 8B nos da la curva de fase para $\angle R_{xx}$ en función de Ψ_{xi}^u de manera que se mantenga la condición $\angle R_{xx} - \angle R_{yy} = \pm 180^\circ$. Aunque la curva de fase sea ligeramente más abrupta que la de la Figura 7B, sigue observándose un comportamiento multiresonante que permite conseguir un rango de fase de 555 grados cuando Ψ_{xi}^u varía entre 105 y 160 grados.

5 A 29.5 GHz, el comportamiento multiresonante de $\angle R_{xx}$ se debe a los anillos apilados internos preferentemente orientados en dirección X de la Figura 3 (29, 30, 31, 32), y el comportamiento multiresonante de $\angle R_{yy}$, a los anillos apilados internos preferentemente orientados en la dirección Y (33, 34, 35, 36).

10 La celda desfasadora (12), que ha sido caracterizada en las Figuras 5 a 8, es utilizada para diseñar un reflectarray (100) que enfoca haces de polarización circular a derechas e izquierdas en la dirección dada por las coordenadas esféricas $\theta_b = 11.8^\circ$ y $\phi_b = 0^\circ$ relativas al sistema de coordenadas (X, Y, Z) de la Figura 2, tanto a 19.7 GHz como a 29.5 GHz. Se va a suponer que el reflectarray (100) es circular, y está compuesto por 1085 celdas distribuidas

15 en una rejilla periódica de 37x37 celdas cuadradas en la que cada celda tiene un tamaño de $6.5 \times 6.5 \text{ mm}^2$. El reflectarray (100) está iluminado por una antena de bocina de sección circular, que radia un campo electromagnético con polarización circular doble, cuyo centro de fase está situado en el punto de coordenadas (X=-92 mm, Y=0 mm, Z=440.6 mm) con respecto al sistema de coordenadas mostrado en la Figura 2. La antena de bocina tiene dos puertos de

20 entrada, uno para polarización circular a derechas, y otro para polarización circular a izquierdas. Los diagramas de radiación de las dos polarizaciones circulares ortogonales son idénticos, tienen simetría de revolución, y se modelan mediante una función $\cos^q(\theta)$, siendo θ el ángulo polar de un sistema de coordenadas esféricas con origen en el centro de fase de la bocina cuyo eje z va a lo largo del eje de revolución de la antena de bocina. Se cumple que

25 $q=20$ a 19.7 GHz, y $q=40$ a 29.5 GHz. La Figura 9A muestra la distribución que debe tener la fase $\angle R_{xx}$ en las celdas (12) del reflectarray (100) a 19.7 GHz para conseguir colimar el haz en la dirección anteriormente indicada, y la Figura 9B muestra la distribución que debe tener la fase $\angle R_{xx}$ en las celdas (12) del reflectarray (100) a 29.5 GHz. Como el reflectarray (100) tiene que radiar haces polarizados circularmente, se va a cumplir que las fases objetivo para

30 polarización Y difieren de las fases objetivo para polarización X en $\pm 180^\circ$ (esto es, $\angle R_{yy} = \angle R_{xx} \pm 180^\circ$), con lo cual, las distribuciones de fases para $\angle R_{yy}$ se obtienen a partir de las de $\angle R_{xx}$ siguiendo esa relación. De cara al ajuste de las dimensiones de las celdas (12) para colimar el haz de polarización circular a las dos frecuencias, lo más cómodo es ajustar primero los ángulos subtendidos por los arcos externos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28) a 19.7 GHz para

35 conseguir la distribución de fases de la Figura 9A, suponiendo que no están presentes los arcos internos. Esto es así porque los arcos internos no afectan sustancialmente a los valores

de las fases a la frecuencia inferior por tener unas longitudes muy inferiores a media longitud de onda a esa frecuencia (que sería la longitud resonante), con lo cual, su presencia a 19.7 GHz no es absolutamente necesaria. Una vez ajustadas las dimensiones de los arcos externos, se ajustan los ángulos subtendidos por los arcos internos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 5 36) a 29.5 GHz para conseguir la distribución de fases de la Figura 9B, y este ajuste se lleva a cabo en presencia de los arcos externos con las dimensiones previamente obtenidas a 19.7 GHz. Hay que proceder así porque a 29.5 GHz los arcos externos están fuertemente acoplados a los arcos internos, y los valores de las fases $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ a esa frecuencia dependen fuertemente, tanto de las dimensiones de los arcos internos como de las 10 dimensiones de los arcos externos. Cuando se ha acabado el ajuste grueso de las dimensiones de los arcos externos a 19.7 GHz y de los arcos internos a 29.5 GHz, es conveniente hacer un ajuste fino de las dimensiones de los arcos externos a 19.7 GHz en presencia de los arcos internos obtenidos en primera iteración a 29.5 GHz, y también, un ajuste fino de las dimensiones de los arcos internos a 29.5 GHz en presencia de los arcos 15 externos obtenidos en segunda iteración a 19.7 GHz. Las simulaciones realizadas demuestran que el proceso de ajuste de las dimensiones de los arcos a 19.7 GHz y a 29.5 GHz converge después de esta segunda iteración.

Una vez descrita la primera etapa de diseño del reflectarray (100) para emitir haces de 20 polarización circular a derechas e izquierdas a 19.7 GHz (TX) y a 29.5 GHz (RX) en una determinada dirección dada por las coordenadas esféricas θ_b y φ_b , se pasa a una segunda etapa de diseño cuyo objetivo es separar los haces de polarización circular a derechas e izquierdas obtenidos en la primera etapa en dos direcciones distintas, tanto a 19.7 GHz como a 29.5 GHz. Para describir esta segunda etapa de diseño, es necesario introducir previamente 25 el concepto de matriz de reflexión de una celda de reflectarray para polarización circular, que desempeña en reflectarrays de polarización circular un papel análogo al que desempeña la matriz de reflexión de la ecuación (1) en reflectarrays de polarización lineal. Supongamos que sobre una celda de reflectarray situada en un entorno periódico incide una onda electromagnética cuyo campo eléctrico complejo vale $\mathbf{E}_i = E_{i,\text{PCD}}\hat{\mathbf{u}}_{\text{PCD}} + E_{i,\text{PCI}}\hat{\mathbf{u}}_{\text{PCI}}$ sobre la 30 superficie del reflectarray, siendo $E_{i,\text{PCD}}$ la componente del campo eléctrico incidente correspondiente a una onda polarizada circularmente a derechas, y $E_{i,\text{PCI}}$, la componente del campo eléctrico incidente correspondiente a una onda polarizada circularmente a izquierdas ($\hat{\mathbf{u}}_{\text{PCD}}$ y $\hat{\mathbf{u}}_{\text{PCI}}$ son vectores unitarios complejos utilizados para indicar la dirección de los campos de ondas polarizadas circularmente a derechas y a izquierdas respectivamente). 35 Supongamos también que a la onda reflejada por la celda en entorno periódico le corresponde un campo eléctrico complejo que vale $\mathbf{E}_r = E_{r,\text{PCD}}\hat{\mathbf{u}}_{\text{PCD}} + E_{r,\text{PCI}}\hat{\mathbf{u}}_{\text{PCI}}$ sobre la superficie del

reflectarray (de nuevo, $E_{r,PCD}$ representaría la componente del campo eléctrico reflejado correspondiente a una onda polarizada circularmente a derechas, y $E_{i,PCI}$, la componente del campo eléctrico reflejado correspondiente a una onda polarizada circularmente a izquierdas). Se define la matriz de reflexión de la celda para polarización circular, (R_{PC}), como una matriz

5 2x2 de números complejos, dada por la siguiente relación:

$$\begin{pmatrix} E_{r,PCD} \\ E_{r,PCI} \end{pmatrix} = (R_{PC}) \cdot \begin{pmatrix} E_{i,PCD} \\ E_{i,PCI} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{PCD,PCD} & R_{PCD,PCI} \\ R_{PCI,PCD} & R_{PCI,PCI} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{i,PCD} \\ E_{i,PCI} \end{pmatrix} \quad (2)$$

donde $R_{PCD,PCD}$ es la razón entre $E_{r,PCD}$ y $E_{i,PCD}$ cuando $E_{i,PCI}$ es nula; $R_{PCD,PCI}$ es la razón entre $E_{r,PCD}$ y $E_{i,PCI}$ cuando $E_{i,PCD}$ es nula; $R_{PCI,PCD}$ es la razón entre $E_{r,PCI}$ y $E_{i,PCD}$ cuando $E_{i,PCI}$ es nula; y finalmente, $R_{PCI,PCI}$ es la razón entre $E_{r,PCI}$ y $E_{i,PCI}$ cuando $E_{i,PCD}$ es nula. De la misma manera que las fases $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ son las que controlan la contribución de cada celda desfasadora en un reflectarray de polarización lineal, las fases $\angle R_{PCD,PCD}$ y $\angle R_{PCI,PCI}$ son las que controlan la contribución de cada celda desfasadora en un reflectarray de polarización circular. De hecho, la fase $\angle R_{PCD,PCD}$ es la que determina la contribución de la celda al

10 diagrama de radiación generado por un reflectarray para una onda incidente con polarización circular a derechas, y $\angle R_{PCI,PCI}$ hace ese papel para la celda en un reflectarray sobre el que incide una onda con polarización circular a izquierdas.

La técnica de rotación variable (TRV) para el diseño de reflectarrays de polarización circular nos dice que si las metalizaciones de la celda de un reflectarray se giran un ángulo α alrededor de un eje que pasa por el centro de la celda ($\alpha > 0$ si el giro se realiza en sentido antihorario para un observador que mira hacia la superficie del reflectarray, y $\alpha < 0$ si el giro se realiza en sentido horario), se produce para esa celda una variación en la fase de $R_{PCD,PCD}$ dada por $\Delta(\angle R_{PCD,PCD}) = 2\alpha$, y una variación en la fase de $R_{PCI,PCI}$ dada por $\Delta(\angle R_{PCI,PCI}) = -2\alpha$. No obstante,

25 estas variaciones de $\angle R_{PCD,PCD}$ y $\angle R_{PCI,PCI}$ sólo se cumplen estrictamente hablando si se verifica que la diferencia entre $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ (esto es, entre las fases de los coeficientes de la diagonal de la matriz de reflexión de la celda para polarización lineal) es igual a $\pm 180^\circ$ en el sistema de coordenadas rotado un ángulo α en la celda.

Volviendo al ejemplo de realización del reflectarray (100) que se diseñó para enfocar haces de polarización circular a derechas e izquierdas en la dirección dada por las coordenadas esféricas $\theta_b = 11.8^\circ$ y $\varphi_b = 0^\circ$ de la Figura 2 a 19.7 GHz y a 29.5 GHz, se procede a modificar las celdas (12) de ese reflectarray mediante la TRV de forma que a 19.7 GHz el haz de polarización circular a derechas pase a apuntar en la dirección $\theta_{b,PCD} = 13.7^\circ$ y $\varphi_{b,PCD} = 0^\circ$ (lo

35 cual significa que se producen variaciones $\Delta\theta_b = +1.9^\circ$ y $\Delta\varphi_b = 0^\circ$ en los ángulos que dan la

dirección de apuntamiento para este haz), y de forma que el haz de polarización circular a izquierdas pase a apuntar en la dirección $\theta_{b,PCI}=9.9^\circ$ y $\varphi_{b,PCI}=0^\circ$ (lo cual significa que de nuevo se producen variaciones $\Delta\theta_b=-1.9^\circ$ y $\Delta\varphi_b=0^\circ$ en los ángulos que dan la dirección de apuntamiento para ese segundo haz). Además, se aplica la TRV una segunda vez para que a 29.5 GHz el haz de polarización circular a derechas pase a apuntar en la dirección $\theta_{b,PCD}=9.9^\circ$ y $\varphi_{b,PCD}=0^\circ$ ($\Delta\theta_b=-1.9^\circ$ y $\Delta\varphi_b=0^\circ$ para este haz), y de forma que el haz de polarización a izquierdas pase a apuntar en la dirección $\theta_{b,PCI}=13.7^\circ$ y $\varphi_{b,PCI}=0^\circ$ ($\Delta\theta_b=+1.9^\circ$ y $\Delta\varphi_b=0^\circ$ para ese segundo haz). Para poder apuntar los haces de polarización circular a derechas e izquierdas en direcciones distintas a 19.7 y a 29.5 GHz, es necesario que la TRV se pueda aplicar de forma independiente a esas dos frecuencias. La Figura 10A muestra las variaciones en las fases de $\angle R_{PCD,PCD}$ ($\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$, siendo $R_{PCD,PCD}$ el coeficiente de reflexión para polarización circular a derechas) que es preciso añadir en las celdas desfasadoras (12) de la antena reflectarray (100) previamente diseñada (la que enfocaba los haces de polarización circular a derechas y a izquierdas en la dirección $\theta_b=11.8^\circ$ y $\varphi_b=0^\circ$ siguiendo la distribución de fases mostrada en las Figs. 9A y 9B) para que la dirección de apuntamiento de la polarización circular a derechas pase a ser $\theta_{b,PCD}=13.7^\circ$ y $\varphi_{b,PCD}=0^\circ$ a 19.7 GHz. Las variaciones requeridas en $\angle R_{PCI,PCI}$ ($R_{PCI,PCI}$ es el coeficiente de reflexión para polarización circular a izquierdas) son iguales en valor absoluto y de signo contrario a las de la Fig. 10A (esto es, $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})=-\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$) si queremos que la dirección de apuntamiento de la polarización circular a izquierdas pase a ser $\theta_{b,PCI}=9.9^\circ$ y $\varphi_{b,PCI}=0^\circ$ a 19.7 GHz. Esto es así porque los valores de $\Delta\theta_b$ que se han impuesto en los haces de las dos polarizaciones circulares ortogonales tienen signos contrarios. La Figura 10B muestra los valores de $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ que se requieren para que la dirección de apuntamiento de la polarización circular a derechas pase a ser $\theta_{b,PCD}=9.9^\circ$ y $\varphi_{b,PCD}=0^\circ$ a 29.5 GHz. De nuevo, para que la dirección de apuntamiento de la polarización circular a izquierdas pase a ser $\theta_{b,PCD}=13.7^\circ$ y $\varphi_{b,PCD}=0^\circ$ a 29.5 GHz, es preciso elegir los valores de $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})$ iguales en valor absoluto y de signo contrario a los valores de $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ de la Figura 10B (recordemos que en este caso los valores de $\Delta\theta_b$ para las dos polarizaciones circulares ortogonales vuelven a ser iguales y de signos contrarios).

Partiendo del reflectarray (100) diseñado con las celdas (12) de la Figura 3 para enfocar haces de polarización circular en la dirección $\theta_b=11.8^\circ$ y $\varphi_b=0^\circ$, se implementan las correcciones de fase de las Figuras 10A y 10B haciendo uso de la TRV. Para conseguir la corrección de fase de la Figura 10A, en cada celda desfasadora (12) se rotan solidariamente un ángulo α_i los ocho arcos de los dos anillos más externos de los dos conjuntos de anillos de las Figuras 4A y 4B (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28) ya que son esos anillos los que controlan el funcionamiento

del reflectarray (100) a 19.7 GHz. Tal y como muestran las Figuras 11A y 11B, los ejes de simetría especular de los anillos externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48) pasan a alinearse con los ejes de un nuevo sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z'). Según la teoría de la TRV, esta rotación da lugar a una corrección de las fases de los coeficientes de la matriz de reflexión para polarización circular dadas por $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})=2\alpha_l$ y por $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})=-\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ si se cumple que $\angle R_{x'x'}-\angle R_{y'y'}=\pm 180^\circ$. Esto es, los coeficientes de la diagonal de la matriz de reflexión para polarización lineal deben estar en contrafase en el sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z'), no en el sistema de coordenadas original de la Figura 2. De acuerdo con este resultado, si se elige en cada celda (12) $\alpha_l = \Delta(\angle R_{PCD,PCD}) / 2$ de manera que $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ sea la corrección de fase mostrada en la Figura 10A, y además, se obliga a que se cumpla que $\angle R_{x'x'}-\angle R_{y'y'}=\pm 180^\circ$, se consiguen desviar los haces de polarización circular a derechas e izquierdas en las direcciones requeridas a 19.7 GHz. Análogamente, para conseguir los valores de $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ que aparecen en la Figura 10B, se rotan solidariamente un ángulo α_u los ocho arcos de los dos anillos más internos de los dos conjuntos de anillos de las Figs. 4A y 4B (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36) ya que esos ocho arcos son los que se utilizan para controlar el funcionamiento del reflectarray (100) a 29.5 GHz. De nuevo, las Figuras 11A y 11B nos muestran que los ejes de simetría especular de los anillos internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56) pasan a alinearse con los ejes de un nuevo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z''). Y de acuerdo una vez más con la TRV, esta rotación introduce correcciones en los coeficientes de la matriz de reflexión para polarización circular dadas por $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})=2\alpha_u$ y por $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})=-\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$, siempre y cuando se cumpla que $\angle R_{x''x''}-\angle R_{y''y''}=\pm 180^\circ$ (donde $\angle R_{x''x''}$ e $\angle R_{y''y''}$ están referidos al segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z'')). Por tanto, si se elige en cada celda (12) el ángulo α_u igual a $\Delta(\angle R_{PCD,PCD}) / 2$ de manera que $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ sea ahora la corrección de fase mostrada en la Figura 10B, y además se obliga a que $\angle R_{x''x''}-\angle R_{y''y''}=\pm 180^\circ$, se consiguen desviar los haces de polarización circular a derechas e izquierdas en las direcciones requeridas a 29.5 GHz.

