

ANTENAS DE BOCINA OPTIMIZADAS PARA ACOPLAR MODOS GAUSSIANOS DE ORDEN SUPERIOR

*Carlos del Río, Ramón Gonzalo, Mario Sorolla y Manfred Thumm**

*Grupo de Comunicaciones
E.T.S.I.I. y Telecomunicación
Universidad Pública de Navarra
Campus Arrosadía s/n. 31006 Pamplona*

()Forschungszentrum Karlsruhe
Institute for Technical Physics
Gyrotron Development and Microwave Technology
D-76021 Karlsruhe, Alemania*

ABSTRACT

The concept of higher order free space modes, gaussian-like beam modes can be applied to efficiently transport the power generated by a gyrotron for technological applications. Waveguide modes can be coupled properly to higher order gaussian modes. These modes can be guided by an optimized higher order beam waveguide to the final experiment.

A family of optimized non linear horn antennas is investigated in order to maximize the coupling between the guided output modes of a technological gyrotron and the free space modes. The numerical computations show very favourable coupling to higher order gaussian modes, with a conversion efficiencies of about 99.8%.

1. INTRODUCCIÓN

Hasta hoy en día, debido a que la mayoría de aplicaciones requerían un buen apuntamiento de la energía, se optaba por un modo HE_{11} de guía corrugada como salida del sistema, por tener un patrón de radiación cuasi-gaussiano. En un principio, esta conversión se realizaba al final del sistema por razones de costo, ya que la guía corrugada es más cara que la guía lisa. También por esta misma razón, se optaba por transportar la potencia en un modo de guía lisa con bajas pérdidas, TE_{01} , pese a saber que el modo de guía corrugada HE_{11} tiene pérdidas menores.

La solución más clásica a la conversión final $TE_{01} \rightarrow HE_{11}$, era la de utilizar un modo intermedio TE_{11} , que se generaba mediante perturbaciones de curvatura en la guía lisa a partir del TE_{01} , y que mediante un adaptador de guía lisa \rightarrow corrugada optimizado convenientemente, eramos capaces de generar el modo HE_{11} de guía corrugada.

Posteriormente se encontró una solución más económica, ya que mediante un solo componente éramos capaces de generar un haz gaussiano a partir de modos de guía lisa. Este componente no es otro que la antena de Vlasov, que debe adoptar diferentes formas, según el modo de entrada.

Esta tecnología se incorporó rápidamente al diseño de gyrotrones, de manera que el modo de salida de los gyrotrones pasó a ser un modo cuasi-gaussiano, posibilitando la existencia de una guía de ondas cuasi-óptica, en principio más económica y versátil, que las guías de ondas convencionales.

Hoy en día, existen aplicaciones, como por ejemplo, la síntesis de cerámicas avanzadas, recubrimiento de superficies, etc., en las que no necesitamos las características de apuntamiento de un haz gaussiano fundamental. Lo único que nos interesa es conducir la potencia hacia el experimento de la forma más eficiente posible, y no nos importa la forma en que la potencia llegue, ya que la someteremos a un proceso de aleatorización, con tal de tener una estructura de campo lo más uniforme posible.

En esta comunicación presentamos una familia de tapers-conversores de modos gaussianos de orden superior a partir de modos de guía de onda. Esta comunicación viene apoyada por la comunicación "*Estudio de la posibilidad de utilizar modos de orden superior en guías de onda cuasi-ópticas*" [1], que se presenta en este mismo simposium, en la que se demuestra que es posible guiar modos gaussianos de orden superior mediante una guía de espejos.

2. MODOS GAUSSIANOS Y MODOS DE GUÍA

Como se demuestra en [1], existen soluciones a la ecuación paraxial de Helmholtz en el espacio libre con estructuras de campo muy parecidas a algunos modos de guía. El caso más claro de este fenómeno lo tenemos en el modo gaussiano fundamental, Ψ_0^0 , que puede ser excitado bastante

eficientemente por el modo HE_{11} de guía corrugada; de ahí que se diga, muy acertadamente, que el HE_{11} tiene un patrón de radiación cuasi-gaussiano.

Este caso no tiene que ser la única posibilidad, ya que también podremos decir que existen **combinaciones** de soluciones de la ecuación paraxial de Helmholtz con estructuras de campo muy parecidas a las generadas por **mezclas** de modos de guía, ya que tanto las funciones gaussianas como los modos de guía forman base. Con la única restricción propia de la limitación de paraxialidad de las soluciones gaussianas, tal y como ve en [1] y [2].

