

Reflectores de zonas de Fresnel e invisibilidad al radar.

Gutiérrez Ríos, Julio ^{1,*}, Vassal'lo Sanz, Juan ²

¹ Facultad de Informática de la UPM. jgr@fi.upm.es

² Instituto de Tecnologías Físicas y la Información del CSIC; juan.v@csic.es

* Autor Principal y responsable del trabajo

Resumen:

Se presenta una metodología eficiente de diseño de reflectores de zonas de Fresnel (FZP). A las ventajas del bajo coste de estos reflectores se le añade la posibilidad de construir reflectores reconfigurables capaces de adaptarse a las características de radiación exigidas en diferentes aplicaciones, como las de superficies sin eco o invisibles a radares.

Palabras clave: superficies sin eco, invisibilidad a radares, reflectores planos

1. Introducción

Como es bien sabido, los reflectores de Fresnel, al igual que las lentes de Fresnel, consisten en una segmentación de un reflector parabólico, de forma que la función del reflector sea la misma, a excepción de los efectos de las discontinuidades y, sin embargo, sea prácticamente plano y no ocupe el espacio que ocupa un paraboloide convencional.

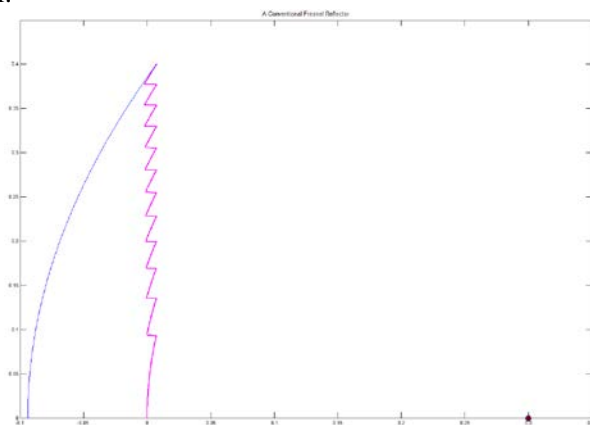


Figura 1: Reflector de Fresnel Convencional en comparación con su paráboloide de referencia

En la Figura 1 se puede ver el perfil de la mitad superior de un reflector de Fresnel comparado con un paráboloide con el mismo foco (representado en la figura). A la vista de esto, no cabe duda acerca de las ventajas

del reflector de Fresnel en cuanto a su tamaño y manejabilidad. Ahora bien, tratándose de radiación coherente, es necesario que cada segmento del reflector emita en fase con todos los demás. Eso significa que el retroceso de cada segmento respecto al anterior debe ser de un número entero de semi-longitudes de onda, de forma que la señal emitida desde el foco, entre ida y vuelta, sufra un desfase de un número entero de longitudes de onda y, por tanto, las radiaciones de todos los segmentos se encuentren en fase.

Esta circunstancia tiene bastante repercusión, pues significa que un reflector de Fresnel debe estar sintonizado para la banda en la que se vaya a usar, a diferencia de un paraboloide, que funciona sin problemas para cualquier longitud de onda.

El objeto de este artículo no son los reflectores de Fresnel convencionales sino los reflectores zonales de Fresnel o FZP (Fresnel Zone Plates) [7] [9]. Estos consisten esencialmente en una discretización de los reflectores de Fresnel, de forma que cada segmento del reflector, va a quedar convertido en unos pocos niveles planos que constituirán las zonas de Fresnel.

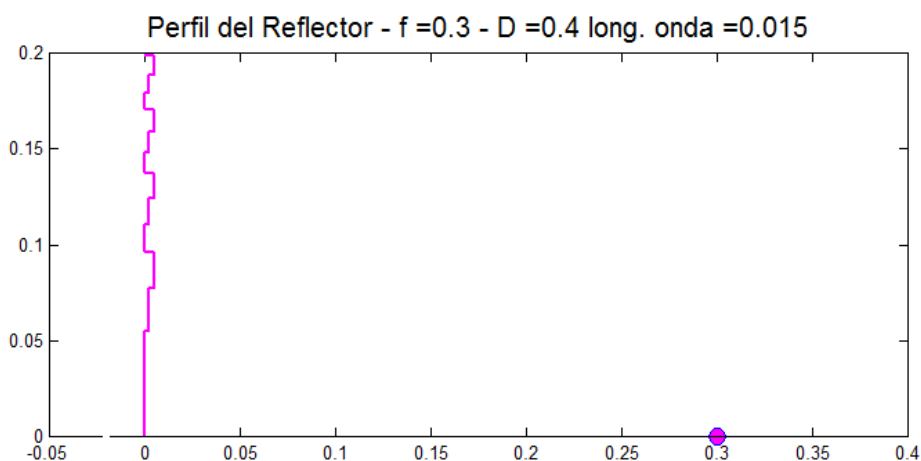


Figura 2: Perfil ejemplo de un reflector de zonas de Fresnel (FZP)