En las Figuras 12A y 12B se muestran los valores de las correcciones de fase $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ y $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})$ que se obtienen a 19.7 GHz para la celda de las Figuras 11A y 11B en función de los ángulos de rotación α_l y α_u de los arcos externos e internos respectivamente. En dichas figuras, los valores Ψ_{xi}^u y Ψ_{yo}^u se han mantenido siempre constantes (lo cual significa que las longitudes de los arcos internos son constantes), y vienen dados por $\Psi_{xi}^u=115^\circ$ y $\Psi_{yo}^u=100^\circ$. En cambio, los valores de Ψ_{xi}^l y Ψ_{yo}^l se han modificado para cada pareja de valores de α_l y α_u de manera que siempre se satisfaga la condición $\angle R_{x'x'}-\angle R_{y'y'}=\pm 180^\circ$ impuesta por la TRV. Se observa que $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ crece de forma lineal con el ángulo de rotación α_l y que $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})$ decrece de forma lineal con α_l de acuerdo con la predicción de la TRV. Además, los arcos

internos y sus rotaciones apenas tienen efecto sobre los valores de $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ y $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})$ a la frecuencia inferior (19.7 GHz), ya que sus longitudes son muy inferiores a la longitud de resonancia (media longitud de onda a 19.7 GHz). La situación es similar en las Figuras 13A y 13B. En este caso se representan los valores de las correcciones de fase $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ y $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})$ que se obtienen a la frecuencia superior (29.5 GHz) para la celda de las Figuras 11A y 11B en función de los ángulos de rotación α_l y α_u . En las Figuras 13A y 13B se han tomado constantes las longitudes de los arcos externos de forma que $\Psi_{xi}^l=105^\circ$ y $\Psi_{yo}^l=95^\circ$. Y los valores de Ψ_{xi}^u y Ψ_{yo}^u se han ajustado para cada pareja de valores de α_l y α_u con el fin de satisfacer la condición $\angle R_{x''x''}-\angle R_{y''y''}=\pm 180^\circ$ impuesta por la TRV. A diferencia de lo que ocurre en las Figuras 12A y 12B, las rotaciones de los arcos externos sí tienen cierta influencia sobre los valores de $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ y $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})$. No obstante, se sigue cumpliendo que $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ crece con el segundo ángulo de rotación α_u , que $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})$ decrece con α_u , y que $\Delta(\angle R_{PCI,PCI})=-\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$, con lo cual, se pueden ajustar los valores de $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ de la Fig. 10B a 29.5 GHz haciendo uso de α_u , Ψ_{xi}^u y Ψ_{yo}^u para valores fijos de α_l , Ψ_{xi}^l y Ψ_{yo}^l .

Los resultados de las Figuras 9A, 9B, 10A, 10B, 12A, 12B, 13A y 13B proporcionan la estrategia para diseñar el reflectarray (10) con separación de haces de polarización circular a derechas y a izquierdas a 19.7 y a 29.5 GHz. Partiendo del diseño para haces colimados de polarización circular a derechas y a izquierdas en una única dirección basado en la celda (12) sin rotar de la Figura 3 y en las distribuciones de fase de las Figuras 9A y 9B, se comienza rotando los arcos externos (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48) de cada celda reflectarray un ángulo $\alpha_l=\Delta(\angle R_{PCD,PCD})/2$, tomando para ello los valores de $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ que aparecen en la Figura 10A. A continuación, se ajustan los ángulos Ψ_{xi}^l y Ψ_{yo}^l de cada celda a 19.7 GHz hasta que se satisfaga la condición $\angle R_{x'x'}-\angle R_{y'y'}=\pm 180^\circ$ en el primer sistema de coordenadas rotado un ángulo α_l , y hasta que $\angle R_{x'x'}$ tome en cada celda el valor asignado en la Figura 9A ya que se puede demostrar que $\angle R_{x'x'}$ para la celda rotada coincide con el valor que tiene $\angle R_{PCD,PCD}$ antes de rotar la celda si se cumple que $\angle R_{x'x'}-\angle R_{y'y'}=\pm 180^\circ$. Durante todo ese proceso de ajuste de los arcos externos, los arcos internos de las celdas (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56) se mantienen sin rotar, y sus longitudes se mantienen inalteradas. Una vez finalizados los ajustes a 19.7 GHz, se rotan los arcos internos un ángulo $\alpha_u=\Delta(\angle R_{PCD,PCD})/2$, haciendo uso de los valores de $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ que aparecen en la Figura 10B. Acabadas estas rotaciones, se ajustan los ángulos Ψ_{xi}^u y Ψ_{yo}^u de cada celda a 29.5 GHz hasta que se satisfaga la condición $\angle R_{x''x''}-\angle R_{y''y''}=\pm 180^\circ$ en el segundo sistema de coordenadas rotado, y hasta que $\angle R_{x''x''}$ tome en cada celda el valor asignado en la Figura 9B (de nuevo, se vuelve a cumplir que $\angle R_{x'x'}$ en la celda rotada coincide con $\angle R_{PCD,PCD}$ en la celda sin rotar si $\angle R_{x'x'}-\angle R_{y'y'}=\pm 180^\circ$). Durante los

ajustes de los arcos internos a 29.5 GHz, se mantienen las rotaciones y las longitudes de los arcos externos ajustadas previamente a 19.7 GHz para conseguir la separación de haces a esa frecuencia. A continuación, se inicia una segunda iteración en la que se vuelven a ajustar a 19.7 GHz los valores de Ψ_{xi}^l y Ψ_{yo}^l para obligar que se cumpla que $\angle R_{x'x'} - \angle R_{y'y'} = \pm 180^\circ$ y que $\angle R_{x'x'}$ tome el valor asignado en la Figura 9A, todo ello manteniendo los valores de α_l , α_u , Ψ_{xi}^u y Ψ_{yo}^u obtenidos al terminar la primera iteración. Y finalizados los ajustes a 19.7 GHz, se vuelven a ajustar a 29.5 GHz los ángulos Ψ_{xi}^u y Ψ_{yo}^u para satisfacer en cada celda que $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''} = \pm 180^\circ$ y que $\angle R_{x''x''}$ tome el valor asignado en la Figura 9B, todo ello sin variar los valores de α_l , α_u , Ψ_{xi}^l y Ψ_{yo}^l obtenidos al terminar los ajustes a 19.7 GHz durante la segunda iteración. Las simulaciones realizadas muestran que dos iteraciones son suficientes para llegar a los valores de α_l , α_u , Ψ_{xi}^l , Ψ_{yo}^l , Ψ_{xi}^u y Ψ_{yo}^u que se necesitan en cada celda del reflectarray para que $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ alcance los valores fijados en las Figuras 10A y 10B (y por extensión, los de $\Delta(\angle R_{PCI,PCI}) = -\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$), para que $\angle R_{x'x'} - \angle R_{y'y'} = \pm 180^\circ$ y $\angle R_{x'x'}$ tome los valores fijados en la Figura 9A, y para que $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''} = \pm 180^\circ$ y $\angle R_{x''x''}$ tome los valores fijados en la Figura 9B.

La estrategia de diseño de la antena reflectarray capaz de separar haces de polarización circular a derechas y a izquierdas en dos direcciones diferentes y en dos bandas de frecuencia distintas se ha dividido en dos etapas, una primera etapa que utiliza celdas de ocho anillos partidos apilados sin rotar y está orientada hacia enfocar los haces de polarización circular ortogonales en la misma dirección a dos frecuencias, y una segunda etapa en la que rotan los ocho anillos partidos apilados en cada celda con el fin de separar los dos haces de polarización circular ortogonales en dos direcciones distintas a dos frecuencias distintas. Si bien es cierto que se puede prescindir de la primera etapa y atacar el diseño directamente desde la segunda etapa, es conveniente incluir en el diseño la primera etapa porque proporciona un buen punto de partida para la ejecución de la segunda etapa, y facilita considerablemente la convergencia de esta segunda etapa.

Una vez que el diseño del reflectarray (100) ha terminado y que los valores requeridos de α_l , α_u , Ψ_{xi}^l , Ψ_{yo}^l , Ψ_{xi}^u y Ψ_{yo}^u han sido ajustados para cada celda, el reflectarray (100) puede pasar a la fase de fabricación. A partir de un fichero que contiene los valores de los radios de los arcos, las longitudes de los arcos y los ángulos de rotación para cada celda, se pueden generar las máscaras de fotograbado para cada uno de los dos niveles de metalización. Para la fabricación del reflectarray (100), se pueden imprimir estas máscaras sobre las dos capas dieléctricas de las Figuras 2 y 3 (bien sobre las dos caras de la capa superior (16), bien sobre las caras de arriba de la capa inferior (15) y superior (16)) utilizando

técnicas de fotograbado convencionales, y las dos capas se pueden pegar utilizando hornos de curado. En las Figuras 14A y 14B se muestran las máscaras para los dos niveles de metalización del diseño llevado a cabo en esta realización concreta de la invención.

5 En las Figuras 15A y 15B se muestran los resultados obtenidos para los cortes en elevación (plano X-Z de la Figura 2) de los diagramas de radiación del diseño llevado a cabo en este ejemplo de la invención. Se observa que las especificaciones requeridas para la antena reflectarray (100) diseñada se han cumplido. Concretamente, a 19.7 GHz el haz principal con polarización circular a derechas tiene su máximo a 13.7° , y el haz con polarización circular a
10 izquierdas lo tiene a 9.9° . A 29.5 GHz ocurre justo lo contrario, y mientras que el máximo del haz con polarización circular a derechas se produce a 9.9° , el del haz con polarización circular a izquierdas se produce a 13.7° . Este intercambio de las direcciones de los haces de polarización circular ortogonales en las bandas de TX y RX es útil porque ayuda a reducir interferencias. Las ganancias de los dos haces a 19.7 GHz están en torno a 32 dBi, y las de
15 los haces a 29.5 GHz, en torno a 35 dBi. Si se desea, las ganancias se pueden igualar en las dos bandas. Para ello, basta reducir las ganancias a 29.5 GHz en 3 dB utilizando una técnica de corrección de fase selectiva. En esta técnica, en un conjunto de celdas elegido aleatoriamente en una franja situada junto al borde del reflectarray (100), las longitudes de los arcos internos a 29.5 GHz se ajustan para que $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''}$ no valga ± 180 grados sino 0
20 grados, con lo cual, la radiación de estas celdas interfiere destructivamente con la de las celdas para los que $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''}$ se ha mantenido en ± 180 grados, y esto trae consigo una reducción en el área efectiva de la antena a 29.5 GHz, y en consecuencia, una reducción en las ganancias de los haces a esa frecuencia. La técnica de corrección de fase selectiva en la banda de frecuencias superior permite igualar la ganancia y el ancho de haz en las dos bandas
25 de frecuencia, lo cual es deseable en antenas multihaz diseñadas para generar coberturas multicelulares desde satélites de comunicaciones que operan en dos bandas de frecuencia. Dependiendo de la forma del reflectarray (100), la franja junto al borde en la que se lleva a cabo la corrección de fase selectiva tendrá forma de anillo rectangular si el reflectarray (100) es rectangular, o forma de corona circular si el reflectarray tiene forma circular como es el
30 caso del ejemplo utilizado en esta realización. En las Figuras 15A y 15B se observa que los lóbulos laterales están unos 20 dB por debajo de los lóbulos principales, y que los niveles de radiación contrapolar están siempre al menos 30 dB por debajo del máximo de radiación copolar, lo cual indica que la celda de antena reflectarray (12) introducida en las Figuras 11A y 11B es una celda con bajo nivel de polarización cruzada. Por último, las eficiencias de
35 apertura de los haces radiados están en torno al 65% a 19.7 GHz, y en torno al 59% a 29.5 GHz.

En la Figura 16 se presenta un diagrama de flujo donde se detallan todos los pasos que se deben seguir para diseñar la antena reflectarray (100) capaz de separar haces de polarización circular ortogonales en dos bandas de frecuencia, que es objeto de esta invención. Esos pasos son:

- 5 a) Definición (60) de la antena reflectarray (100). Se definen las propiedades generales de la antena que se va a diseñar tales como la forma del contorno que limita la retícula (11) (rectangular, circular, elíptico, etc.), dimensiones, período de la celda unidad (12) de la retícula ($p_x \times p_y$ en la Figura 3), características de las capas dieléctricas del sustrato (espesor, permitividad y tangente de pérdidas), anchura y radio medio de los
- 10 ocho anillos partidos que forman parte de las celdas desfasadoras, tipo de alimentador y posición de su centro de fase, etc.
- b) Definición (61) de las direcciones de apuntamiento ($\theta_1 = \theta_b + \Delta\theta_b, \varphi_b$) y ($\theta_2 = \theta_b - \Delta\theta_b, \varphi_b$) de los dos haces de polarización circular a derechas y a izquierdas de la antena en coordenadas esféricas, así como de las frecuencias centrales inferior, f_l , y superior, f_u ,
- 15 de sus dos bandas de operación en TX y en RX.
- c) Tanto a la frecuencia inferior f_l como a la superior f_u , determinar la distribución ideal de desfases (62) para ondas incidentes con polarizaciones lineales X (campo eléctrico incidente preferentemente orientado en el plano X-Z) e Y (campo eléctrico incidente preferentemente orientado a lo largo del eje Y), $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ (véanse las Figuras 9A y
- 20 9B), que deben introducir las celdas para que la antena sea capaz de colimar haces de polarización circular en una dirección intermedia a las direcciones de apuntamiento de los haces que se desean separar (esta dirección intermedia está dada por las coordenadas esféricas angulares ($\theta_b = (\theta_1 + \theta_2)/2, \varphi_b$)), teniendo que cumplirse que $\angle R_{xx} - \angle R_{yy} = \pm 180^\circ$ para que se mantenga el sentido de la polarización circular al reflejarse en la antena la onda procedente del alimentador. Más, concretamente, si el reflectarray (100) consta de N celdas desfasadoras (12), d_j es la distancia del centro de fase del alimentador al centro de la celda j -ésima ($j=1, \dots, N$) y ($X=x_j, Y=y_j$) son las coordenadas del centro de dicha celda j -ésima con respecto al sistema de coordenadas (X, Y, Z) definido en el reflectarray (100) (véase la Figura 2), los valores de $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ para la
- 30 celda j -ésima a la frecuencia inferior f_l vendrán dados por:

$$\angle R_{xx}|_{f=f_l} = \frac{2\pi f_l}{c} [d_j - \text{sen}\theta_b(x_j \cos\varphi_b + y_j \text{sen}\varphi_b)] \quad (3)$$

$$\angle R_{yy}|_{f=f_l} = \frac{2\pi f_l}{c} [d_j - \text{sen}\theta_b(x_j \cos\varphi_b + y_j \text{sen}\varphi_b)] \pm \pi \quad (4)$$

donde $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ se calculan en radianes en (3) y en (4), y donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre. A su vez, los valores de $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ para la celda j -ésima

35

a la frecuencia superior f_u vendrán dados por:

$$\angle R_{xx}|_{f=f_u} = \frac{2\pi f_u}{c} [d_j - \text{sen}\theta_b(x_j \cos\varphi_b + y_j \text{sen}\varphi_b)] \quad (5)$$

$$\angle R_{yy}|_{f=f_u} = \frac{2\pi f_u}{c} [d_j - \text{sen}\theta_b(x_j \cos\varphi_b + y_j \text{sen}\varphi_b)] \pm \pi \quad (6)$$

- 5 d) Ajuste en cada celda desfasadora (12) de las longitudes de los arcos más externos a la frecuencia inferior f_l (63). Concretamente:
- se ajustan las longitudes de los cuatro arcos más externos de los anillos partidos en dirección X (21, 22, 23, 24) para obtener los valores de $\angle R_{xx}$ calculados en el paso c); y
 - 10 - se ajustan las longitudes de los cuatro arcos más externos de los anillos partidos en dirección Y (25, 26, 27, 28) para obtener los valores de $\angle R_{yy}$ calculados en el paso c).
- e) Ajuste en cada celda desfasadora (12) de las longitudes de los arcos más internos a la frecuencia superior f_u (64). Concretamente:
- 15 - se ajustan las longitudes de los cuatro arcos más internos de los anillos partidos en dirección X (29, 30, 31, 32) para obtener los valores de $\angle R_{xx}$ calculados en el paso c); y
 - se ajustan las longitudes de los cuatro arcos más internos de los anillos partidos en dirección Y (33,34,35,36) para obtener los valores de $\angle R_{yy}$ calculados en el paso c).
- 20 f) Comprobar (65A) para cada celda desfasadora (12) si los valores de $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ obtenidos a f_l y f_u en los pasos d) y e) difieren de los valores calculados en el paso c) menos de un primer error umbral de referencia, que típicamente se suele tomar igual a 5 grados. En otras palabras, comprobar que los valores de $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ convergen a los valores requeridos a f_l y f_u dentro de un margen de error.
- 25 g) Si los errores obtenidos en el paso f) están por encima (65B) del primer valor umbral, repetir el paso d) ajustando a la frecuencia inferior f_l las longitudes de los ocho arcos más externos mientras se mantienen fijas las longitudes de los ocho arcos más internos, y repetir también el paso e), ajustando a la frecuencia superior f_u las longitudes de los ocho arcos más internos mientras se mantienen fijas las longitudes
- 30 de los ocho arcos más externos.
- h) Iterar los pasos f) y g) cuantas veces sea necesario hasta que los valores de $\angle R_{xx}$ y $\angle R_{yy}$ a las frecuencias inferior f_l y superior f_u en cada celda (12) difieran de los valores ideales obtenidos en el paso c) en una cantidad inferior al error umbral establecido en el paso f).
- 35 i) Tanto a la frecuencia inferior f_l como a la frecuencia superior f_u , determinar la

distribución ideal de correcciones de desfases (66) para ondas polarizadas circularmente a derechas e izquierdas, $\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ y $\Delta(\angle R_{PCI,PCI}) = -\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ (véanse las Figuras 10A y 10B), que se deben introducir en las celdas desfasadoras (12) del reflectarray (100) diseñado en los pasos d) a h) para que dicho reflectarray (100) pueda separar los haces de polarización circular ortogonal en las direcciones de apuntamiento (θ_1, φ_b) y (θ_2, φ_b) definidas en el paso b).