2.1. Patrón de radiación como combinación de haces gaussianos

Vamos a realizar, a modo de prueba de lo hasta ahora comentado, un cálculo de un patrón de radiación de una mezcla de modos de guía como una combinación lineal de modos gaussianos.

Para realizar esta experiencia, vamos a trabajar con los modos TE_{0m} de guía circular lisa. Debido a que tenemos simetría de revolución, buscaremos un conjunto de haces gaussianos con simetría de revolución que sean generadores de los modos TE_{0m} de guía lisa. Podríamos coger la subfamilia Ψ_m^0 como base generadora, pero todos los modos gaussianos de esta familia tienen cierta potencia en el eje, con lo que podemos tener dificultades para generar un nulo de radiación en el centro. Para evitar este problema intentaremos escoger una base de modos gaussianos con simetría de revolución y con un nulo de radiación en el centro. Esta base la podemos conseguir combinando modos de la subfamilia Ψ_m^{1,φ_0} definiendo los nuevos modos con simetría de revolución, de la forma siguiente:

$$\Psi_m^1(r, \varphi, z) \equiv \Psi_m^{1,0}(r, \varphi, z)\bar{x} + \Psi_m^{1,0}(r, \varphi, z)\bar{y} \quad (1)$$

siendo \bar{x} e \bar{y} los vectores unitarios en dos direcciones perpendiculares entre si y con el eje de propagación.

En la figura 1, tenemos representada la forma de la potencia en un plano perpendicular al eje de propagación de los primeros modos obtenidos según la ecuación (1).

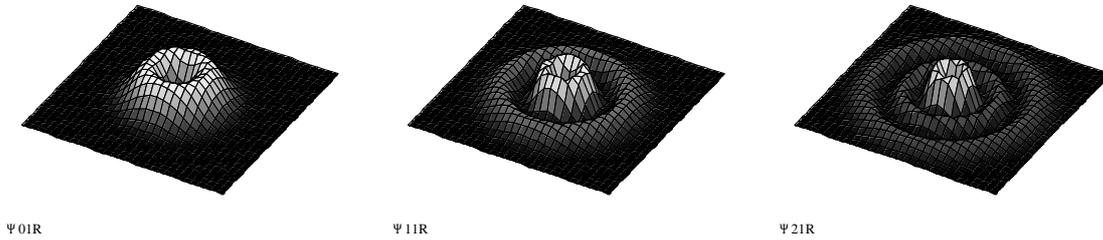


Figura 1: Representación de los términos del módulo de los primeros modos gaussianos de la base elegida, la notación es Ψ_{abR} , siendo a el índice radial, b el azimutal; la R es indicativa del carácter de simetría de revolución.

Se puede demostrar que estos modos son ortogonales y los podemos elegir como base generadora, ya que cumplen la condición de ortogonalidad siguiente:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\infty \Psi_a^1(r, \varphi, z) \overline{\Psi_b^1(r, \varphi, z)} r dr d\varphi = \delta_{a,b} \frac{\pi\omega_0^2}{4} (a+1) \quad (2)$$

estando las estructuras de los modos gaussianos definidas según [1].

Teniendo en cuenta esto, podemos desarrollar como una combinación lineal de los componentes de la base elegida, cualquier estructura de campos que tenga un patrón de radiación con simetría de revolución y con un nulo en el centro. A modo de ejemplo, podemos intentar reproducir el patrón de radiación del modo de guía lisa TE_{01} , como combinación de los patrones de radiación de los haces gaussianos de la base. Como ya sabemos, el patrón de radiación de una estructura gaussiana lo podemos conseguir muy fácilmente, ya al expandirse de forma lineal, para realizar el cálculo de los campos a una distancia Z suficientemente grande, bastará realizar las siguientes sustituciones en las fórmulas de las estructuras gaussianas:

$$\begin{aligned} r &= Z \sin(\theta) \\ z &= Z \cos(\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

siendo θ el ángulo de observación, consiguiendo los valores exactos de los campos sobre una circunferencia de radio Z .

En la figura 2, tenemos representados el patrón de radiación de un modo de guía lisa TE₀₁, junto con la combinación de modos gaussianos correspondientes, que han sido calculados correlando las estructuras de campo de los modos gaussianos de la base elegida, con la estructura de campo, en este caso, del modo TE₀₁. Se puede observar las limitaciones debidas al carácter paraxial de las soluciones gaussianas.