En la Figura 1 se puede ver un ejemplo de reflector de zonas de Fresnel, configurado a tres niveles. En él se pueden distinguir las diferentes zonas en forma de escalera con tres peldaños. Comenzando por el centro (ordenada cero en la Figura 2) cada retroceso señala el comienzo de una nueva zona, cada una de las cuales con tres niveles. Se puede ver que cuanto mayor sea el número de niveles, mayor será la aproximación del FZP a reflector de Fresnel convencional de referencia. Ahora bien, cuanto mayor es el número de niveles, más complejo resulta, cuando, por lo contrario, de lo que se trata es de obtener reflectores de buenas características de fácil factura y bajo costo.

En efecto, la realización de un FZP puede llevarse a cabo básicamente por dos procedimientos. El primero consistiría en mecanizar la forma mediante fresado de una plancha de aluminio, por ejemplo, mientras que el segundo se construiría en forma de sándwich con algún material dieléctrico metalizado por una de sus caras: un plano metálico de masa estaría en la cara posterior de la primera capa. Similar a la primera sería la segunda, en la que se habría eliminado la capa metálica, salvo en los anillos del segundo nivel, pudiéndose decir lo mismo de la tercera y todas las que hubiere. Las técnicas que permitirían la realización de estas capas serían las mismas que las que se utilizan habitualmente para fabricar placas de circuito impreso, bien sea serigrafía, fotograbado, fresado, etc. La circunstancia peculiar de este caso es que el grosor de las planchas dieléctricas que soportan el metal ha de estar bien definido y ser acorde con la longitud de onda de la radiación para la que se vaya a emplear. El grosor, no obstante, se determina en el proceso de diseño del reflector, como se describirá más

adelante.

2. Simulación de la respuesta

En todo el proceso de estudio y desarrollo de FZPs, la herramienta fundamental que ha permitido comprobar todos los resultados ha sido la simulación. Son varios los simuladores que se han desarrollado con este fin para los diferentes casos particulares que se fueron presentando [1][3].

Para el caso de los reflectores con simetría de revolución, la solución que se vio más apropiada fue la descomposición de la superficie conductora en anillos elementales, cuya configuración se muestra en la Figura 3. Aun existiendo una geometría de revolución, es importante distinguir entre si la iluminación también tiene simetría de revolución o no, como sería el caso, por ejemplo, de una iluminación oblicua respecto al plano del reflector.

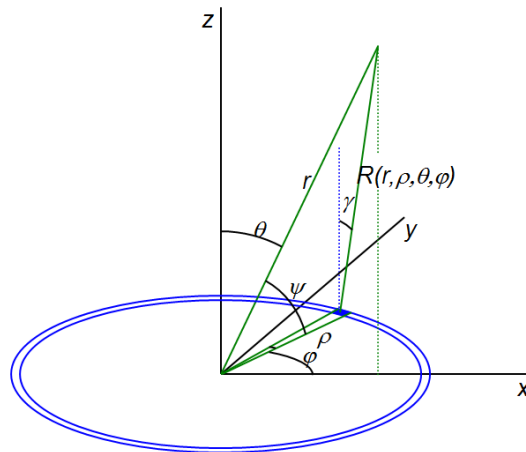


Figura 3: Anillo radiante elemental

En el caso de iluminación uniforme, la radiación en campo lejano del anillo elemental tendría la forma [7]:

$$E(r, \rho, \theta) = \frac{j}{\lambda} \cdot a(\rho) \cdot 2\pi\rho d\rho \cdot \frac{\exp(-jkr)}{r} \cdot J_0(k\rho \sin\theta) \quad (1)$$

siendo $J_0(\cdot)$ la función de Bessel de primera clase y orden cero, a la iluminación, k el número de onda y λ la longitud de onda.