5

10

15

20

25

30

35

- j) Ajuste de los ángulos de rotación de los arcos más externos (67). Se rotan solidariamente los ocho arcos más externos de los anillos partidos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28) de cada celda (12) un ángulo $\alpha_i = \Delta(\angle R_{PCD,PCD})/2$ a la frecuencia inferior f_i ($\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ a f_i es la obtenida en el paso i)) para que el reflectarray pueda conseguir la separación de haces de polarización circular a derechas e izquierdas de acuerdo con la técnica de rotación variable en la banda de frecuencias inferior.
- k) Ajuste de los ángulos de rotación de los arcos más internos (68). Se rotan solidariamente los ocho arcos más internos de los anillos partidos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36) de cada celda (12) un ángulo $\alpha_u = \Delta(\angle R_{PCD,PCD})/2$ a la frecuencia f_u ($\Delta(\angle R_{PCD,PCD})$ a f_u es la obtenida en el paso i)) para que el reflectarray pueda conseguir la separación de haces de polarización circular a derechas e izquierdas de acuerdo con la técnica de rotación variable en la banda de frecuencias superior.
- l) Ajuste de las longitudes de los arcos externos rotados (69). Se define en cada celda desfasadora (12) un sistema de coordenadas rotado un ángulo α_i (X' , Y' , Z') y se reajustan ligeramente las longitudes de los ocho arcos más externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48) para conseguir que $\angle R_{x'x'} - \angle R_{y'y'} = \pm 180^\circ$ y que $\angle R_{x'x'}$ coincida en la celda con el valor de $\angle R_{xx}$ definido en el paso c) antes de que se giraran los arcos, todo ello a la frecuencia f_i .
- m) Ajuste de las longitudes de los arcos internos rotados (70). Se define en cada celda un sistema de coordenadas rotado un ángulo α_u (X'' , Y'' , Z'') y se reajustan ligeramente las longitudes de los ocho arcos más internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56) para conseguir que $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''} = \pm 180^\circ$ y que $\angle R_{x''x''}$ coincida en la celda con el valor de $\angle R_{xx}$ definido en el paso c) antes de que se giraran los arcos, todo ello a la frecuencia f_u .
- n) Comprobar (71A) que las condiciones exigidas en el apartado l) para $\angle R_{x'x'} - \angle R_{y'y'}$ y $\angle R_{x'x'}$, y en el apartado m) para $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''}$ y $\angle R_{x''x''}$, se cumplen en cada celda desfasadora dentro de un segundo margen de error establecido a priori, que se suele tomar igual a cinco grados. En otras palabras, comprobar que los valores de $\angle R_{x'x'} - \angle R_{y'y'}$, $\angle R_{x'x'}$, $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''}$ y $\angle R_{x''x''}$ convergen a los valores requeridos a f_i y f_u dentro de

un margen de error.

- o) Si los errores obtenidos en el paso n) para $\angle R_{x'x} - \angle R_{y'y}$, $\angle R_{x'x'}$, $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''}$ y $\angle R_{x''x''}$ son superiores (71B) a los valores preestablecidos, repetir el paso l) reajustando a f_l las longitudes de los ocho arcos más externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48) mientras se mantienen constantes las longitudes de los ocho arcos más internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56), y repetir también el paso n) reajustando a f_u las longitudes de los ocho arcos más internos rotados mientras se mantienen constantes las longitudes de los ocho arcos más externos rotados.
- p) Iterar los pasos n) y o) cuantas veces sea necesario hasta conseguir que en cada celda (12), tanto los valores de $\angle R_{x'x} - \angle R_{y'y}$ y $\angle R_{x'x'}$ a la frecuencia inferior f_l como los valores de $\angle R_{x''x''} - \angle R_{y''y''}$ y $\angle R_{x''x''}$ a la frecuencia superior f_u , difieran de los valores fijados en los pasos l) y m) en una cantidad inferior al segundo error de fase establecido en el paso n).
- q) Generar (72) las máscaras de fotograbado, típicamente en unos ficheros CAD ("Computer Aided Design" en inglés), para cada uno de los niveles de metalización de la antena reflectarray (100) a partir de las dimensiones obtenidas para los arcos en cada celda desfasadora y a partir de los ángulos de rotación de estos arcos, imprimir los anillos partidos sobre las capas dieléctricas del sustrato mediante técnicas convencionales de fotograbado o fabricación aditiva, pegar las distintas capas para formar la antena reflectarray (100), y ensamblar esta antena con su alimentador mediante un soporte.

Para minimizar el nivel de polarización cruzada y maximizar el ancho de banda en las dos bandas de funcionamiento de la antena reflectarray (100), el método de diseño comprende además los siguientes pasos adicionales:

- Después del paso h) se añade el siguiente paso:
 - Reajustar en cada celda (12) las longitudes de los ocho arcos que controlan los desfases en cada una de las dos bandas de frecuencia mediante una rutina de optimización, de forma que los desfases requeridos para polarizaciones lineales X e Y a la hora de colimar los haces de polarización circular a derechas e izquierdas en la dirección intermedia descrita en el paso c) no sólo se obtienen a la frecuencia central de cada banda (frecuencia inferior f_l y frecuencia superior f_u) sino también a las frecuencias extremas de dichas bandas.
- Después del paso p) se añaden los siguientes dos pasos:
 - Reajustar en cada celda (12) las longitudes de los ocho arcos rotados de mayor radio mediante una rutina de optimización de forma que los desfases requeridos

para las polarizaciones en el primer sistema de coordenadas rotado X' e Y' no sólo se cumplen a la frecuencia central de la banda inferior (frecuencia f_l) sino también a las frecuencias extremas de dicha banda.

- 5
- Reajustar en cada celda (12) las longitudes de los ocho arcos rotados de menor radio mediante una rutina de optimización de forma que los desfases requeridos para las polarizaciones en el segundo sistema de coordenadas rotado X'' e Y'' no sólo se cumplen a la frecuencia central de la banda superior (frecuencia f_u) sino también a las frecuencias extremas de dicha banda.

10 En otra posible realización, el método de diseño permite obtener una antena reflectarray (100) con separación de haces de polarización circular que opera en más de dos bandas de frecuencia.

Para ello:

- 15
- Se modifica el paso a) de forma que se incluyen en cada celda (12) de la antena reflectarray (100) cuatro nuevos anillos partidos concéntricos (dos por cada conjunto de anillos coplanares) por cada nueva banda de frecuencia adicional.
 - Se determinan en el paso c) las distribuciones de desfases en las polarizaciones X e Y para cada banda de frecuencias adicional.
 - Después del paso e), se añade un nuevo paso por cada banda de frecuencia adicional consistente en el ajuste en cada celda (12) de las longitudes de los ocho arcos correspondientes a esa banda adicional para obtener los desfases de las polarizaciones X e Y que se calculan en el paso c) a la frecuencia central de la nueva banda.
 - Después del paso k), se añade un nuevo paso por cada banda de frecuencia adicional consistente en la rotación en cada celda de los ocho arcos correspondientes a esa banda adicional de forma que las correcciones introducidas por los ocho arcos rotados en las polarizaciones circulares a derechas e izquierdas coinciden con las calculadas en el paso i) según la técnica de rotación variable, todo ello a la frecuencia central de cada banda adicional.
 - Y después del paso m), se reajustan en cada celda (12) las longitudes de los ocho arcos correspondientes a la banda de frecuencia adicional de forma que se consigue la diferencia de 180 grados entre los desfases para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo de las direcciones ortogonales coplanares con la antena reflectarray (100) en el nuevo sistema de coordenadas rotado, y de forma que el desfase para la polarización lineal en cada una de esas direcciones ortogonales rotadas coincide con el que se prescribió en el paso c) para las direcciones no rotadas, todo ello a la frecuencia central de cada banda adicional.
- 35

En otra posible realización, el método de diseño permite obtener una antena reflectarray (100) con separación de haces contorneados de polarización circular en al menos dos bandas de frecuencia. Para ello, las longitudes de los arcos correspondientes a cada una de las bandas de frecuencia en las que opera la antena reflectarray (100) se ajustan en cada celda (12) como se indica en los pasos c) a h) para conseguir los desfases que permiten emitir haces contorneados de polarización circular en lugar de haces colimados en la dirección intermedia descrita en el anterior paso c), haces contorneados que después se separan en dos haces contorneados de polarización circular a derechas e izquierda mediante la rotación de los citados arcos y mediante el reajuste de sus longitudes siguiendo el procedimiento descrito anteriormente en los pasos i) a p).

REIVINDICACIONES

1. Una antena reflectarray (100) plana que comprende:

- un alimentador (13) para generar ondas con una polarización circular a derechas y a izquierdas, a cada onda correspondiéndole un campo eléctrico complejo con una componente de campo eléctrico en un primer eje de coordenadas y una componente de campo eléctrico en un segundo eje ortogonal al primer eje de coordenadas;
- una agrupación de celdas desfasadoras (12) dispuestas sobre una retícula (11) plana que refleja las ondas generadas por el alimentador (13), donde cada celda desfasadora (12) comprende un plano conductor (14) y una pluralidad de capas dieléctricas (15, 16) superpuestas sobre el plano conductor (14);

caracterizada por que cada celda desfasadora (12) además comprende dos conjuntos superpuestos de cuatro anillos conductores concéntricos partidos en dos arcos cada conjunto, teniendo en total dieciséis arcos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), donde un primer conjunto de cuatro anillos conductores partidos en dos arcos está impreso sobre una cara de una capa superior (16) de la pluralidad de capas dieléctricas (15, 16), y donde un segundo conjunto de cuatro anillos conductores partidos en dos arcos está impreso sobre la cara opuesta de la capa superior (16) o sobre una cara de una capa inferior (15) de la pluralidad de capas dieléctricas (15, 16);

donde en cada celda desfasadora (12):

- ocho arcos de los anillos externos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28) tienen unas longitudes para ajustar en fase las ondas generadas por el alimentador (13) que se reflejan en cada celda desfasadora (12) manteniendo el sentido de la polarización circular después de la reflexión a la frecuencia central de una primera banda de funcionamiento de la antena reflectarray, frecuencia inferior, donde:
 - cuatro arcos externos orientados en una primera dirección (21, 22, 23, 24), según el primer eje de coordenadas, están ajustados para controlar un desfase de la componente del campo eléctrico reflejado según el primer eje, y
 - cuatro arcos orientados en una segunda dirección (25, 26, 27, 28), según el segundo eje de coordenadas, están ajustados para controlar un desfase de la componente del campo eléctrico reflejado según el segundo eje, manteniendo una diferencia de 180 grados entre los desfases de las dos componentes del campo eléctrico reflejado para mantener el sentido de la polarización circular a la frecuencia inferior;
- ocho arcos de los anillos internos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36) tienen unas longitudes

para ajustar en fase las ondas generadas por el alimentador (13) que se reflejan en cada celda desfasadora (12) manteniendo el sentido de la polarización circular después de la reflexión a la frecuencia central de una segunda banda de funcionamiento de la antena reflectarray, frecuencia superior, donde:

- 5
- cuatro arcos internos orientados en una primera dirección (29, 30, 31, 32), según el primer eje de coordenadas, están ajustados para controlar un desfase de la componente del campo eléctrico reflejado según el primer eje, y
 - cuatro arcos orientados en una segunda dirección (33, 34, 35, 36), según el
- 10
- segundo eje de coordenadas, están ajustados para controlar un desfase de la componente del campo eléctrico reflejado según el segundo eje, manteniendo una diferencia de 180 grados entre los desfases de las dos componentes del campo eléctrico reflejado para mantener el sentido de la polarización circular a la frecuencia superior;

15 y donde en cada celda desfasadora (12):

- a la frecuencia inferior, los ocho arcos de los anillos externos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28) son rotados solidariamente, formando ocho arcos externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48), aplicando la técnica de rotación variable para desviar las ondas de polarización circular a derechas e izquierdas un ángulo prefijado en direcciones
- 20
- opuestas con respecto a la dirección de las ondas reflejadas antes de rotar los ocho arcos de los anillos externos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28);
- a la frecuencia superior, los ocho arcos de los anillos internos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36) son rotados solidariamente, formando ocho arcos internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56), aplicando la técnica de rotación variable para desviar las ondas de
- 25
- polarización circular a derechas e izquierdas un ángulo prefijado en direcciones opuestas con respecto a la dirección de las ondas reflejadas antes de rotar los ocho arcos de los anillos externos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36).

2. La antena reflectarray (100) de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizada por que**

30

además comprende una pluralidad de capas eléctricas adicionales que son capas de material adhesivo, capas separadoras situadas entre los anillos partidos de las celdas desfasadoras (12) y el plano conductor (14), o capas que forman un superestrato dieléctrico situado por encima de la antena reflectarray (100) a modo de radomo para proteger los anillos partidos.

35

3. La antena reflectarray (100) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** además comprende una estructura mecánica, formada por un soporte

para posicionar el alimentador (13) y por un panel estructural unido al plano conductor (14), para proporcionar rigidez mecánica.

4. La antena reflectarray (100) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** está construida con materiales para aplicaciones espaciales que incluyen fibras de carbono pre-impregnadas con resinas, kapton recubierto de cobre, kapton-germanio recubierto de cobre, fibras de cuarzo pre-impregnadas con resinas de bajas pérdidas, adhesivos cualificados para aplicaciones de espacio, o una combinación de los materiales anteriores.

10

5. La antena reflectarray (100) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que**, en cada celda desfasadora (12), los ocho arcos externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48) que se emplean para ajustar las fases en la frecuencia inferior están rotados en sentido contrario al de los ocho arcos internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56) que se emplean para ajustar las fases en la frecuencia superior,

para mantener la misma dirección de apuntamiento de las ondas polarizadas circularmente a derechas en la primera banda de funcionamiento de la antena reflectarray (100) y de las ondas polarizadas circularmente a izquierdas en la segunda banda de funcionamiento de la antena reflectarray (100),

y mantener la misma dirección de apuntamiento de las ondas polarizadas circularmente a izquierdas en la primera banda de funcionamiento de la antena reflectarray (100) y de las ondas polarizadas circularmente a derechas en la segunda banda de funcionamiento de la antena reflectarray (100).

25

6. La antena reflectarray (100) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** en unas celdas elegidas aleatoriamente de entre la agrupación de celdas desfasadoras (12) situadas en una franja alrededor del borde de la retícula (11), los ocho arcos externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48) tienen unas longitudes y unos ángulos de rotación ajustados para añadir una fase adicional de 180 grados a los desfases de las dos componentes del campo eléctrico reflejado en la segunda banda de funcionamiento de la antena reflectarray (100).

