

Study of Optical Vortices in Lens Antenna

Patricio M. Gross, Julieta Z. Vernieri, Alberto J. Bava
Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería,
UNLP
La Plata, Bs As, Argentina
patricio_gross@yahoo.com.ar

Felipe Vico Bondia, Miguel Ferrando Bataller
Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
(ITEaM), Universidad Politécnica de Valencia (UPV)
Valencia, España
mferrand@com.upv.es

Abstract—This work presents an analysis of optical vortices produced by homogeneous dielectric lens antenna with hyperbolic profiles in the millimeter waveband. The use of dielectric lenses can substantially improve the antenna parameters, especially the flatness of the radiated waves and the gain of the antenna. Simulations are performed using a recently published electromagnetic simulation code. The program yields field intensity and field phase graphics, allowing the analysis of the stationary field resulting from the feeder-lens array and its radiation pattern. In the phase graphics, diffraction effects are observed when the lens presents flat edges, evidencing the presence of optical vortices.

Keywords—Lens Antenna; Optical Vortices; Simulations

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de antenas-lente en la banda de microondas se ha visto impulsado en los últimos años a raíz de las nuevas tecnologías de fabricación y al uso de nuevos materiales, incrementando así la posibilidad de su implementación en nuevas aplicaciones [1,2,3].

A diferencia de las antenas parabólicas, cuyo principio de funcionamiento es la reflexión de las ondas en una superficie conductora, las lentes utilizan las propiedades de refracción en medios dieléctricos. Las lentes dieléctricas permiten transformar ondas esféricas en ondas planas modificando su amplitud y fase. Si se ilumina dicha lente con un alimentador obtenemos lo que se denomina una antena-lente (lens antenna). Dicho conjunto permite obtener mayor directividad y ganancia de radiación comparado con el alimentador aislado.

Con el incremento de las capacidades computacionales actuales se ha hecho posible la simulación de antenas-lente y ello ha permitido la optimización de sus diseños. Cuando las lentes son utilizadas en aplicaciones ópticas, son estudiadas mediante técnicas tales como el trazado de rayos, debido a que el tamaño de la lente es mucho mayor a la longitud de onda de la fuente. A frecuencias tales como las microondas (cuyas longitudes de onda correspondientes varían entre 10^{-3} m y 1 m), que son las empleadas en las antenas-lente, otras técnicas deben ser aplicadas para lograr buenos resultados.

En el presente trabajo aplicado a antenas-lente, se utiliza un nuevo código de simulación electromagnética basado en el método de los momentos, [5], resultando una herramienta muy útil para el análisis del fenómeno de Vórtices Ópticos (VO).

Un vórtice óptico o singularidad óptica es aquella región del espacio por donde viaja la luz en donde se presentan simultáneamente las dos siguientes características: la amplitud compleja del campo electromagnético es exactamente igual a cero (es decir, intensidad de la luz es igual a cero) y la fase presenta una indeterminación. [4].

El objetivo de este trabajo es el estudio de la manifestación de vórtices en antenas-lente dieléctricas. Las simulaciones se realizan mediante el nuevo código antes mencionado. El mismo ha sido escrito en MATLAB [6], utilizando para el presente trabajo una versión en 2D. Este software permite la simulación de antenas-lente de varias longitudes de onda de diámetro.

II. ANTENAS-LENTE

En una antena-lente las ondas esféricas provenientes de la fuente son transformadas en ondas planas debido a los retardos de fase que genera la lente, aumentando la directividad de todo el sistema. Para lograr dicho efecto se diseñan lentes con diferentes perfiles. Las más estudiadas en óptica tienen perfil esférico [7]. Para mitigar efectos indeseados de dichas lentes, tales como las aberraciones esféricas, en microondas se diseñan lentes con perfil hiperbólico o con perfil elíptico [1]. Las lentes que no tienen perfil esférico se denominan asféricas.

La lente estudiada en este artículo es del tipo plano convexa hiperbólica, teniendo un perfil que sigue la siguiente ecuación:

$$\rho(\psi) = \frac{(n-1)f}{n \cos(\psi) - 1} \quad (1)$$

Donde n es el índice de refracción del material dieléctrico ($\epsilon_r = n^2$) y f es la distancia focal.