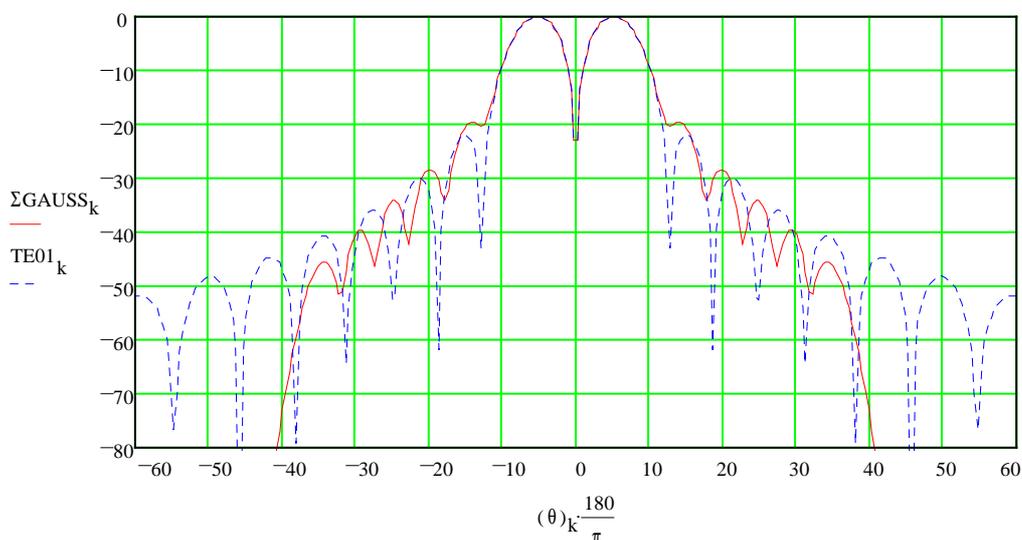


Figura 2: Patrón de radiación de modo de guía lisa TE₀₁ junto con combinación lineal de modos gaussianos (71.8% de Ψ_0^1 , 25.5% de Ψ_1^1 y 1.9% de Ψ_2^1).

2.2. Obtención de modos gaussianos como mezcla de modos de guía.

De manera totalmente análoga a la utilizada en el apartado anterior, podemos buscar las mezclas de modos de guía necesarias para obtener un buen patrón gaussiano. En la figura 3, se presentan teóricamente las mezclas de modos necesarias para obtener un modo gaussiano Ψ_0^1 con simetría de revolución en función de la relación ponderada entre el radio en el que tenemos definidos los modos de guía, con el w_0 , el 'beam waist' o el ancho mínimo del haz fundamental asociado.

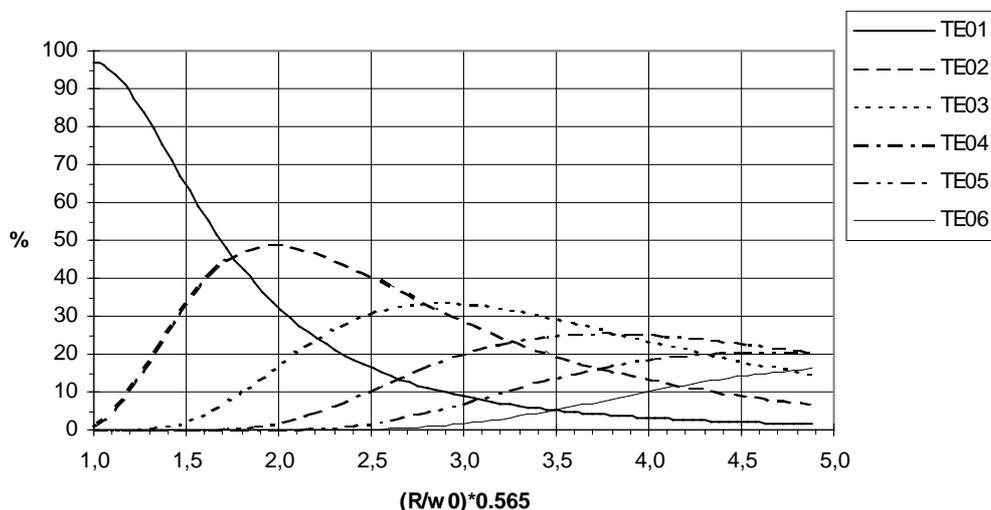


Figura 3: Representación, para diferentes radios (R), de los porcentajes de modos de guía necesarios para generar un haz gaussiano Ψ_0^1 con simetría de revolución con un ancho mínimo de haz dado.