7. Un método de diseño de antenas para obtener una antena reflectarray (100) con separación de haces de polarización circular en al menos dos bandas de frecuencia, el método caracterizado por que comprende los siguientes pasos:

35

- 5 a) definir (60) la antena reflectarray (100) en forma y dimensiones, en un sistema de coordenadas (X, Y, Z), la antena reflectarray (100) formada con una agrupación de celdas desfasadoras (12) en una retícula (11) plana periódica de período prefijado y un alimentador (13) configurado para radiar en las, al menos dos, bandas de frecuencia, ondas polarizadas circularmente a derechas y a izquierdas que inciden en las celdas desfasadoras (12), comprendiendo cada celda desfasadora (12):
- un plano conductor (14),
 - una pluralidad de capas dieléctricas (15,16),
 - un primer conjunto superior de cuatro anillos conductores partidos concéntricos 10 impreso sobre una de las caras de una capa de la pluralidad de capas dieléctricas (15,16), estando cada uno de los anillos partido en dos arcos iguales, formando ocho arcos del primer conjunto (21, 22, 25, 26, 29, 30, 33, 34);
 - un segundo conjunto inferior de cuatro anillos conductores partidos concéntricos 15 (23, 24, 27, 28, 31, 32, 35, 36) impreso, sobre la cara opuesta a la cara de la capa dieléctrica sobre la que está impreso el primer conjunto o sobre una cara de una capa diferente a la de la capa dieléctrica sobre la que está impreso el primer conjunto de entre la pluralidad de capas dieléctricas (15,16);
- 20 b) definir (61) unas direcciones de apuntamiento de los haces de polarización circular a separar en una primera banda de funcionamiento y una segunda banda de funcionamiento, y definir una frecuencia central de la primera banda de funcionamiento y una frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento;
- 25 c) a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento y a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, determinar una distribución de unos valores de desfase (62) para ondas incidentes con polarización lineal en un primer eje (X) y polarización lineal en un segundo eje (Y) para colimar o contornear los haces de polarización circular en una dirección intermedia a las direcciones de apuntamiento de cada uno de los haces a separar, donde la distribución de desfases para la polarización lineal en el primer eje (X) difiere en 180 grados de la distribución de desfases para la polarización lineal en un segundo eje (Y), para colimar o contornear 30 las ondas polarizadas circularmente a derechas e izquierdas que inciden sobre las celdas desfasadoras (12) de la antena reflectarray (100) manteniendo el sentido de la polarización circular después de ser reflejadas por las celdas desfasadoras (12) de la antena reflectarray (100);
- 35 d) a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento, ajustar unas longitudes de unos arcos externos (63), donde los arcos externos son los arcos de mayor radio de los dos conjuntos de anillos partidos, ajustando las longitudes de un primer

subconjunto de cuatro arcos externos (21, 22, 23, 24) de anillos partidos orientados en la dirección del primer eje (X), siendo el desfase introducido por la celda desfasadora (12) igual al calculado en el paso c) para el caso de polarización lineal en el primer eje (X), y ajustando las longitudes de un segundo subconjunto de cuatro arcos externos (25, 26, 27, 28) en la dirección del segundo eje (Y) siendo el desfase introducido por la celda desfasadora (12) igual al calculado en el paso c) para el caso de polarización lineal en el segundo eje (Y);

e) a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, ajustar unas longitudes de unos arcos internos (64), donde los arcos internos son los arcos de menor radio de los dos conjuntos de anillos partidos, ajustando las longitudes de un primer subconjunto de cuatro arcos internos (29, 30, 31, 32) de anillos partidos orientados en la dirección del primer eje (X), siendo el desfase introducido por la celda desfasadora (12) igual al calculado en el paso c) para el caso de polarización lineal en el primer eje (X), y ajustando las longitudes de un segundo subconjunto de cuatro arcos internos (33, 34, 35, 36) en la dirección del segundo eje (Y) siendo el desfase introducido por la celda desfasadora (12) igual al calculado en el paso c) para el caso de polarización lineal en el segundo eje (Y);

f) comprobar (65A) si la diferencia, para cada celda desfasadora (12), entre los valores de desfase determinados en el paso c) y los desfases introducidos por la celda desfasadora (12) para las polarizaciones lineales en el primer eje (X) y segundo eje (Y), a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento y a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, es menor de un primer umbral de referencia de error de fase;

g) si la diferencia comprobada en el paso f) resulta igual o mayor (65B) al primer umbral de referencia de error de fase, repetir el paso d) ajustando las longitudes del primer subconjunto y segundo subconjunto de los arcos externos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28) mientras se mantienen fijas las longitudes del primer subconjunto y segundo subconjunto de los arcos internos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36), y repetir el paso e), ajustando las longitudes del primer subconjunto y segundo subconjunto de los arcos internos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36) mientras se mantienen fijas las longitudes del primer subconjunto y segundo subconjunto de los arcos externos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28);

h) iterar los pasos f) y g) hasta que los desfases introducidos para las polarizaciones lineales en el primer eje (X) y segundo eje (Y) en cada celda desfasadora (12) difieren de los valores de desfase determinados en el paso c) en menos del primer umbral de referencia de error de fase;

- 5 i) a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento y a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, determinar unos valores de correcciones de desfase (66), en cada celda desfasadora (12), para ondas incidentes con polarización circular a derechas e izquierdas en la antena reflectarray (100) obtenida según los pasos d) a h) para separar los haces colimados o contorneados en las direcciones de apuntamiento definidas en el paso b);
- 10 j) ajustar los ángulos de rotación de los arcos externos (67) para rotar solidariamente los arcos externos (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28) alrededor del centro de los anillos partidos, obteniendo unos arcos de los anillos externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48), el ángulo de rotación ajustado independientemente para cada celda desfasadora (12), siendo los valores de correcciones de desfase introducidos por los arcos de los anillos externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48) en los desfases para polarizaciones circulares a derechas e izquierdas iguales a los que se han calculado en el paso i) de acuerdo con la técnica de rotación variable a la frecuencia central de la banda inferior;
- 15 k) ajustar los ángulos de rotación de los arcos internos (68) para rotar solidariamente los arcos internos (29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36) alrededor del centro de los anillos partidos, obteniendo unos arcos de los anillos internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56), el ángulo de rotación ajustado independientemente para cada celda desfasadora (12), siendo los valores de correcciones de desfase introducidos por los arcos de los anillos internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56) en los desfases para polarizaciones circulares a derechas e izquierdas iguales a los que se han calculado en el paso i) de acuerdo con la técnica de rotación variable a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento;
- 20 l) ajustar las longitudes de los arcos externos rotados (69), en cada celda desfasadora (12), usando un primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z') un primer ángulo con respecto al sistema de coordenadas (X , Y , Z) del paso a), para mantener la diferencia de 180 grados entre los desfases para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo de un primer eje rotado (X') y de un segundo eje rotado (Y') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z'), siendo los desfases para la polarización lineal en el primer eje rotado (X') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z') igual a los desfases para la polarización lineal en el primer eje (X) definidos en el paso c), a la frecuencia central de la de la primera banda de funcionamiento;
- 30 m) ajustar las longitudes de los arcos internos rotados (70), en cada celda desfasadora (12), usando un segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z'') un segundo
- 35

ángulo con respecto al sistema de coordenadas (X, Y, Z) del paso a), para mantener la diferencia de 180 grados entre los desfases para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo de un primer eje rotado (X'') y de un segundo eje rotado (Y'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z''), siendo los desfases para la polarización lineal en el primer eje rotado (X'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z'') igual a los desfases para la polarización lineal en el primer eje (X) definidos en el paso c), a la frecuencia central de la de la segunda banda de funcionamiento;

- 5
- n) comprobar (71A) si, para cada celda desfasadora (12), los valores de desfase para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo del primer eje rotado (X') y del segundo eje rotado (Y') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z') y los desfases para la polarización lineal en el primer eje rotado (X') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z'), a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento, difieren de los valores determinados en los pasos l) y c) en menos de un segundo umbral de referencia de error de fase, y si los valores de desfase para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo del primer eje rotado (X'') y del segundo eje rotado (Y'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z'') y los desfases para la polarización lineal en el primer eje rotado (X'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z''), a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, difieren de los valores determinados en los pasos m) y c) en menos del segundo umbral de referencia de error de fase;
- 10
- 15
- o) si las diferencias comprobadas en el paso n) resultan iguales o mayores (71B) al segundo umbral de referencia de error de fase, repetir el paso l) ajustando a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento las longitudes de los ocho arcos externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48) mientras se mantienen constantes las longitudes de los ocho arcos internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56), y repetir el paso n) ajustando a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento las longitudes de los ocho arcos internos rotados (49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56) mientras se mantienen constantes las longitudes de los ocho arcos externos rotados (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48);
- 20
- 25
- 30
- p) iterar los pasos n) y o) hasta que los desfases introducidos en cada celda desfasadora (12) para las polarizaciones en el primer eje rotado (X') y segundo eje rotado (Y') del primer sistema de coordenadas rotado (X' , Y' , Z') a la frecuencia central de la primera banda de funcionamiento, y los desfases para las polarizaciones en el primer eje rotado (X'') y segundo eje rotado (Y'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'' , Y'' , Z'') a la frecuencia central de la segunda banda de funcionamiento, difieren de los
- 35

valores de desfase determinados en los pasos l) y m) en menos del segundo umbral de referencia de error de fase;

- q) generar (72) máscaras de fotograbado para cada uno de los dos niveles de metalización de la antena reflectarray (100) a partir de las longitudes ajustadas para los arcos y los ángulos de rotación ajustados para cada anillo partido en cada celda desfasadora (12).

8. El método de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado por que** el paso h) además comprende reajustar en cada celda desfasadora (12) las longitudes de los ocho arcos que controlan los desfases en cada una de las bandas de frecuencia para colimar o contornear los haces de polarización circular a derechas e izquierdas en la dirección intermedia descrita en el paso c) a una frecuencia extrema superior y una frecuencia extrema inferior de cada una de las bandas de frecuencia, y el paso p) además comprende reajustar en cada celda desfasadora (12) las longitudes de los ocho arcos rotados de mayor radio considerando los desfases para las polarizaciones el primer eje rotado (X') y segundo eje rotado (Y') del primer sistema de coordenadas rotado (X', Y', Z') a las frecuencias extremas superior e inferior de la primera banda de frecuencia, y reajustar en cada celda desfasadora (12) las longitudes de los ocho arcos rotados de menor radio considerando los desfases para las polarizaciones el primer eje rotado (X'') y segundo eje rotado (Y'') del segundo sistema de coordenadas rotado (X'', Y'', Z'') a las frecuencias extremas superior e inferior de la segunda banda de frecuencia.

9. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 7-8, **caracterizado por que** la antena reflectarray (100) opera en más bandas de frecuencia adicionales y

- en el paso a), se incluyen en cada celda desfasadora (12) cuatro anillos partidos concéntricos adicionales por cada banda de frecuencia adicional;
- en el paso c), se determinan las distribuciones de desfases para polarización lineal en el primer eje (X) cada banda de frecuencia adicional;
- después del paso e), se ajusta por cada banda de frecuencia adicional y en cada celda desfasadora (12) las longitudes de los ocho arcos correspondientes a la banda de frecuencia adicional para obtener los desfases de las polarizaciones lineales en el primer eje (X) y segundo eje (Y) que se calculan en el paso c) a una frecuencia central de la banda de frecuencia adicional;
- después del paso k), por cada banda de frecuencia adicional, se rotan en cada celda desfasadora (12) los ocho arcos correspondientes a la banda de frecuencia adicional, usando un sistema de coordenadas rotado adicional, siendo las correcciones introducidas por los ocho arcos rotados en las polarizaciones circulares a derechas e

izquierdas iguales a las calculadas en el paso i) según la técnica de rotación variable, a la frecuencia central de la banda de frecuencia adicional; y

- después del paso m), se reajustan en cada celda desfasadora (12) las longitudes de los ocho arcos correspondientes a la banda de frecuencia adicional siendo 180 grados la diferencia entre los desfases para ondas incidentes con polarizaciones lineales a lo largo de unas direcciones ortogonales coplanares con la antena en el sistema de coordenadas rotado adicional, y siendo el desfase para la polarización lineal en cada una de las direcciones ortogonales rotadas igual al determinado en el paso c) para las direcciones no rotadas, a la frecuencia central de la banda de frecuencia adicional.

