

CONVOLUCION OPTICA UTILIZANDO FOTODETECTORES

I.E. PAGANINI, G.A. PALAU, S. LEDESMA*

DEPARTAMENTO DE FISICA J.J. GIAMBIAGI, FCEYN, UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES.

Si se quiere evaluar el perfil de una distribución de intensidades con un fotodetector de área finita, se obtendrá la convolución entre la función que se quiere medir con la función que describe la respuesta del detector. Para reobtener la función original se debe deconvolucionar el resultado suponiendo conocida la respuesta del detector. Alternativamente, una aproximación a la función se obtiene diafragmando el área del detector con una pupila de ancho adecuado. Se presenta aquí una estimación del error que introducen pupilas de distintos anchos en la medición de un perfil típico gaussiano de intensidades. Por otra parte, aprovechando el potencial de los detectores para encontrar fácilmente la convolución óptica se muestran, a modo ilustrativo, las convoluciones de distintas funciones elementales como una función rectángulo y una función triángulo.

Palabras Claves: óptica, procesado óptico, fotodetectores

When evaluating an intensity profile by using a photodetector of finite area, the convolution between the function to be measured and the function which describes the photodetector response is obtained. To obtain the original function a deconvolution operation must be performed. Another approach to the problem is to use a diaphragm or pupil against the sensible area on the front of the photodetector. We present here an estimation of the error introduced for different sizes of the pupil by considering the measurement of a typical gaussian intensity profile. Otherwise, it is possible to take profit on the capability of the photodetectors to easily obtain the optical convolution. As example, we show the optical convolution for a rectangle and a triangle function.

Keywords: optics, optical processing, photodetectors

1. Introducción

La convolución es una operación matemática que vincula dos funciones. Desde un punto de vista cualitativo la convolución está asociada al área de superposición de dos funciones, pesada por el valor de las funciones. La operación esta dada por la siguiente fórmula:

$$g(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot h(x-x) dx \quad (1)$$

Por ejemplo, la convolución de dos funciones rectangulares da como resultado una función triangular cuyo ancho es la suma de los anchos de cada una de las funciones. Dado que los fotodetectores integran la intensidad emitida sobre su superficie activa el resultado de cualquier medición está asociado a la convolución entre la función de respuesta del detector y la distribución que se pretende medir. Para ilustrar los conceptos y sin pérdida de generalidad, consideraremos en este trabajo el caso unidimensional. Si la respuesta del detector es constante en el área, ésta se puede modelar como una función rectángulo. En la figura 1 se muestra a modo de ejemplo una función arbitraria medida, por un lado, con un detector puntual y por otro, con un detector de área finita. Tal como se muestra, una medición realizada con un detector no puntual deforma y suaviza la función a medir.

- correspondencia a: ledesma@df.uba.ar

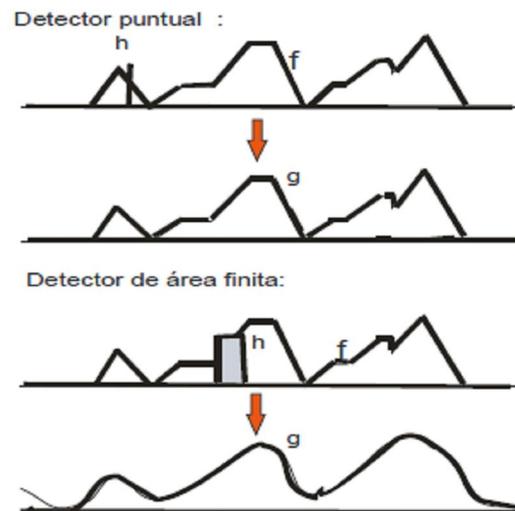


Figura 1. Ejemplo gráfico de una convolución genérica con un detector puntual y un detector de área finita..

Con el objetivo de evitar este efecto se debería deconvolucionar la respuesta final para obtener la distribución original o utilizar un diafragma que garantice un cierto margen de error. En este trabajo se presenta una estimación de los anchos de diafragma para funciones del tipo gaussianas, que podrían modelar una multiplicidad de fenómenos ópticos. Esto puede resultar muy interesante desde el punto de vista didáctico ya que muestra en forma sencilla y precisa como puede realizarse óptimamente una operación matemática relativamente complicada. Surge así de manera bastante natural que sería posible reemplazar en sistemas computacionales componentes electrónicos por componentes ópticos que son

altamente eficientes para realizar algunas operaciones muy específicas. Este tipo de sistemas ha sido ampliamente estudiado en el marco de investigación básica y aplicada. Sin el ánimo de realizar una recopilación bibliográfica completa el tema ha sido presentado en libros clásicos de óptica e ingeniería [1-3] como así también en numerosos artículos de investigación y enseñanza. Algunos de los trabajos pioneros se citan en las referencias [4-8].