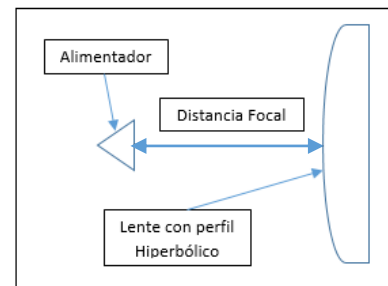


Fig. 1. Antena-lente con perfil hiperbólico.

La Fig. 1 muestra el conjunto alimentador lente. En esta antena-lente se coloca el centro de fase del alimentador coincidente con el foco de la lente.

La directividad máxima de la antena-lente es función de su diámetro, al igual que las antenas de apertura.

En este trabajo se analiza el fenómeno de vórtices ópticos sobre el borde de una antena-lente con perfil hiperbólico.

III. VÓRTICES ÓPTICOS

Una onda electromagnética puede presentar singularidades de fase a lo largo de líneas continuas donde la amplitud de la onda se desvanece. Existen tres interpretaciones para estos defectos: dislocaciones del frente de onda, ya que los patrones de las superficies de fase constante (frentes de onda) reflejan los de las dislocaciones en los arreglos de los átomos en los cristales; como vórtices, ya que la dirección del gradiente de fase (es decir, la dirección de la corriente de energía o del vector de Poynting) gira alrededor de la línea singular como fluido en un vórtice irrotacional; y como cerros, es decir, "hilos de oscuridad" [8,9,10]. Las dislocaciones de fase son también conocidas como tenedor del diablo (Devil's Fork).

Estas singularidades de fase, vórtices o dislocaciones ópticas, se asocian con los lugares del frente de onda en donde la intensidad del campo luminoso se anula y por tanto la fase no está definida. Alrededor de este sitio, es decir del vórtice, el frente de onda (de fase constante) presenta una superficie de hélice con salto de $\pm 2\pi m$ durante una vuelta; donde m es la carga topológica [4]. La configuración helicoidal del frente de onda queda expresada por la dependencia espacial de la fase del haz en la forma:

$$\Phi(\varphi, z) = k z + m \varphi \quad (2)$$

donde z es el eje de propagación, φ es el ángulo azimutal en la sección transversal del haz, m es un entero denominado carga topológica de un VO y k es el número de onda.

En la Fig. 2 se observa el efecto de las dislocaciones en un diagrama de fase para $m=1$ y $m=5$ respectivamente.

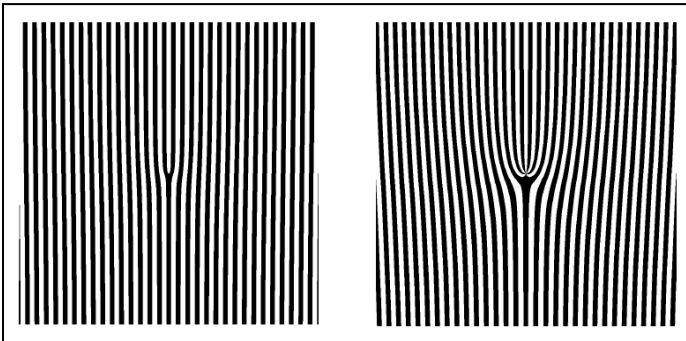


Fig. 2. Vórtices ópticos de primer orden para una carga topológica de $m = 1$ y $m = 5$ respectivamente.

El patrón espiral del flujo de energía justifica el término "vórtice óptico" y se utiliza extensamente en ciencia óptica.

Un vórtice óptico puede ser generado por la interacción de tres o más ondas planas [4].

Una onda plana puede ser descrita de la forma:

$$U = U_0 e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} \quad (3)$$

donde U es la amplitud compleja del campo, U_0 es la amplitud del campo, \vec{k} es el vector de onda, que indica la dirección de propagación de la onda y \vec{r} es el vector posición en el espacio.