Si la iluminación no fuera uniforme, entonces también es una función de ϕ y no sólo de ρ ($a(\phi, \rho)$) que, siendo circular, es una función periódica en ϕ y, en consecuencia se puede expresar mediante una serie de Fourier que en casos como el que nos ocupa, tendrá normalmente un número pequeño de coeficientes significativos. Por tanto, la radiación en campo lejano se convierte en la siguiente expresión:

$$E(r, \rho, \theta) = \frac{j}{\lambda} \frac{\rho d\rho}{r} \exp(-jkr) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[c_n(\rho) \cdot (2\pi j^n J_n(k\rho \sin\theta)) \right] \quad (2)$$

Donde $c_n(\rho)$ son los coeficientes de Fourier de $a(\rho, \phi)$.

Por supuesto, la respuesta del reflector será la integración de todos sus anillos elementales.

En el caso de que se trate de otro tipo de panel, como es el caso de los paneles reconfigurables que se describirán en su apartado específico, resulta que el panel se encuentra compuesto por elementos cuadrados. Por tanto, la base más conveniente para realizar la simulación de la respuesta no es precisamente la descomposición en anillos, sino la descomposición en celdas cuadradas. Con el fin de alcanzar una simulación más fiel, realizamos la descomposición en elementos cuadrados de tamaño bastante inferior a los elementos del panel, ya

que dichos elementos, aunque de superficie uniforme, no tienen por qué estar iluminados con la misma uniformidad.

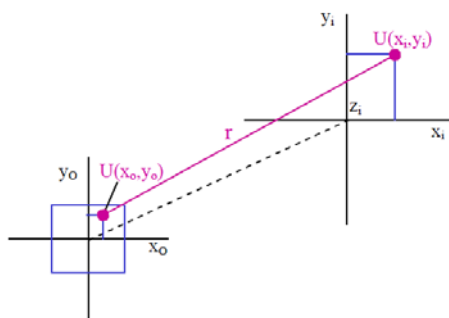


Figura 4: Geometría y notación de un elemento radiante rectangular

En la Figura 4 se puede ver el esquema de la radiación inducida en un punto lejano (x_i, y_i) a un elemento rectangular. Dadas las pequeñas dimensiones del elemento, según se ha comentado, se le puede considerar de iluminación uniforme, de forma que la radiación producida por dicho elemento en ese punto externo (x_i, y_i) vendrá dada por la expresión [7]:

$$U(x_i, y_i) = \frac{a \cdot h}{j \lambda \cdot z_i} \exp \left[jk \left(z_i + \frac{(x_i^2 + y_i^2)}{2 \cdot z_i} \right) \right] \cdot \text{sinc} \left(a \frac{x_i}{\lambda \cdot z_i} \right) \cdot \text{sinc} \left(h \frac{y_i}{\lambda \cdot z_i} \right) \quad (3)$$

Nuevamente, la respuesta del radiador completo vendrá dada por la integral de todos los elementos.

Ninguno de los simuladores desarrollados tiene limitadas las condiciones de uso. Es decir, no implica que la iluminación se haga desde el foco, ni que ésta se tenga que llevar a cabo desde un foco puntual, etc. Sencillamente, se calcula la iluminación de todos los radiadores elementales y se procede a la integración.

3. Técnicas de diseño de FZPs

Tal como se ha descrito en el apartado 1, los FZPs son una aproximación discreta a los reflectores de Fresnel, y éstos, una segmentación de un paraboloide, con todos los segmentos co-focales. En cualquiera de estas modalidades, de lo que se trata es de emular la respuesta de un paraboloide, pero con una estructura más plana y menos voluminosa. En estas circunstancias, ni siquiera los métodos clásicos para el desarrollo de reflectores de Fresnel convencionales son óptimos.

El procedimiento que hemos desarrollado para el diseño de FZP, una vez definida la longitud de onda y el número de niveles que se pretende implementar, consiste en establecer una familia de parábolas a modo de sistema de acotación de errores. En efecto, todos los paraboloides con el mismo foco cuya distancia focal se diferencie en $\lambda/2$ reflejarán la señal procedente del foco en fase en cualquier plano normal al eje de dichos paraboloides. Por tanto, todos los segmentos de un reflector de Fresnel convencional, pertenecerán a alguno de los paraboloides de esta familia (puestos con trazo grueso en la Figura 5).