5

10

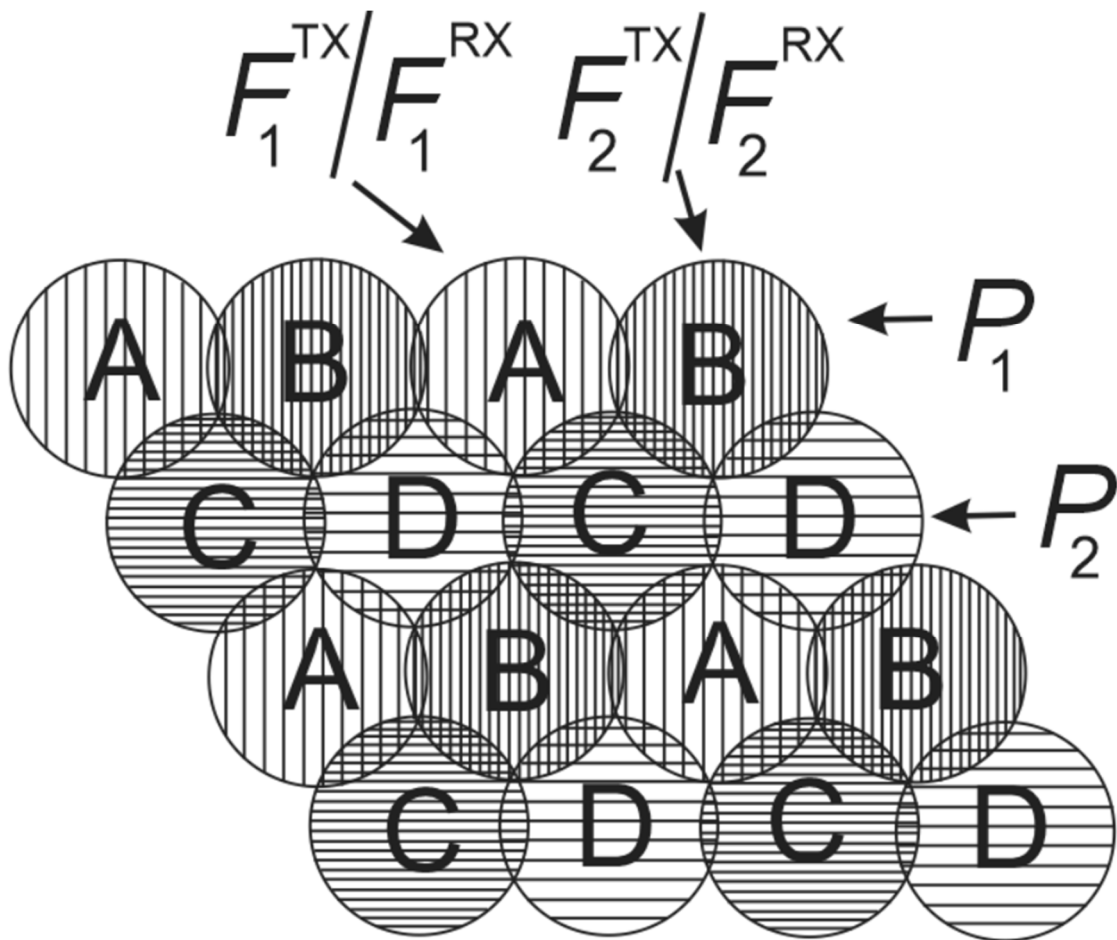


Fig. 1

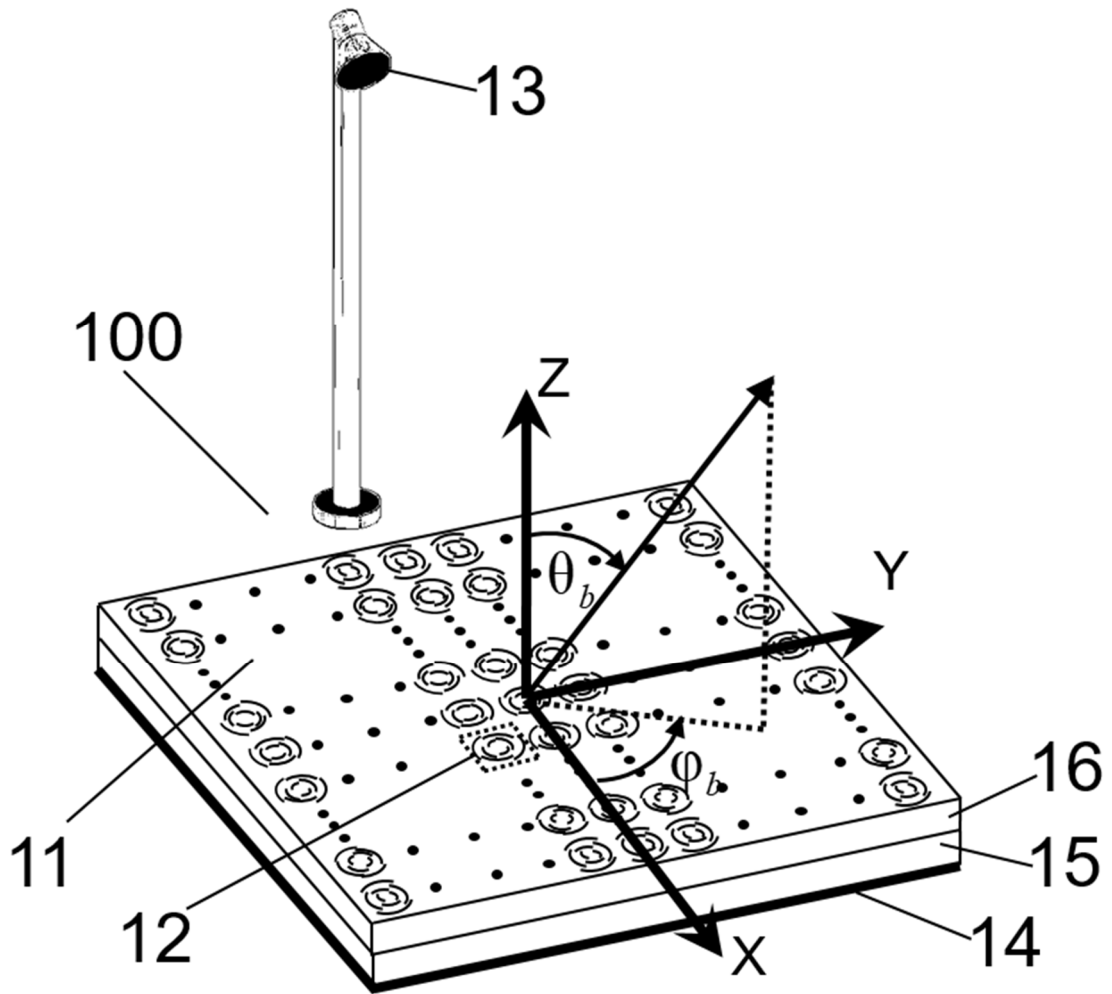


Fig. 2

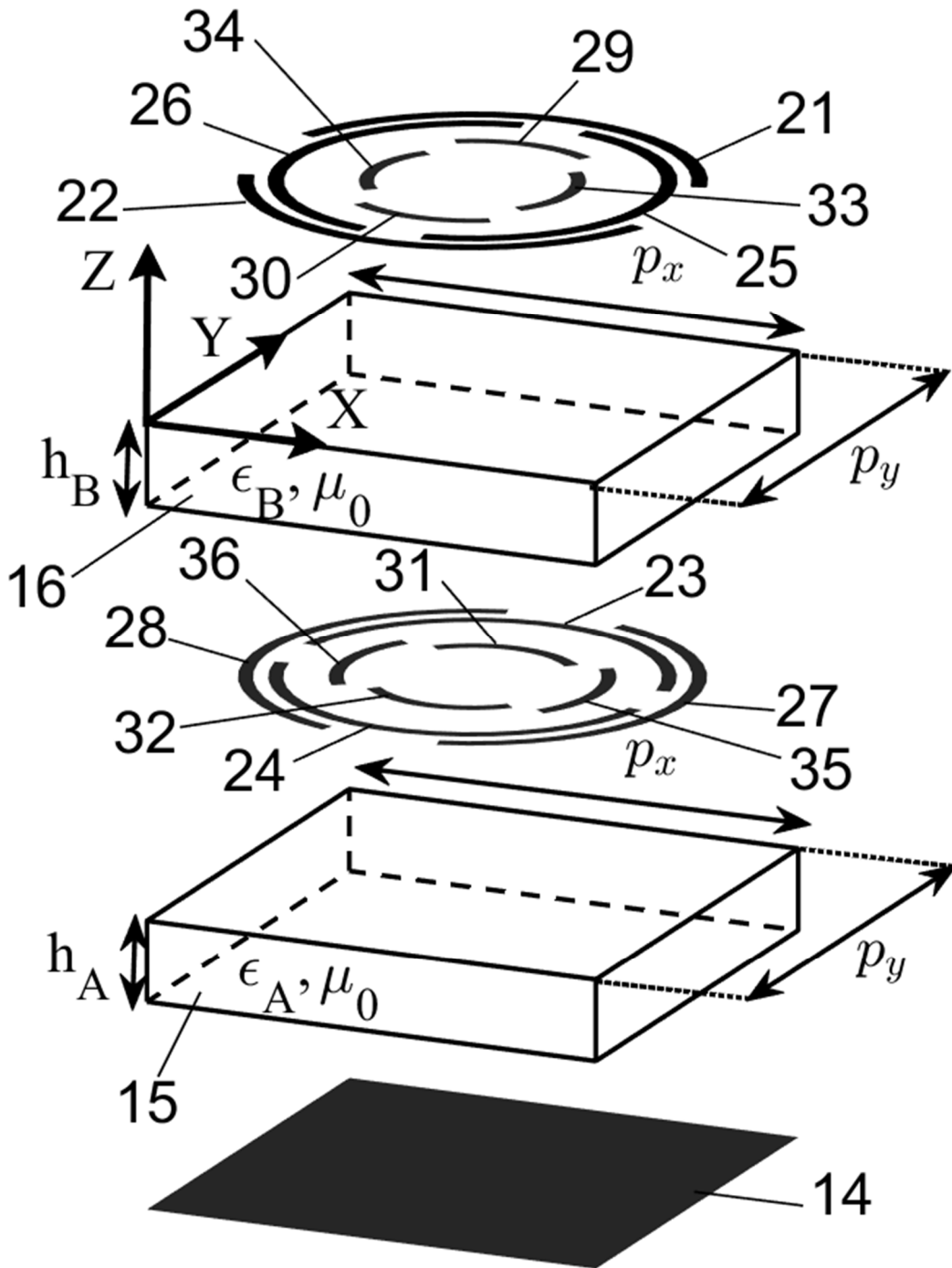


Fig. 3

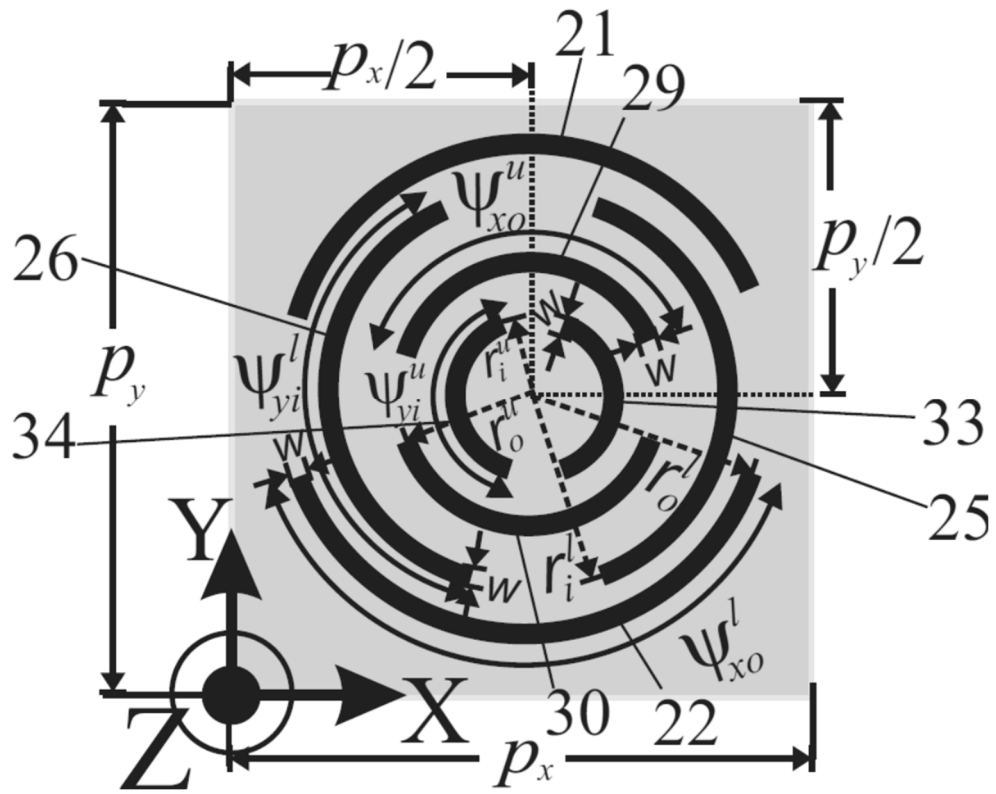


Fig. 4A

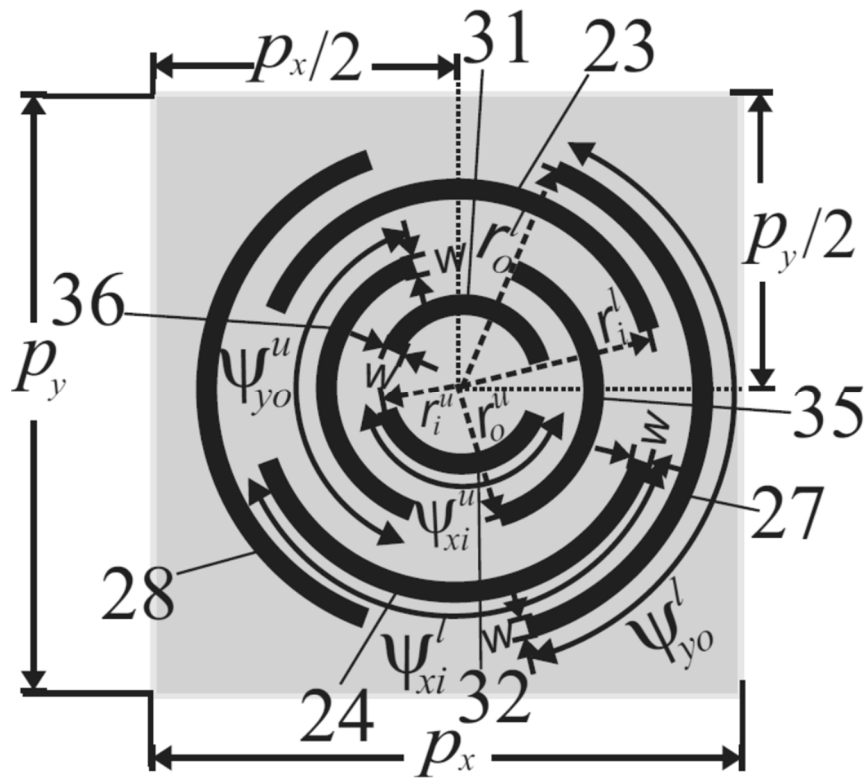


Fig. 4B

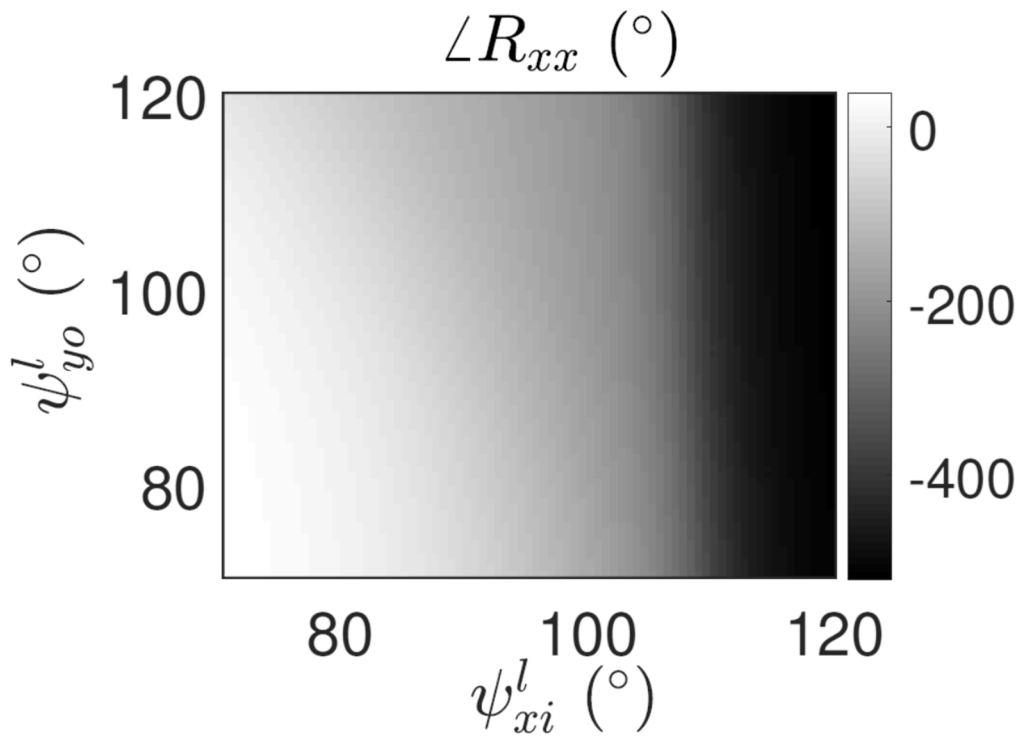


Fig. 5A