En el caso de interferencia de dos ondas planas de igual amplitud U_0 , se obtiene el campo complejo dado por:

$$U_{12} = 2U_0 e^{i\vec{r}(\vec{k}_1 + \vec{k}_2)/2} \cos(r(k_1 - k_2)/2) \quad (4)$$

donde el término cosenoidal es el causante de la estructura periódica de franjas claras y oscuras, típicas de la interferencia entre dos ondas planas.

El campo total dadas tres ondas planas puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$U_{total} = (U_{12} + U_{23} + U_{13})/2 \quad (5)$$

Mientras que los vórtices ópticos producidos por rayos de luz son objeto de intensa actividad de investigación, habiéndose descubierto en ellos muchas propiedades interesantes, el fenómeno de vórtices en antenas-lente en radiofrecuencias y microondas no ha recibido el mismo tratamiento.

A continuación se analiza la manifestación de vórtices en antenas-lente para microonda, resultados que podrían hacerse extensivos a ondas electromagnéticas de cualquier frecuencia.

IV. SIMULACIONES

Con el fin de evaluar la posible aparición de vórtices ópticos en antenas-lente se diseña una lente dieléctrica de perfil hiperbólico y se modifican los bordes con el fin de ver dicho efecto sobre el frente de onda. La lente modificada presenta bordes planos tal como se observa en la lente de la Fig. 1.

El código utilizado para las simulaciones permite diseñar cualquier tipo de objeto dieléctrico a través de una función contraste y utilizar diferentes perfiles de alimentadores, obteniendo como resultado el módulo y la fase del campo electromagnético y el diagrama polar de campo lejano.

Las simulaciones se realizan para un espacio bidimensional cuadrado, cuyos lados se expresan en cantidades de longitud de onda, por lo que resulta adimensional con respecto a la frecuencia simulada. Este espacio es denominado cuadrado unidad y se subdivide en N por N puntos. En las simulaciones se utiliza un cuadrado unidad de 40 longitudes de onda (40λ) de lado, y $N = 400$.

La lente base analizada posee un diámetro de 30 longitudes de onda (30λ) y su constante dieléctrica relativa es de un valor de cuatro ($\epsilon_r = 4$). Al estar diseñada la lente en función de la

longitud de onda de la frecuencia del campo a irradiar, los resultados se hacen extensivos a cualquier frecuencia.

La fuente es colocada en el foco de la lente, quedando fuera del cuadrado unidad definido para la simulación.

Se realizan simulaciones con la lente base y con la lente modificada en sus bordes. Ambas lentes poseen igual diámetro, perfil y material dieléctrico. La lente modificada se logra incrementando el espesor de la lente base, modificación que no altera la dirección del frente de la onda que atraviesa la lente. Las simulaciones no contemplan las pérdidas en el material dieléctrico, por lo que el cambio de espesor no debería modificar la ganancia de la lente. La alteración de los bordes de la lente es ensayada con la intención de ver cómo se afectan los diagramas de módulo y fase de los campos electromagnéticos de la antena-lente.

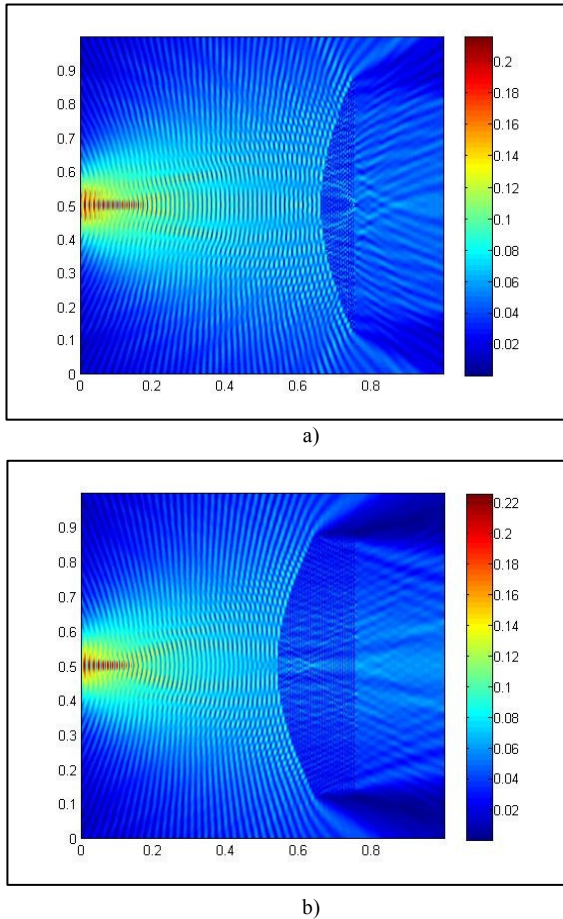


Fig. 3. Intensity relative of the field inside and outside the lens in the simulation space (unit square) for the base lens (a) and the modified lens (b).