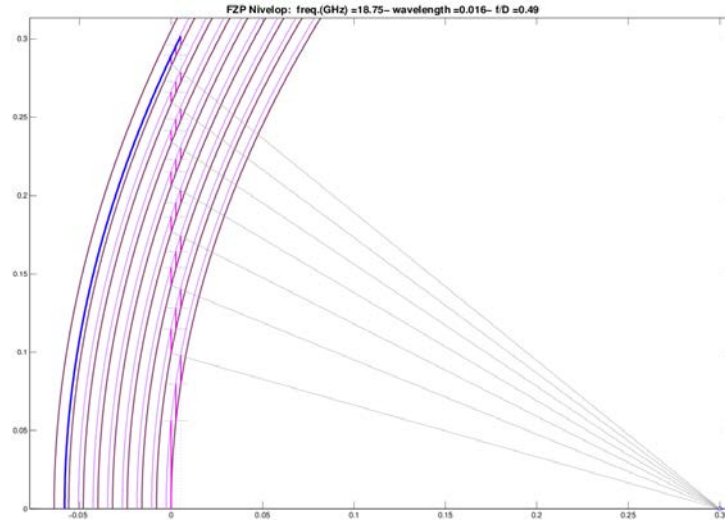


Figura 5: Diagrama para el diseño de FZPs

Sin embargo, la configuración de los FZP obliga a que se tenga un determinado error en la fase de la onda reflejada. Ahora bien, un paraboloide cuya distancia focal difiera de uno de los de esta familia en $\lambda/2N$, tendrá un desfase respecto al anterior de $2\pi/N$. Por tanto, si estimamos que el FZP no debe presentar un error de fase superior a $2\pi/N$, dicho reflector estará confinado entre los paraboloides de la familia de confocales, y otros que difieran de estos en la distancia focal mencionada (puestos en trazo fino en la Figura 5). De esta manera, las zonas y los niveles de un FZP vendrán determinados por los tramos verticales en color magenta en la Figura 5.

Otro aspecto importante de nuestro procedimiento [2] para el diseño de FZPs es tener en cuenta las sombras que se producen por la iluminación desde el foco, causadas fundamentalmente por el nivel superior. Como se puede ver en la Figura 5, no serviría de nada implementar el nivel inferior comenzando en recto desde la finalización misma del nivel superior, ya que en ese caso una buena parte del nivel inferior quedaría en sombra y no emitiría. El procedimiento, por tanto tiene en cuenta esto y pone el comienzo del nivel inferior de cada zona en la proyección desde el foco del límite del nivel superior de la zona anterior, tal como se muestra en la Figura 5. Esto no significa que no se pueda prolongar un nivel inferior hacia la zona de sombra, lo que significa es que la parte que queda en sombra no es eficiente y, además, se saldría fuera de la acotación establecida, como se puede apreciar en la Figura 5.

Con esta descripción queda en evidencia que toda la metodología se basa en óptica de rayos. La razón fundamental para ello no sólo está en su sencillez, sino que hemos podido comprobar la validez de esta aproximación comparando con algunas simulaciones realizadas utilizando óptica de ondas.

En la Figura 6 se pueden ver los resultados de simulación del reflector diseñado según la Figura 5. En la parte superior izquierda aparece una representación del reflector, junto al paraboloide de referencia. A su izquierda se ha representado el lóbulo principal y su zona más próxima del diagrama de radiación obtenida bajo simulación, tanto del FZP como del paraboloide de referencia. Pequeños círculos señalan el límite del haz a 3 dB. Finalmente, en la parte inferior se ha representado el diagrama de radiación en una parte más amplia. Las simulaciones, tanto del FZP como del paraboloide se han llevado a cabo mediante el mismo simulador y por procedimiento análogo.