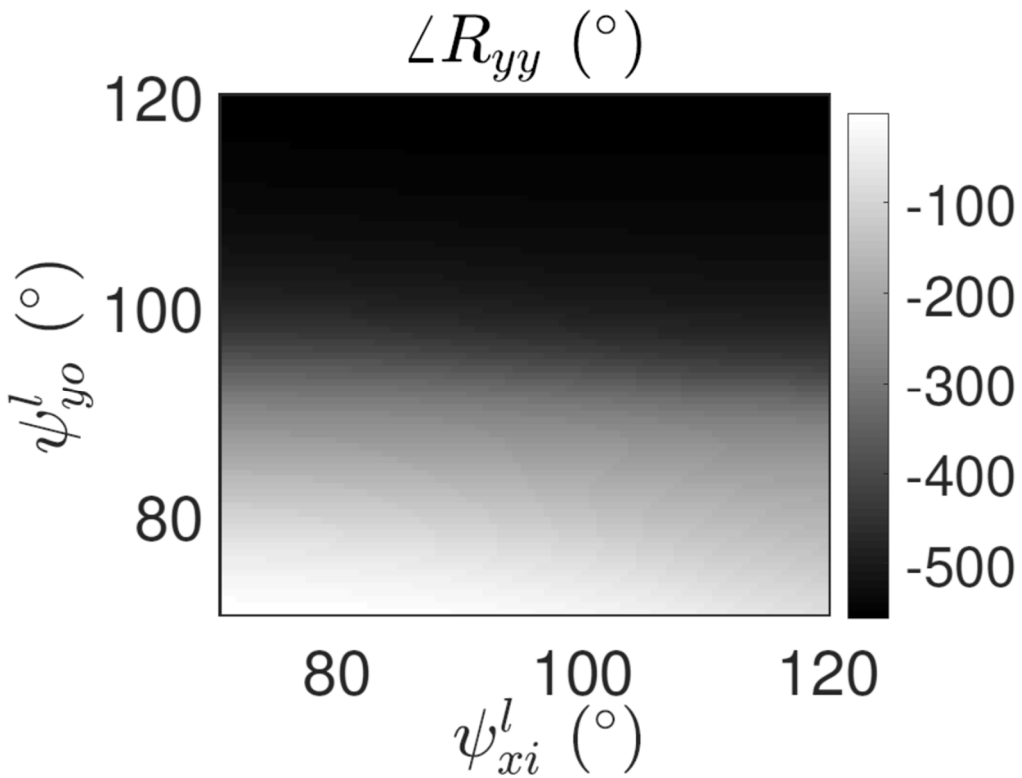


Fig. 5B

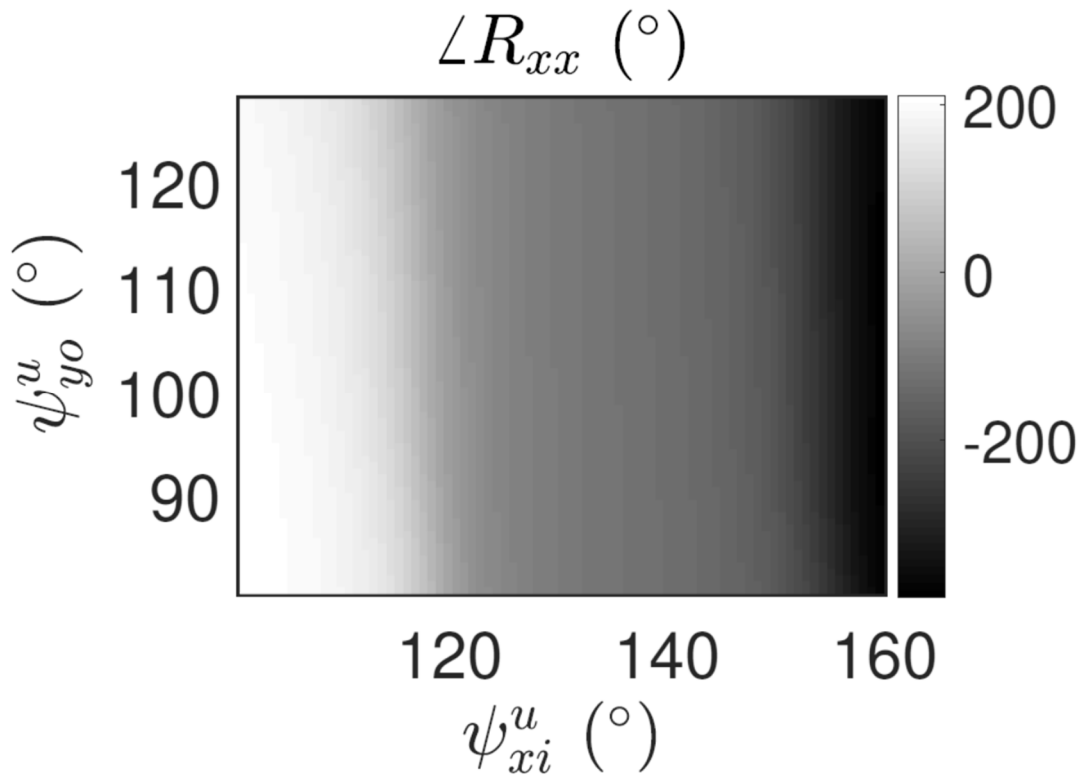


Fig. 6A

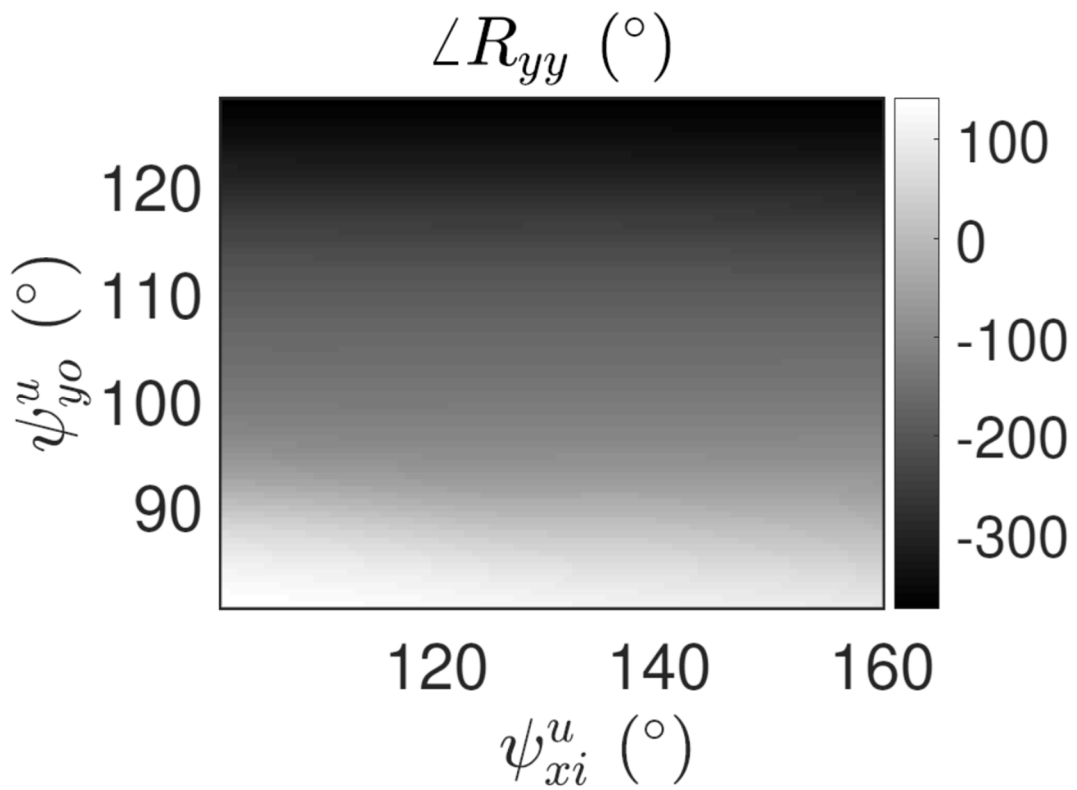


Fig. 6B

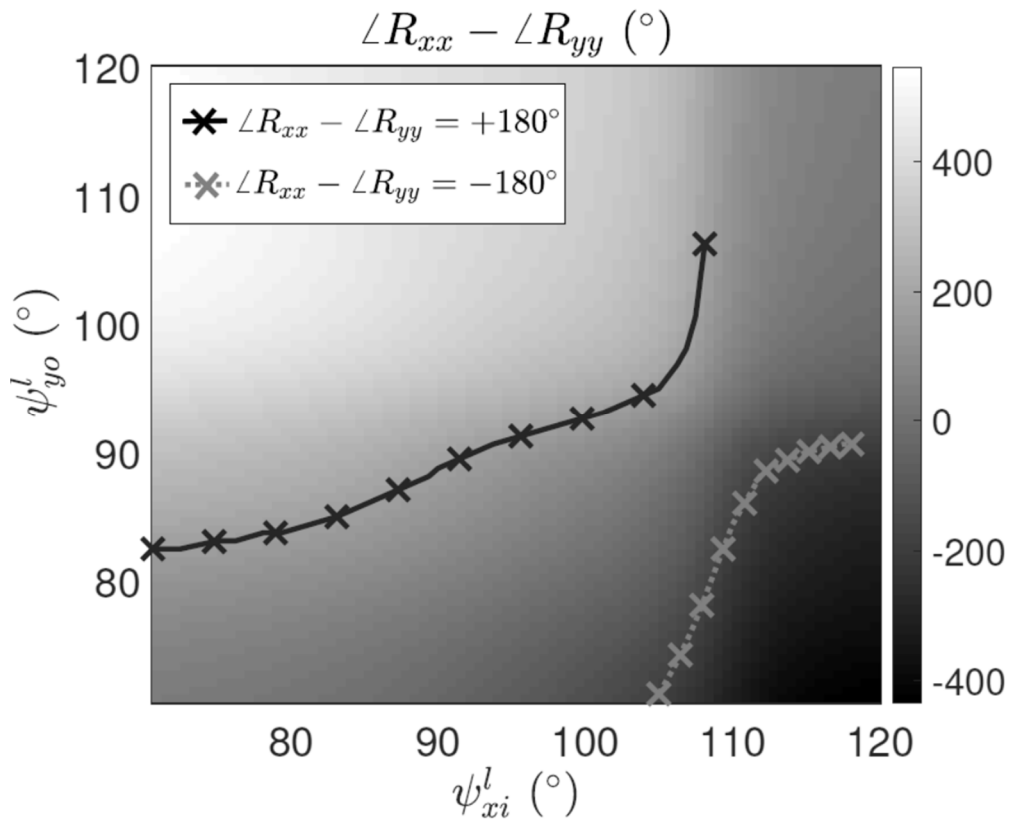


Fig. 7A

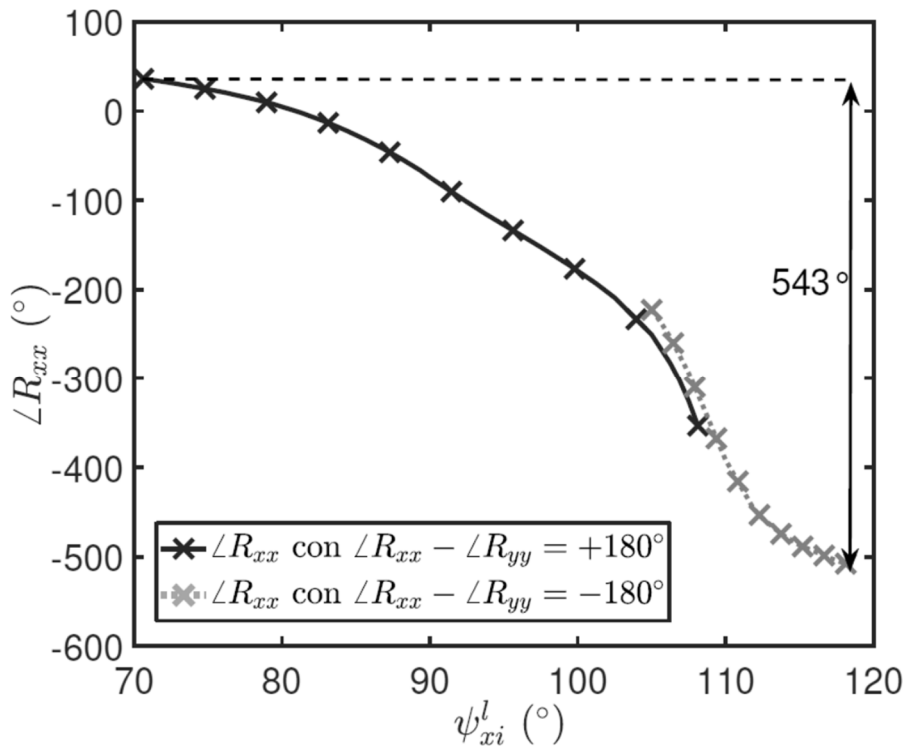
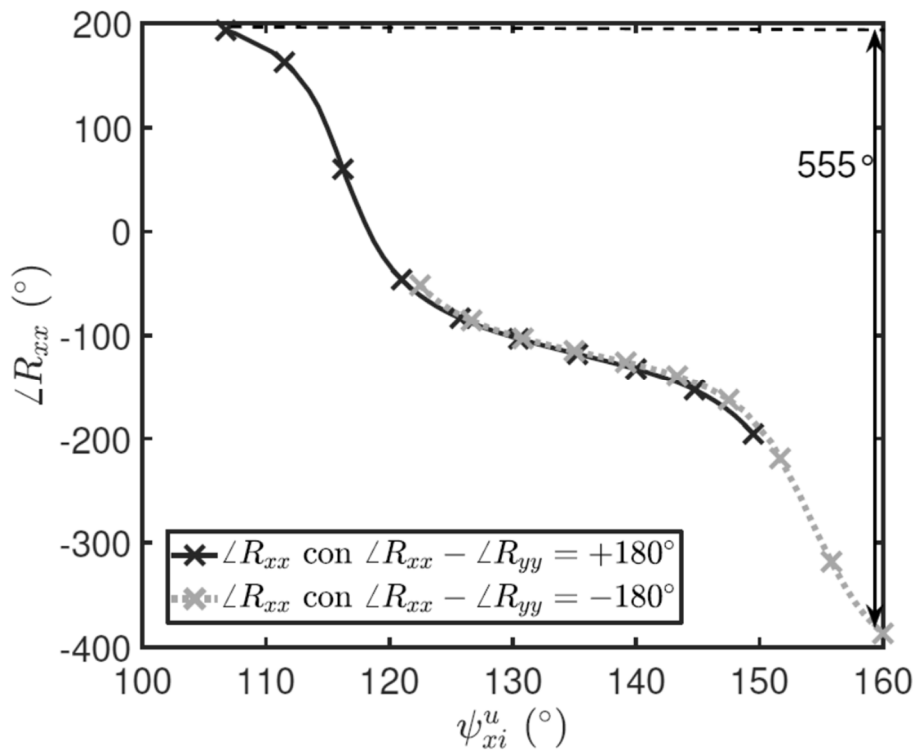
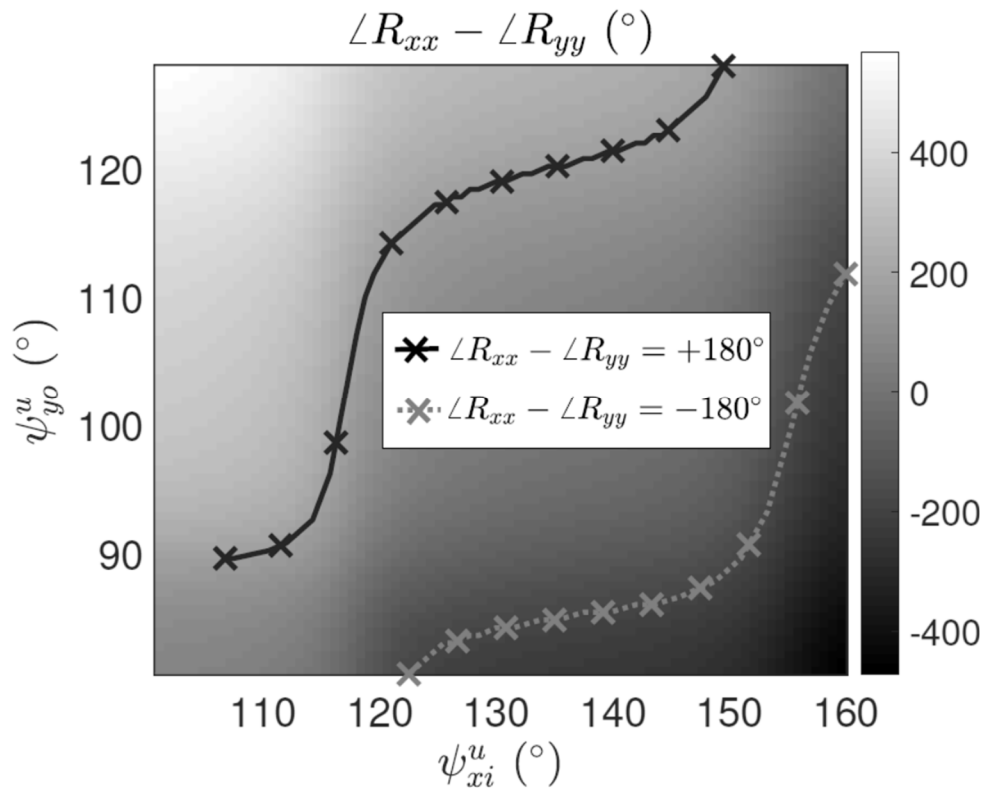