En la Fig. 3 a) y b) se muestran gráficos en los cuales el color es indicativo de la intensidad del campo electromagnético normalizado (adimensional) dentro del cuadrado unidad para las dos lentes simuladas.

Se observa que la presencia de bordes planos (Fig. 3 b) modifica la intensidad del campo respecto de la lente base fundamentalmente en la región cercana a los bordes donde una

zona de color azul intenso evidencia la reducción del módulo hasta su posible anulación (Fig. 3.a).

En la Fig. 4 a) y b) se observa el diagrama de fase del campo en la lente base y en la lente modificada, respectivamente. Para esta última, en la zona de los bordes planos superior e inferior se observan dislocaciones en el diagrama de fase (Fig. 4 b), coincidiendo esta región con aquella en la que el módulo prácticamente se anula (Fig. 3 b).

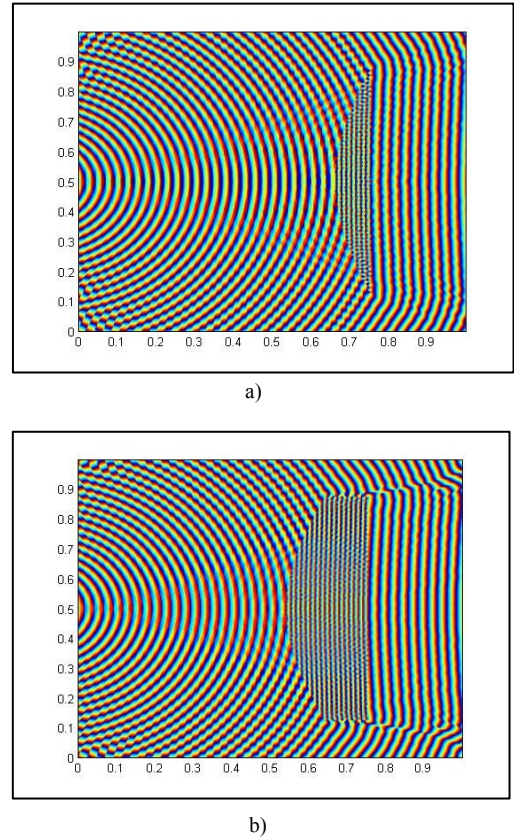


Fig. 4. Fase del campo dentro y fuera de la lente. a) Lente base y b) Lente modificada.

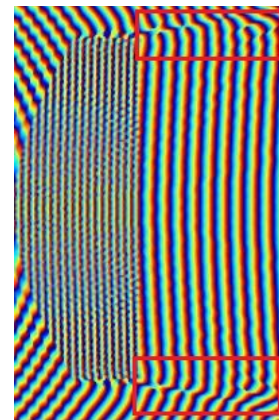


Fig. 5. Ampliación de la Fig. 4b) del sector donde se ubican las dislocaciones.

La Fig. 5 muestra una ampliación del sector en el diagrama de fase donde se ubican las dislocaciones.

La observación de estas dos condiciones en un mismo sitio, módulo de campo nulo y presencia de dislocaciones de fase, nos permite inferir la existencia de vórtices en dichas zonas. Tratándose del mismo fenómeno ampliamente estudiado en el espectro visible, del cual deriva la denominación vórtices ópticos VO, ésta se conserva aún para las microondas.

El software utilizado genera adicionalmente el diagrama polar de radiación (campo lejano), volcado en la Fig. 6 a) y b) para ambos casos estudiados. En color rojo se percibe el diagrama polar de campo lejano de la fuente aislada, mientras que en color azul se percibe el diagrama total del conjunto alimentador lente.