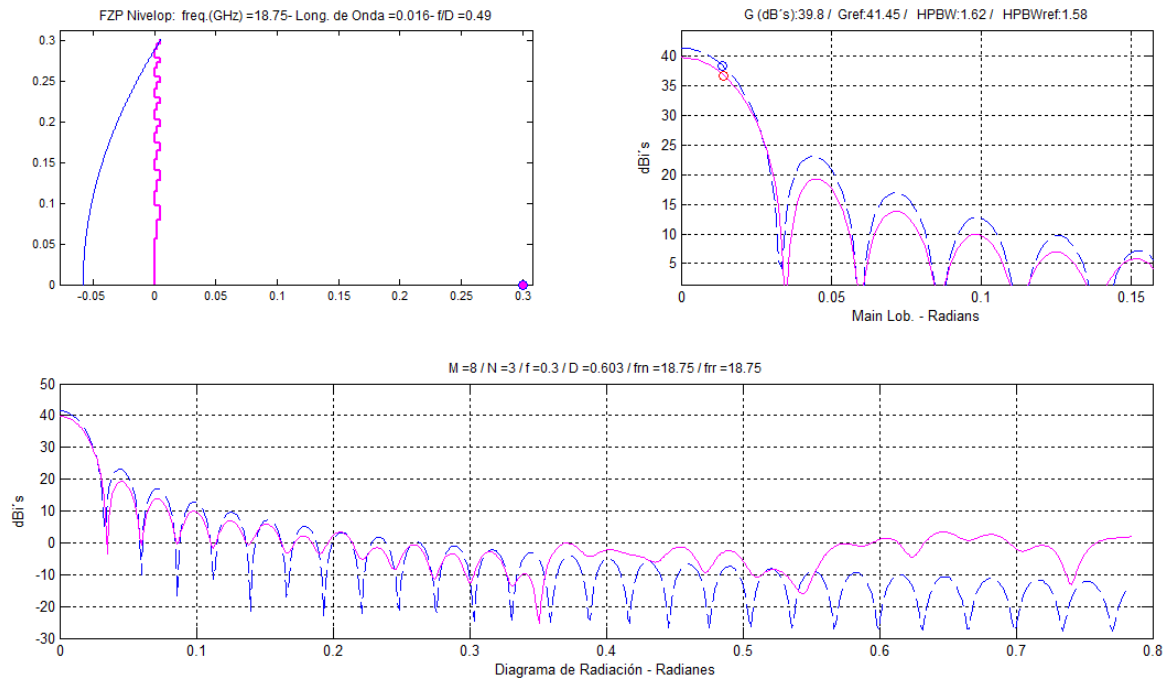


Figura 6: Resultados de simulación del FZP diseñado según la Figura 5

4. FZP reconfigurables

Como se ha podido ver, las técnicas relativas a los FZPs permiten desarrollar reflectores eficientes prácticamente en plano, solamente implementando un pequeño número de niveles (tres niveles es un buen compromiso entre eficiencia y sencillez de fabricación) y estos niveles están muy próximos entre sí, tanto más cuanto menor es la longitud de onda de la radiación. Esta circunstancia, facilita a su vez poder realizar paneles pasivos radiantes reconfigurables [4], de forma que se puedan adaptar dinámicamente las características de radiación del reflector. Por ejemplo, que se pueda orientar el haz en una determinada dirección manteniendo fija la orientación del panel, o configurar una forma concreta en la iluminación del suelo, etc.

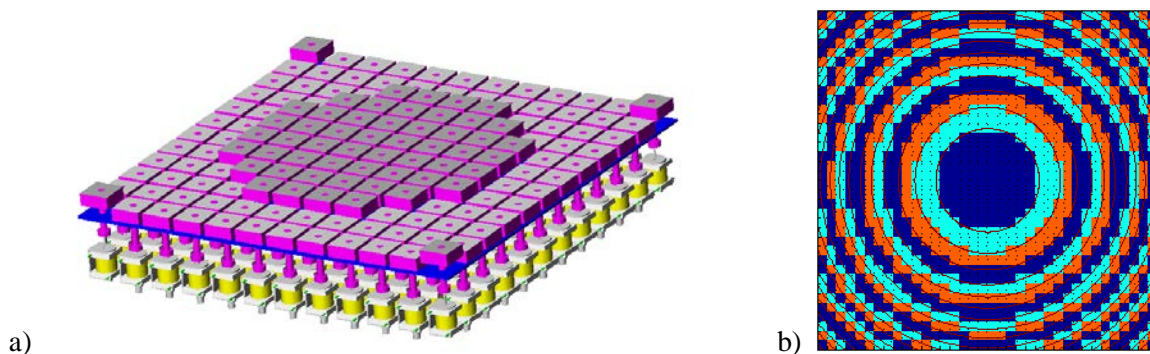


Figura 7: a) Modelo de panel reconfigurable. b) Aproximación de un FZP mediante panel reconfigurable

En la Figura 7 a) se puede ver un dibujo de lo que podría ser un panel de este tipo. En esta figura solamente se han implementado dos niveles pues, en efecto, aumentar el número de niveles en un panel reconfigurable es costoso y tecnológicamente complejo, pero se pueden instrumentar diversas soluciones, incluso con desplazamiento continuo de los elementos. En la Figura 7 b) se muestra el aspecto de la planta de un panel a tres niveles, aproximando un FZP circular con máxima ganancia en eje normal al plano del panel. Las

circunferencias que se ven en esta figura son lo que serían las delimitaciones entre niveles y zonas de un FZP circular.