La gráfica es totalmente independiente de la frecuencia, los porcentajes de potencia para un mismo radio y un mismo w_0 no dependen de la frecuencia. También es importante resaltar que el único dato útil del modo gaussiano para esta gráfica es el ancho mínimo del haz. Esto significa que, si mantenemos constante el radio de definición de los modos de guía y el ancho de haz mínimo, las diferentes correlaciones entre los modos de guía y el modo gaussiano en diferentes posiciones, se

mantendrán los porcentajes de potencia, variando únicamente las fases para corregir el efecto de expansión del haz gaussiano para las diferentes posiciones.

3. ANTENAS DE BOCINA ADAPTADORAS DE MODOS GAUSSIANOS

Una vez vistas las relaciones entre los modos de guía y los modos gaussianos, pasemos ahora a diseñar un componente con la finalidad de generar modos gaussianos a partir de mezclas de modos de guía. En este artículo nos centraremos en la adaptación entre modos de guía lisa TE_{0m} y los gaussianos Ψ_m^1 con simetría de revolución, familia definida en el apartado 2.1., pero es igualmente aplicable a cualquier modo de guía, ya sea circular o no, con cierto parecido con una estructura gaussiana.

El problema que se nos presenta, consiste en generar un componente, que permita adaptar de la manera más óptima posible las soluciones de campo en el interior de la guía de ondas, con los modos en el espacio libre. Parece lógico pensar en un componente de tipo antena de bocina o ‘taper’, cuya variación del radio sea siempre creciente, con el fin de tener la mejor adaptación posible entre el interior de la guía y el espacio libre.

3.1. Primera idea

Una primera idea para el diseño de este tipo de componentes podría ser la de ir abriendo la guía de la misma manera que se expandiría el haz que queremos generar. La formas de expansión de las bocinas estarán definidas según la expresión siguiente:

$$r(z) = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \varpi_0^2} \right)^2} \quad (4)$$

siendo r_0 el radio inicial de la bocina, λ la longitud de onda, y ϖ_0 el ancho mínimo de haz fundamental asociado al que queremos generar.

En la figura 4, tenemos la representación el patrón de radiación de las mezclas de modos obtenidas cortando un mismo ‘taper’ a diferentes longitudes y el campo lejano de un haz gaussiano.

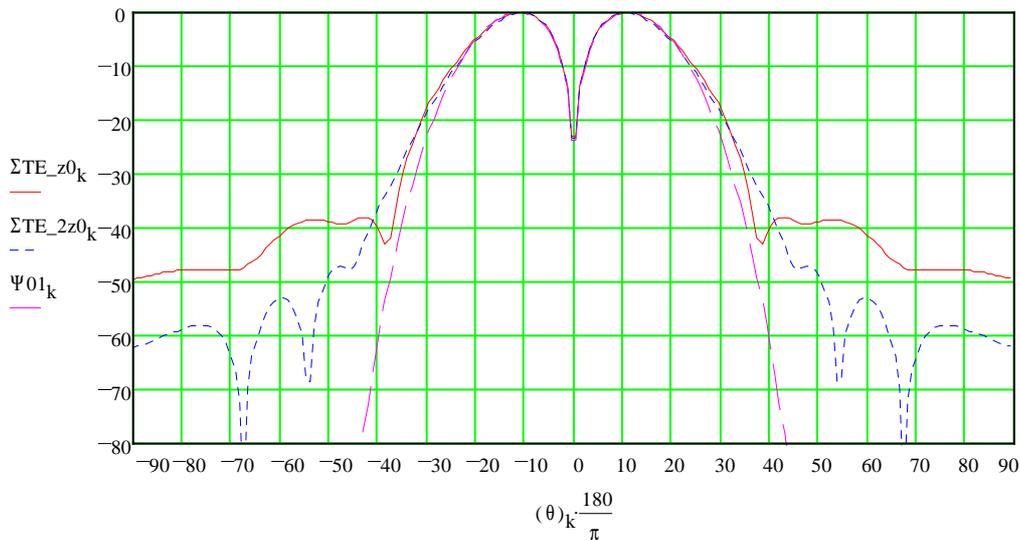


Figura 4: Patrón de radiación de mezcla de modos obtenidos en dos cortes a diferentes longitudes del ‘taper’ definido por la ecuación (4), tomando $r_0 = 19.75$ mm. y $\varpi_0 = 11.85$ mm., junto con la representación del patrón de radiación de un haz gaussiano Ψ_0^1 ideal.