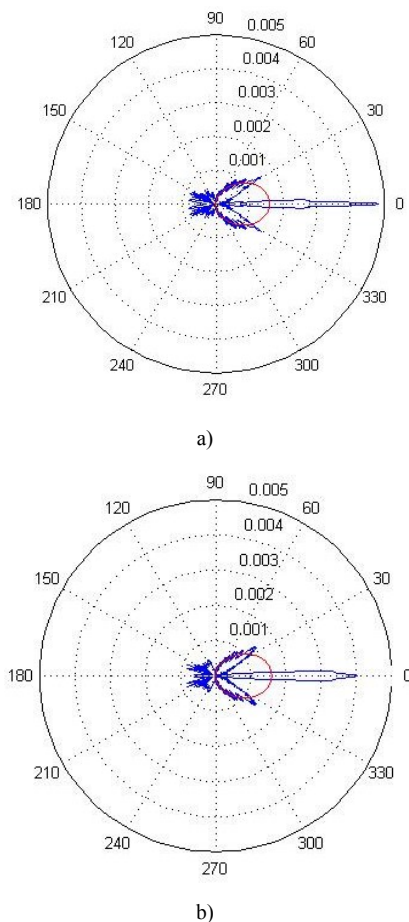


Fig. 6. Diagrama polar de (a) la lente base y (b) la lente modificada, es decir con bordes planos.

Es notoria la reducción de la ganancia, respecto de la lente base, manifiesta en el lóbulo principal del conjunto antena-lente cuando ésta presenta bordes planos (Fig 5.b). Este efecto observado en la antena-lente modificada podría estar relacionado con la presencia manifiesta de los vórtices, lo cual será estudiado en los próximos avances de esta investigación.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, permiten observar la presencia de dislocaciones de fase del campo resultante en la lente con bordes planos, en aquellas regiones en las que el campo se anula. Esto puede ser interpretado como vórtices ópticos, cuya generación se debe al efecto de difracción de bordes. Este fenómeno puede explicarse a partir de la generación de nuevos frentes de onda en los bordes planos, que viajando en diferentes direcciones al superponerse con los frentes de la onda principal producen vórtices ópticos.

Cabe destacar que, como se mencionó previamente, las simulaciones fueron posibles gracias al novedoso código que permitió realizarlas en tan sólo pocos segundos.

REFERENCIAS

- [1] Petr Piksa, Stanislav Zvanovec, Petr Ccerny. "Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves". Radioengineering, VOL. 20, NO. 1, April 2011.
- [2] Marc Imbert Vill'a. "Design and Performance Evaluation of Millimeter-Wave Flat Lens Antennas for Communications, Radar and Imaging Applications". Ph.D. program on Signal Theory and Communications. Universitat Polit'ecnica de Catalunya. July 2016.
- [3] Yun-Shik Lee. "Principles of Terahertz Science and Technology". Springer Science+Business Media, LLC. 2009.
- [4] Freddy Monroy y Lyubov Kreminskaya. "Creación de Vortices Ópticos en la interferencia de múltiples haces". Revista Hallazgos. Vol. 3, Núm. 5. 2006.
- [5] Felipe Vico, Leslie Greengard, Miguel Ferrando. "Fast convolution with free-space Green's functions". Journal of Computational Physics, Volume 323, 15 October 2016.
- [6] Matlab. <http://www.mathworks.com/>
- [7] Geoffrey Brooker. "Modern Classical Optics". OUP Oxford, 24 jul. 2003.
- [8] A. Ya. Bekshaev, A. I. Karamoch. "Structure of optical vortices produced by holographic gratings with "fork" geometry: Kummer beams". Journal of Holography and Speckle. June 2007.
- [9] Brijesh Kumar Singh, G. Singh, P. Senthilkumaran, D. S. Mehta. "Generation of Optical Vortex Arrays Using Single-Element Reversed-Wavefront Folding Interferometer". International Journal of Optics, Article ID 689612. Volume 2012.
- [10] Basistiy, V A Pas'ko, V V Slyusar, M S Soskin and M V Vasnetsov. "Synthesis and analysis of optical vortices with fractional topological charges". Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, Volume 6, Number 5. 19 April 2004.