Pensando en este tipo de recursos, hemos desarrollado un conjunto de algoritmos genéticos [5] capaces de encontrar, una vez fijados los objetivos, la configuración que se aproxime a los objetivos de forma óptima. Estos algoritmos efectúan la búsqueda con notable rapidez.

5. Invisibilidad al radar. Patente ES2374125 A1

El desarrollo de todas estas técnicas y la experimentación sobre las mismas dio lugar al planteamiento de una aplicación de especial utilidad: se trataba en concreto de buscar una configuración de reflector tal que tuviera la mínima radiación en la dirección en que se ilumina el reflector [6]. En estas circunstancias, podríamos, como de hecho así resultó, llegar a una superficie invisible para el radar, ya que la iluminación que éste proporciona sería dispersada en todas las direcciones menos en la dirección de incidencia.

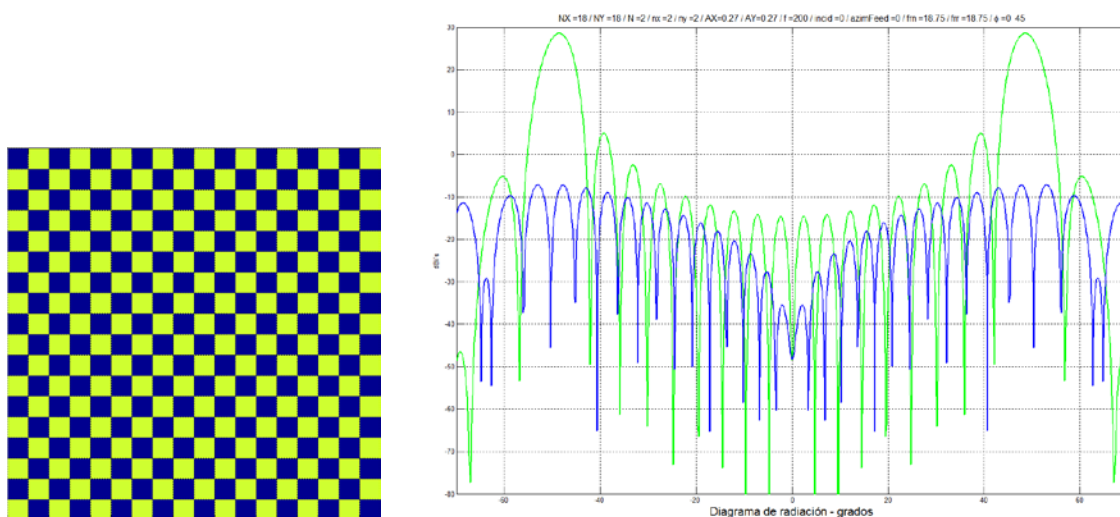


Figura 8: Configuración y diagrama de radiación de una superficie invisible al radar, con iluminación frontal.

La configuración más sencilla que cumple con este objetivo es un panel de elementos cuadrados a dos niveles separados entre sí media longitud de onda, uniformemente distribuidos a modo de tablero de ajedrez, tal como se muestra en la Figura 8. En dicha figura se presentan también los resultados de la simulación de la respuesta en el caso de iluminación frontal de un radar. El diagrama de radiación se ha hecho para dos cortes diferentes: uno normal al plano reflectante y que lo corta por un eje central, en azul, y otro corte también normal pero por la diagonal, en verde. Como se ve, en ambos casos, en la dirección de iluminación tiene un mínimo muy claro. En el corte recto, por ejemplo, es 30 dB por debajo de la dirección de máxima radiación. Este resultado es lógico, ya que estamos forzando a que el eco mezcle por partes iguales una radiación con la misma, pero en contrafase. En la Figura 9 se puede ver el caso en el que el ángulo de incidencia es de 15°. En tal caso, el máximo de la radiación en este corte, se encuentra en la dirección especular (-15°), mientras que en la dirección de incidencia el eco sigue manteniendo 30 dB por debajo del anterior. Sin embargo, esta dirección no es el mínimo absoluto ya que, al ser oblicuo, se desvía ligeramente de los 180° de desfase. En base a esto, se han desarrollado diversas modalidades de reflectores sin eco en la dirección de incidencia [6].