Los radios de la guía de los dos cortes representados, son 27.93 mm. y 44.162 mm., las mezclas de modos en cada corte las podemos obtener de la figura 3, buscando en las abscisas 1.33 y 2.105 respectivamente. Se puede observar que pese a ser mayor el radio, el patrón de radiación no se estrecha, como era de esperar, sino que se mantiene. Esto hace pensar en la posibilidad de que se haya generado una estructura de campos propia del espacio libre dentro del taper.

Debido a que en la entrada del ‘taper’, en nuestro caso el modo TE_{01} , no se corresponde exactamente con un modo gaussiano en $z = 0$, aparecerá una zona de transición, en el que se definirá el carácter gaussiano de los campos en el interior del componente. Después de esta zona de transición, podremos cortar el componente donde queramos, que tendremos un modo gaussiano de una eficiencia elevada. El determinar el tamaño de esta zona de transición puede llegar a ser una tarea bastante

complicada, ya que será diferente para cada modo o mezcla de entrada utilizada. En el caso del modo TE_{01} es relativamente pequeña, ya que el parecido inicial del TE_{01} con el gaussiano es grande (96.7 %).

3.2. Tapers parabólicos

El mayor inconveniente de los tapers descritos hasta ahora, puede ser que al seguir la misma forma de expansión que los haces gaussianos que genera, la distribución real de los campos mantiene constante el factor de sobredimensionamiento, por lo que podemos tener problemas en cuanto a que los bordes del ‘taper’ están relativamente “cerca” de los campos. Esto, en la implementación práctica, se traducirá en que se puedan generar efectos de difracción, que en la simulación se han supuesto despreciables.

Este problema, caso de existir y ser importante, lo podemos solventar, con los ‘tapers’ parabólicos [3], ya que para este tipo de ‘tapers’ los campos en el interior están mas sobredimensionados con respecto a la guía, ya que la guía se abre más rápidamente que los campos de haz gaussiano generado. Podemos definir una familia de ‘tapers’ parabólicos de la manera siguiente:

$$r(z) = r_0 \left(1 + \left(\frac{z}{\alpha k r_0^2} \right)^2 \right) \quad (5)$$

donde α será el parámetro que me definirá la velocidad en la que el ‘taper’ se va a abrir. Existirá un valor de α , que maximice la conversión a un gaussiano. Para ver esto de una manera intuitiva, podemos fijarnos en los casos extremos, en los que el ‘taper’ se abre tan rápido, que prácticamente tenemos la guía con el radio inicial radiando al espacio libre, y si lo abrimos demasiado lentamente, estemos llegando a un ‘taper’ sin conversión de modos interna.

Con este tipo de ‘tapers’ obtenemos unas eficiencias de conversión al modo gaussiano algo mayores que en el caso de los ‘tapers’ anteriores.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado estudios que relacionan los modos gaussianos con los modos de guía, con la finalidad de llegar a diseñar un componente que adapte de una manera óptima la guía al espacio libre. También se han presentado dos familias de ‘tapers’ capaces de solventar este problema, acoplo entre modos de guía y modos del espacio libre, de una manera bastante eficiente.

Este trabajo ha sido financiado por el MEC y el BMBF dentro del programa Acciones Integradas Hispano Alemanas 1995.

5. REFERENCIAS

- [1] Del Río ,C., Gonzalo, R., Marín, M., Sorolla, M., Möbius, A. y Thumm M. “Estudio de la posibilidad de utilizar modos de orden superior en guías de onda cuasi-ópticas”, U.R.S.I. Valladolid, septiembre 95.
- [2] D.H. Martin and J.W. Bowen, “*Long-wave optics*”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 41, N° 10, octubre 1993, pp. 1676-1690.
- [3] Shapiro, M.A. and Vlasov, S.N. “Study of combined transmission line for high power wave generated by a gyrotron in the millimetre wavelength range”, Int. J. Electronics 1992, vol. 72, n° 5 y 6, pp. 1127-1133.