Fig. 7B



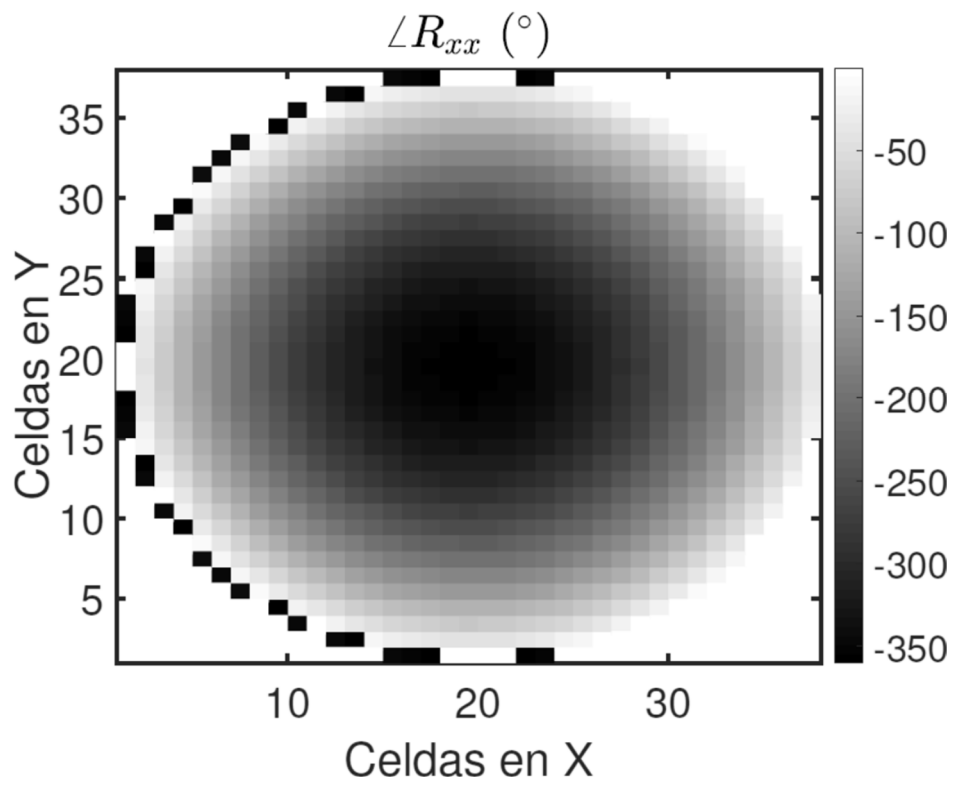


Fig. 9A

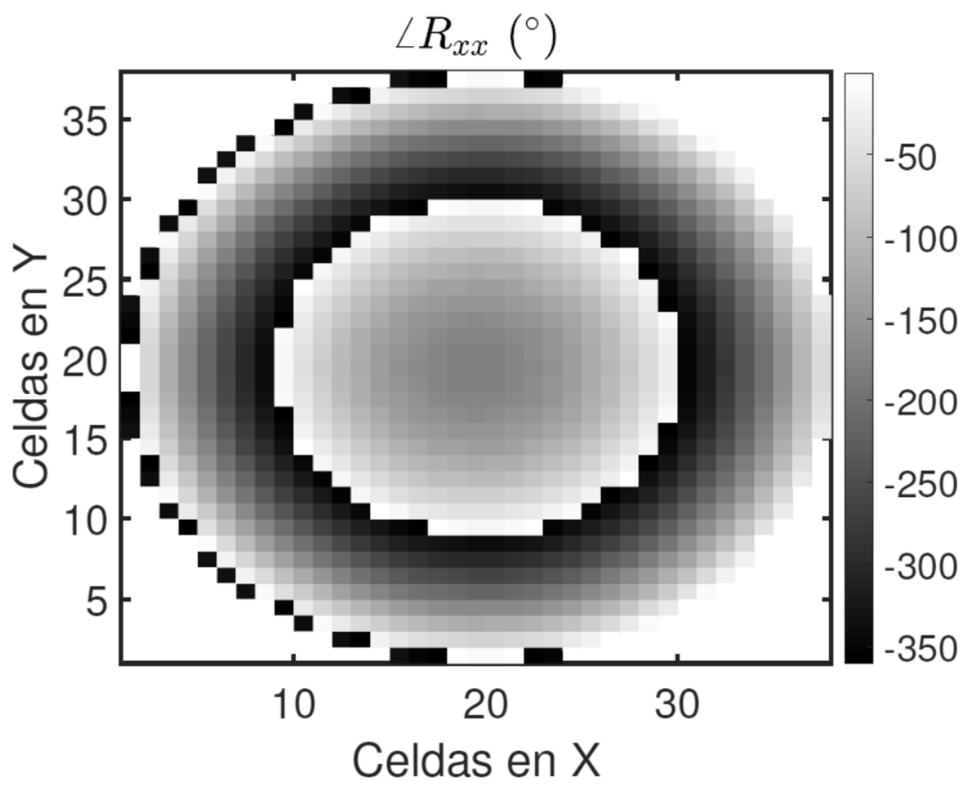


Fig. 9B

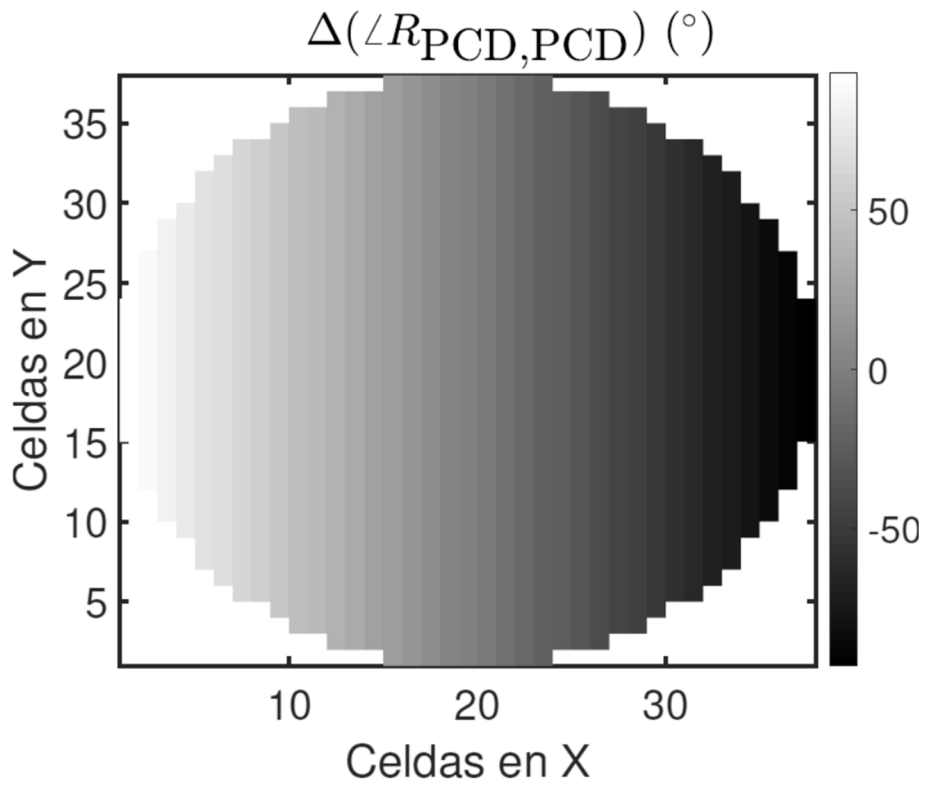


Fig. 10A

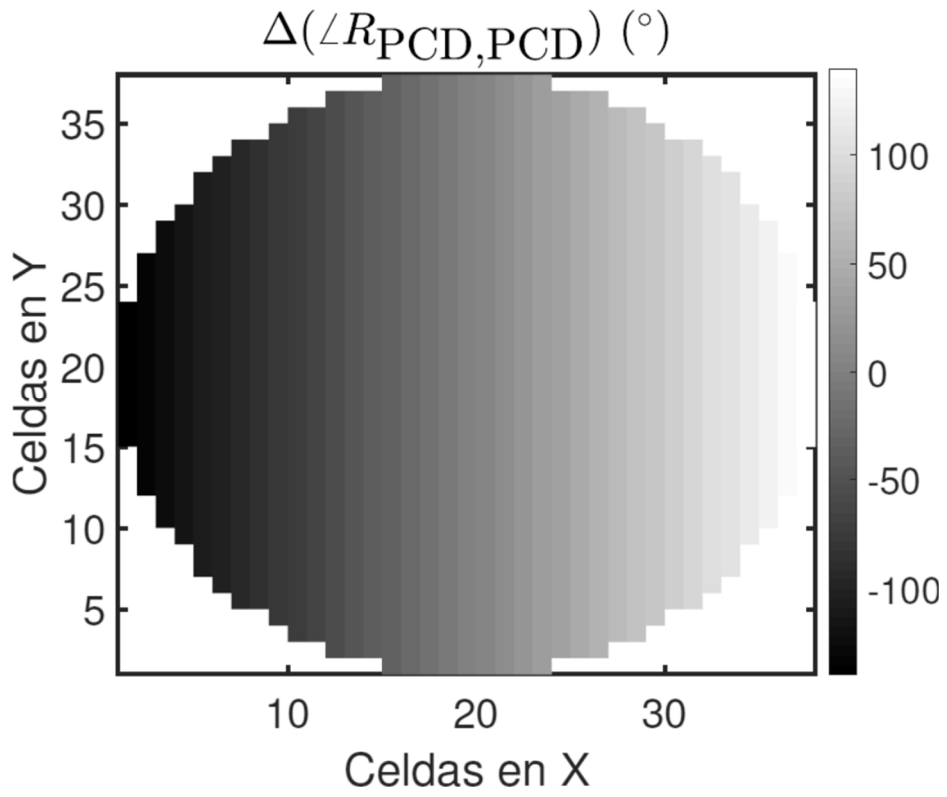


Fig. 10B

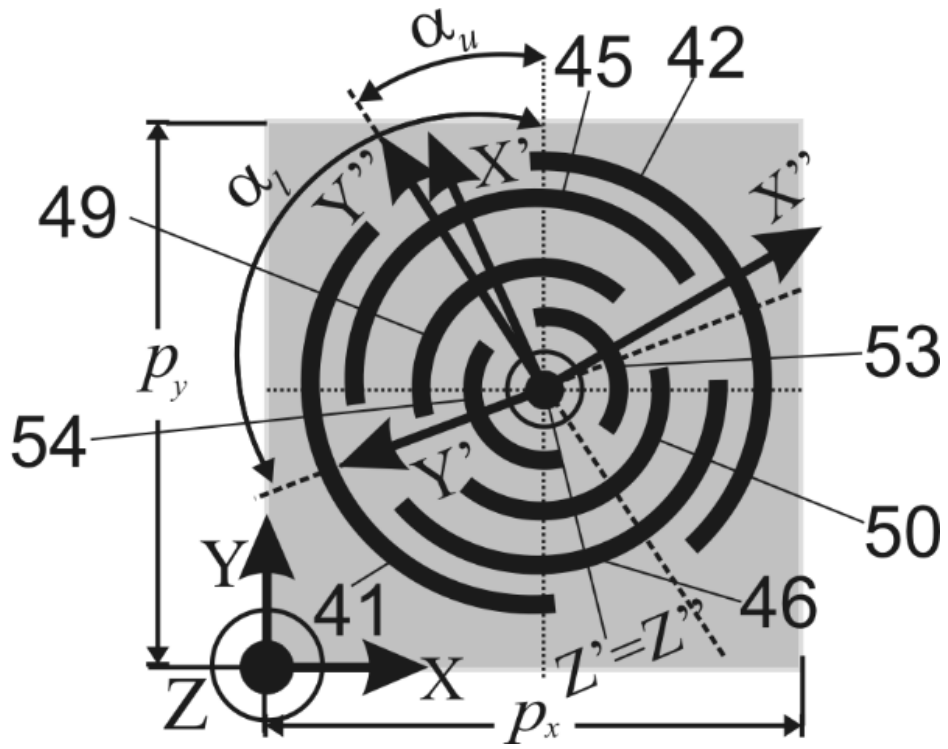


Fig. 11A

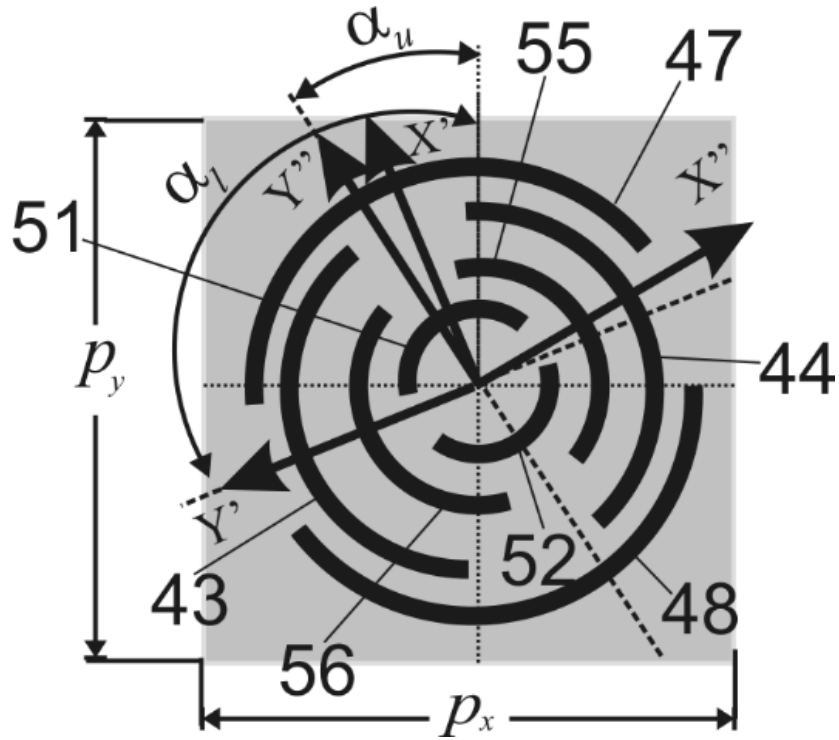


Fig. 11B

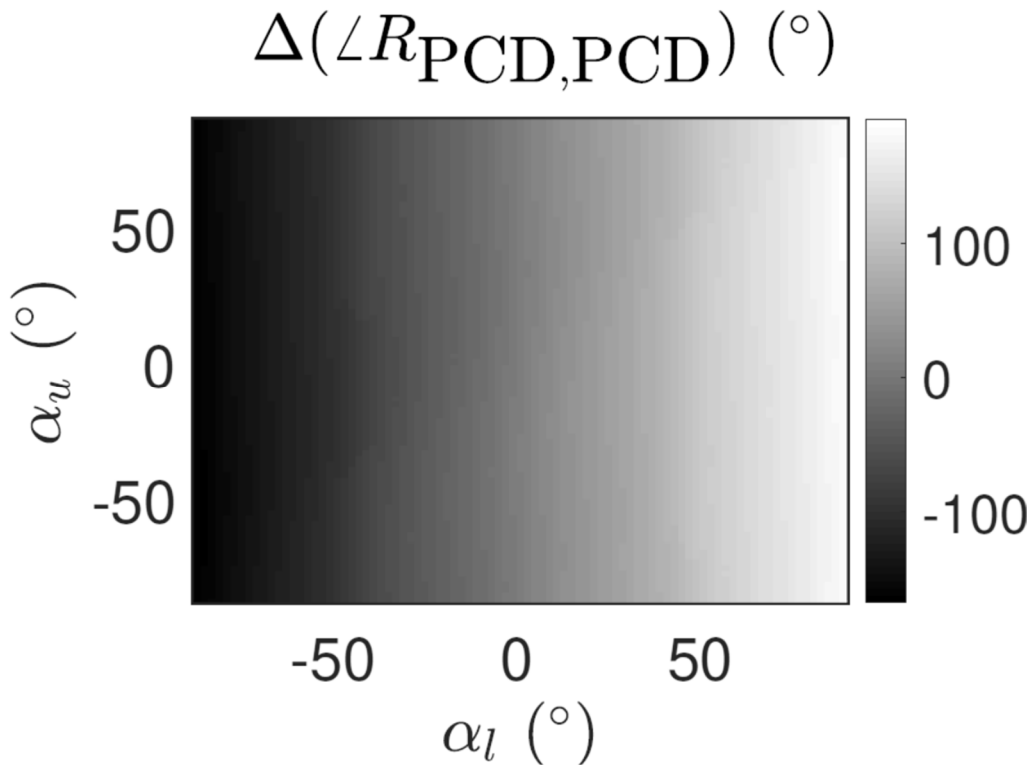


Fig. 12A

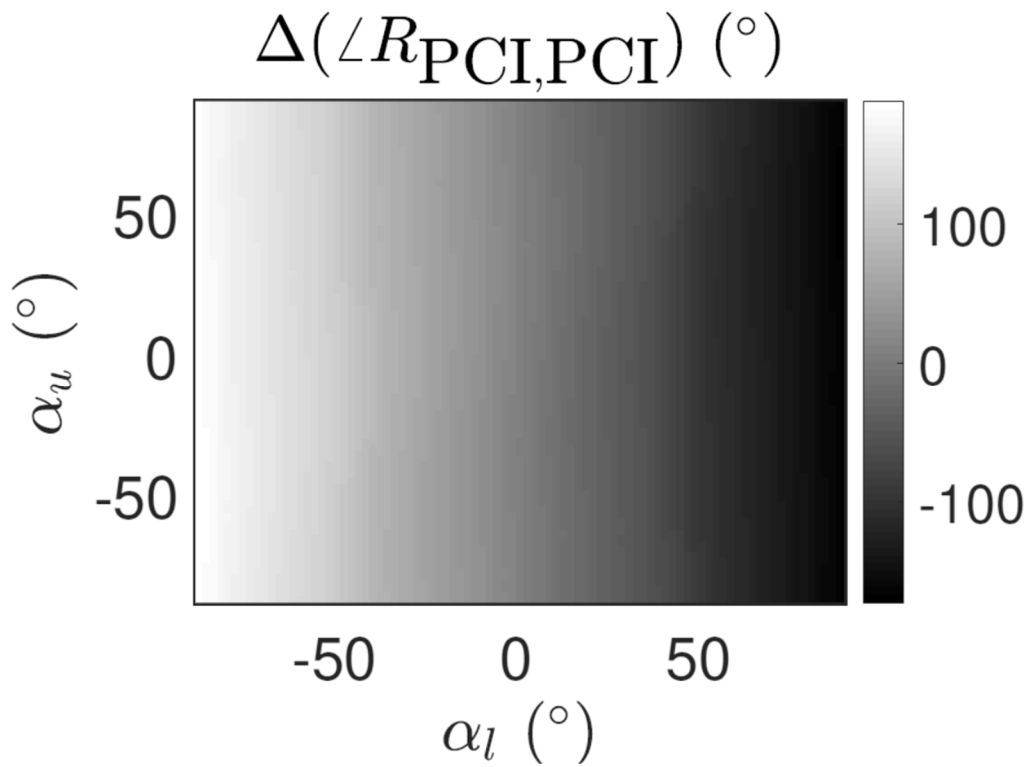


Fig. 12B

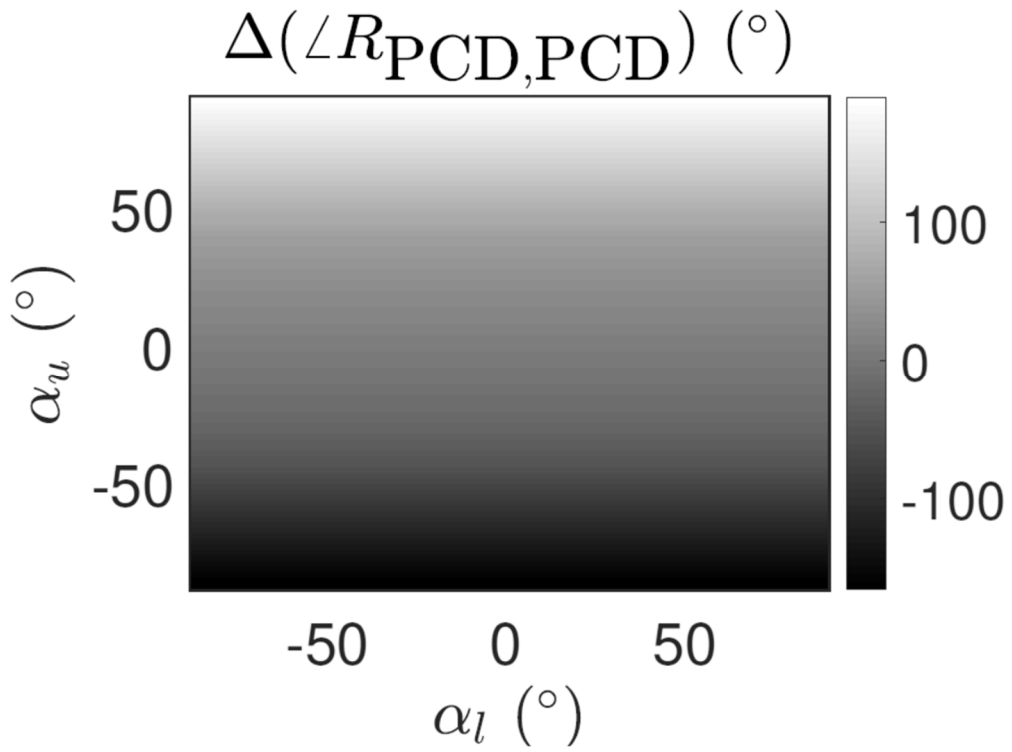


Fig. 13A

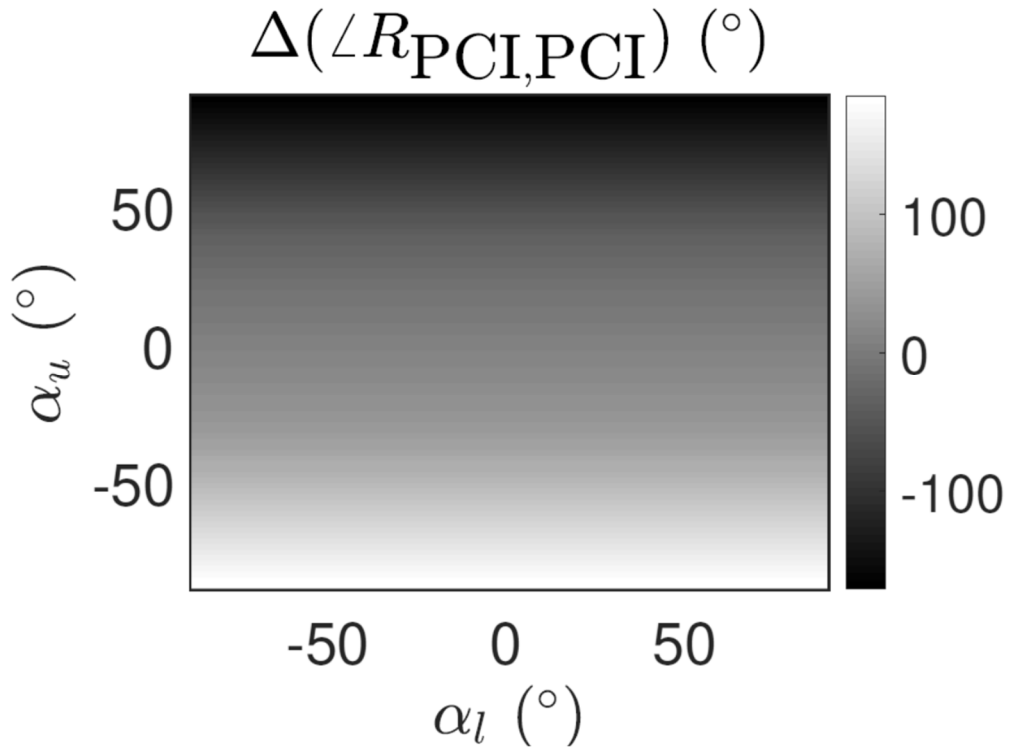


Fig. 13B

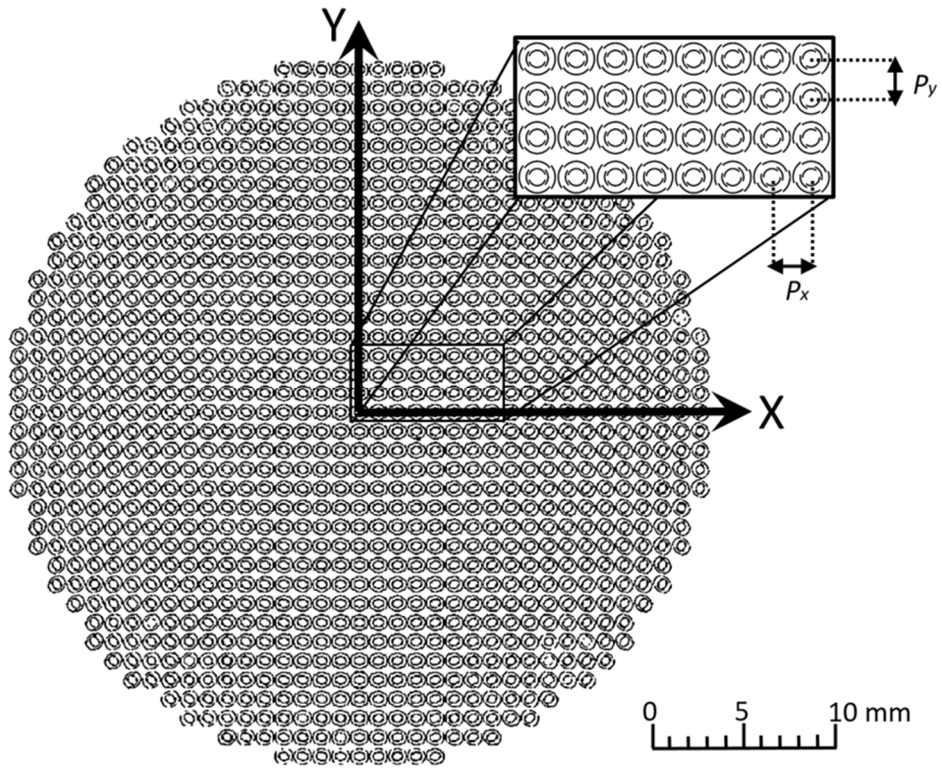


Fig. 14A

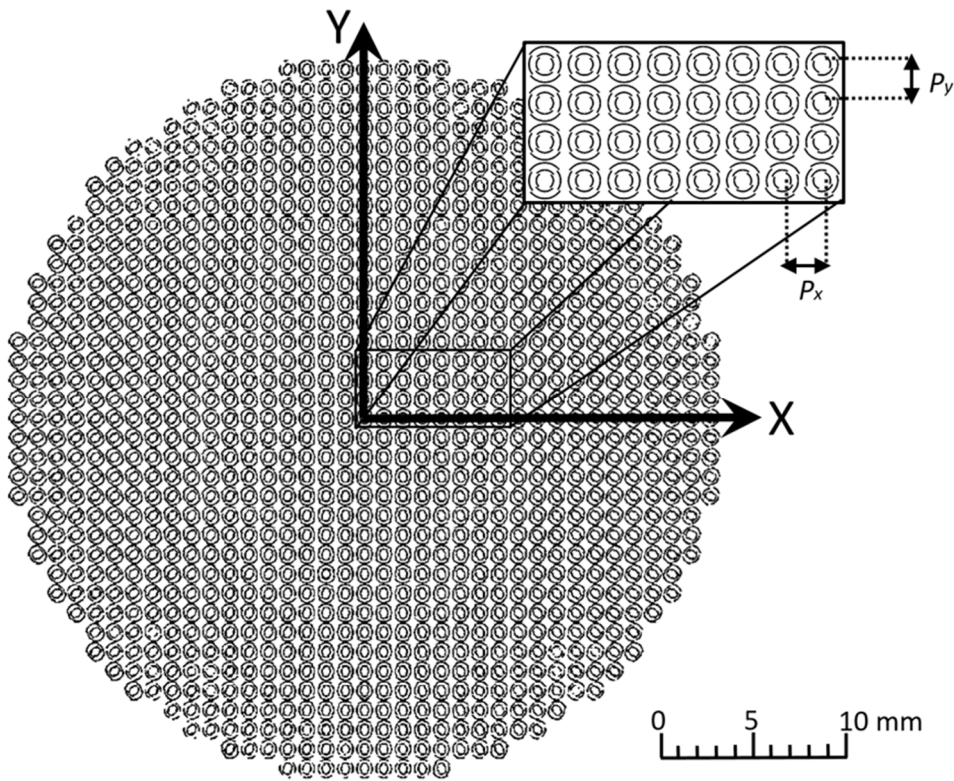


Fig. 14B

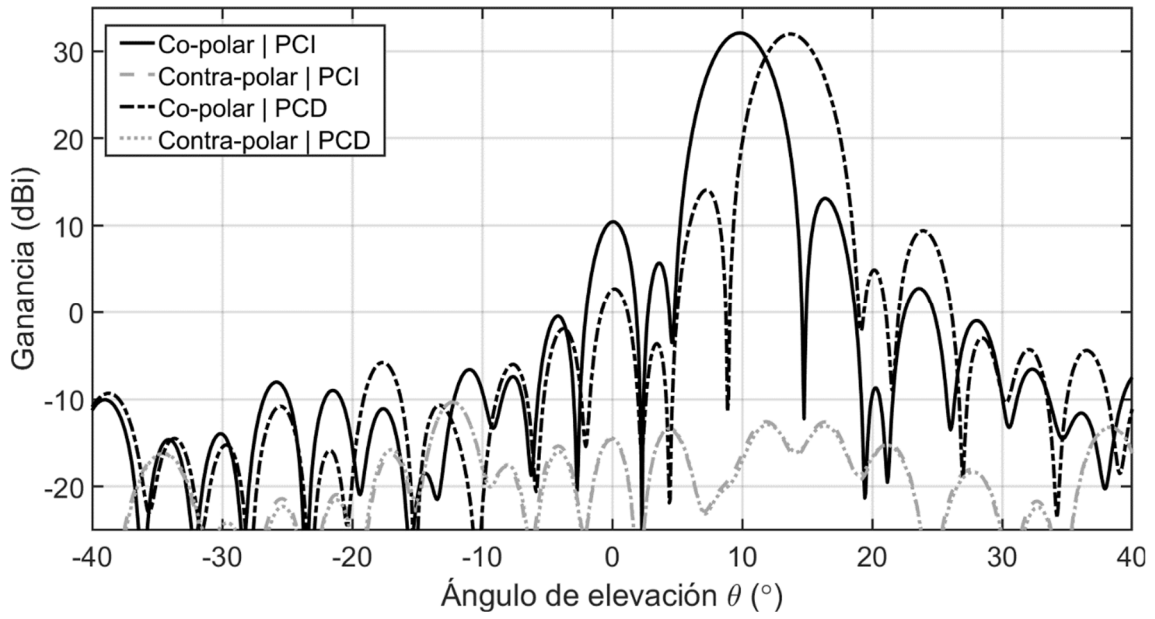


Fig. 15A

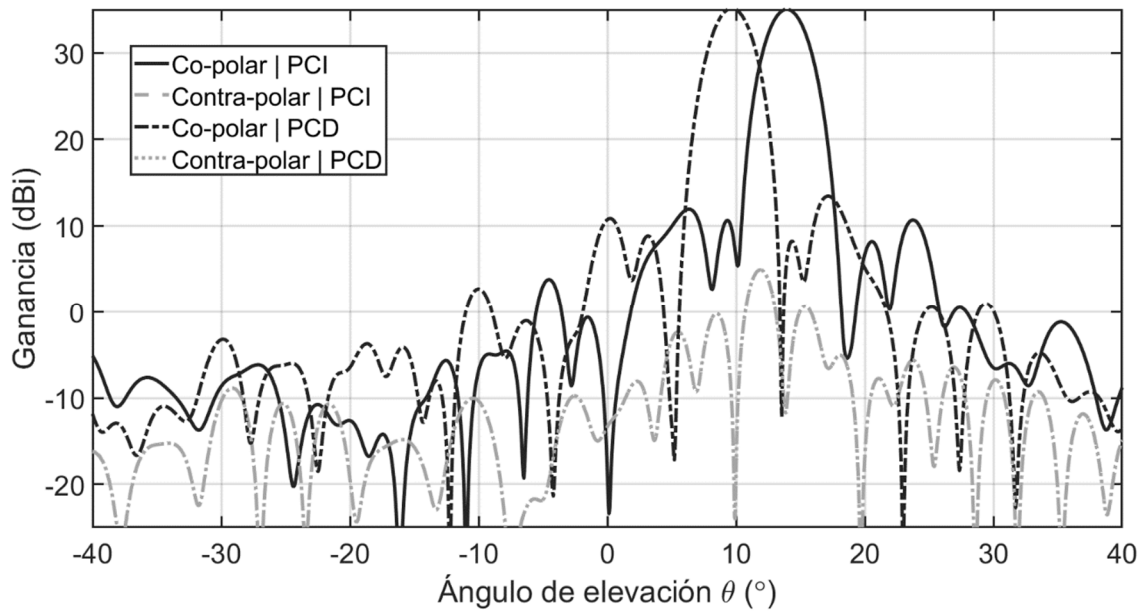


Fig. 15B

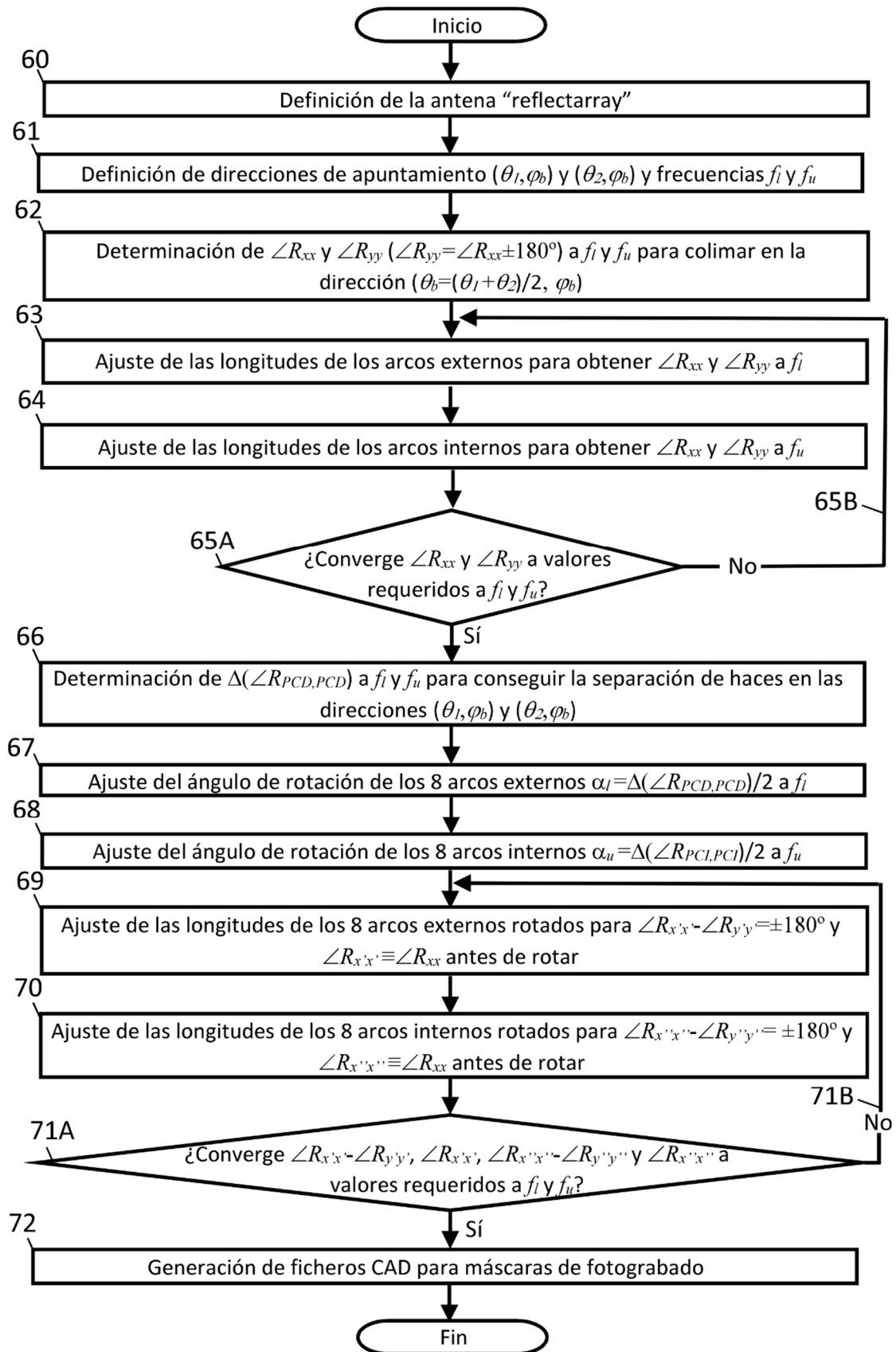


Fig. 16



- ②① N.º solicitud: 202230926
 ②② Fecha de presentación de la solicitud: 27.10.2022
 ③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. cl.: **H01Q5/42** (2015.01)
H01Q21/24 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	MARTINEZ-DE-RIOJA, DANIEL et al.: "Dual-Band Reflectarray to Generate Two Spaced Beams in Orthogonal Circular Polarization by Variable Rotation Technique". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 20200226 IEEE, USA, 26/02/2020, Vol. 68, Páginas 4617 - 4626, ISSN 0018-926X, <DOI: 10.1109/TAP.2020.2975294>.	1-9
A	LINARES TORCAL, IGNACIO.: "Diseño de antenas reflectarray de polarización circular en banda Ka para comunicaciones de banda ancha vía satélite". Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Telecomunicación (UPM), Madrid, 2018.	1-9
A	SMITH, T. et al.: "Design, Manufacturing, and Testing of a 20/30-GHz Dual-band Circularly Polarized Reflectarray Antenna". IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 2013 IEEE USA, 30/11/2012, Vol. 12, Páginas 1480 - 1483, ISSN 1536-1225, <DOI: 10.1109/LAWP.2013.2288995>.	1-9
A	LUO QI et al.: "Multibeam Dual-Circularly Polarized Reflectarray for Connected and Autonomous Vehicles". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 20190401 IEEE, USA, 01/04/2019, Vol. 68, Páginas 3574 - 3585, ISSN 0018-9545, <DOI: 10.1109/TVT.2019.2897218>.	1-9

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
 Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
 A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita
 P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
 E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
28.11.2022

Examinador
J. Botella Maldonado

Página
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

H01Q

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, NPL, XPESP, XPAIP, XPI3E, INSPEC.