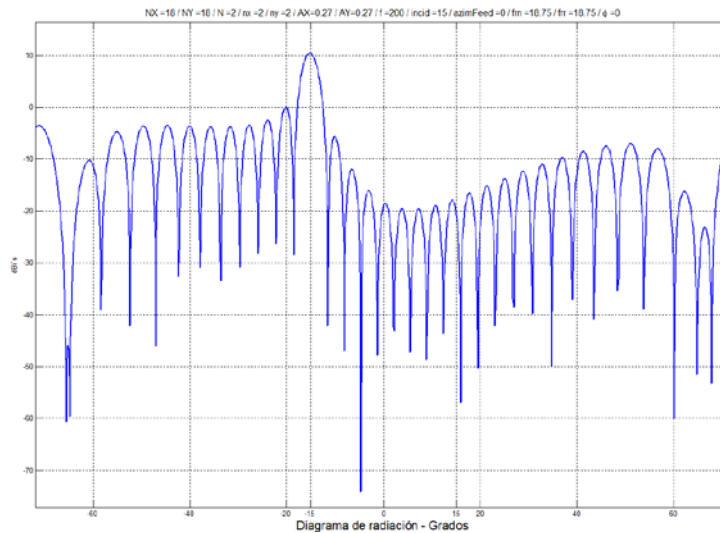


Figura 9: Respuesta de la superficie en ajedrez con ángulo de incidencia de 15° sobre el plano yz

6. Conclusiones

Se ha conseguido una metodología eficiente de diseño de FZPs, así como para la simulación de la respuesta, lo que permite experimentar en cualquier situación. A las ventajas de poder diseñar reflectores pasivos de bajo coste prácticamente planos y, por tanto, poco voluminosos, se le añade la posibilidad de construir reflectores reconfigurables capaces de adaptarse a las características de radiación convenientes en cada momento, lo cual se logra fácilmente aplicando algoritmos genéticos de búsqueda de soluciones. Finalmente, la misma tecnología permite construir cubiertas pasivas invisibles al radar.

Referencias

1. Gutierrez-Rios J., Vassal'lo J.: "Fresnel zone plate reflectors simulation and radiation diagram analysis", Proceedings of the 3rd COST 284 Workshop on Innovative Antennas (www.cost284.com), Budapest, april 2003.
2. Gutierrez-Rios J., Vassal'lo J.: Shape Optimization of FZP Reflectors. Proceedings of 27th ESA Antenna Technology Workshop on Innovative Periodic Antenas: Electromagnetic Bandgap, Left-Handed Materials, Fractal and Frequency Selective Surfaces. WPP-222. Santiago de Compostela (Spain), 2004.
3. Gutierrez-Rios J., Vassal'lo J., Simulated Response of Conic Fresnel Zone Plate Reflectors (CFZPS). European conference on antennas and Propagation (EUCAP) – 2006.
4. Gutierrez-Rios J., Vassal'lo J., New Fresnel Reflector technology with reconfigurable beam pattern. 29th ESA Antenna Workshop on Multiple Beams and Reconfigurable Antennas. Noordwijk, 2007.
5. Gutierrez-Rios J., Vassal'lo J., Algorithms for synthesis of radiation patterns using reconfigurable reflectors. European conference on antennas and Propagation (EUCAP) – 2009.
6. Gutierrez-Rios J., Vassal'lo J., Patente ES2374125 A1 – Reflector electromagnético sin eco en la dirección de incidencia de la señal. Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM) 2012.
7. Hristov, H.D. "Fresnel Zones in wireless links, zone plate lenses and antennas", Artech House, 2000.
8. Iizuka K. "Elements of Photonics - Vol. 1: In Free Space and Special Media" – John Wiley, 2002.
9. Zhang W-X., "An improved zoning rule of the Fresnel Zone Plate", Microwave and Optical Technology Letters. Vol 23, No. 2, October 20, 1999.