En este trabajo se presentan los resultados de la convolución óptica para: dos rectángulos del mismo ancho, dos rectángulos de distinto ancho y un rectángulo convolucionado con un triángulo. Los resultados obtenidos muestran claramente una distribución con forma de triángulo, trapezoide y parábola respectivamente. Los rectángulos se realizaron utilizando máscaras binarias mientras que el triángulo se generó en una transparencia con gama de grises.

II. Dispositivo experimental

Se utilizó un láser He-Ne expandido por un objetivo de microscopio (40X). La luz emitida, que responde a un perfil Gaussiano, se colecta con un fotodetector ubicado a diferentes distancias de la fuente. El fotodetector que se utilizó es marca Vernier, modelo S1087/S11330 y tiene un área sensible de 2,8mm*2,4mm. Entre la fuente y el fotodetector se ubicó una máscara para diafragmar el área del detector. Las máscaras se diseñaron con forma rectangular y lo que se describe como ancho corresponde al lado menor del rectángulo, que se ubicó en dirección horizontal como esquematiza la Figura 2. El detector se montó sobre una plataforma de traslación que posee un tornillo micrométrico (con eje perpendicular a la dirección del haz y ubicando el detector con el lado de 2,8mm en posición horizontal).

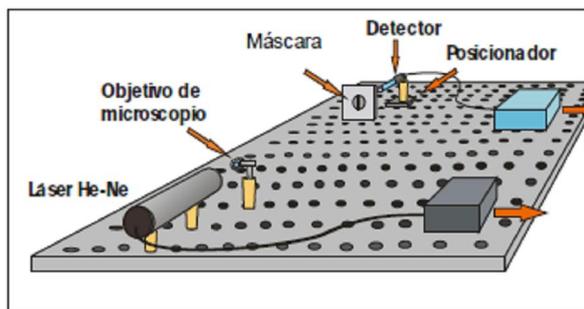


Figura 2. Esquema experimental.

Para modelar una función rectangular se alejó la fuente 81cm como para obtener un perfil de intensidades aproximadamente constante (dentro del error experimental) sobre el área del detector. Luego se colocaron dos máscaras binarias: una de ellas con una obturación de 2,8mm y otra con una obturación de 1,5mm. Para modelar la función triángulo se utilizó una transparencia de 2,8mm con una gama de grises lineal impresa a la que se obturó con una máscara binaria del mismo tamaño. En la Figura 3 se muestra el diseño impreso sobre la transparencia. En ella se imprimieron 25 franjas con distintos tonos de gris.

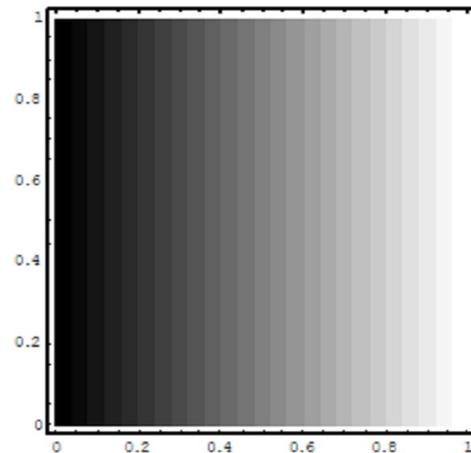


Figura 3. Máscara utilizada para modelar una función lineal, el tamaño real fue de 2,8mm.

Para modelar la función gaussiana se aprovechó el hecho de que el perfil del láser tiene de por sí esa forma por lo que en este caso no se realizó ninguna obturación y se trabajó relativamente cerca de la fuente (a una distancia de 45cm).

III. Resultados

Se muestran las funciones de convolución en función de la coordenada horizontal, X, en el plano del detector. Para el primer caso se obtuvo el perfil que se muestra en la Figura.4. Se trata en este caso de la convolución de dos funciones rectangulares de idéntico ancho, que como resultado da una función triángulo.

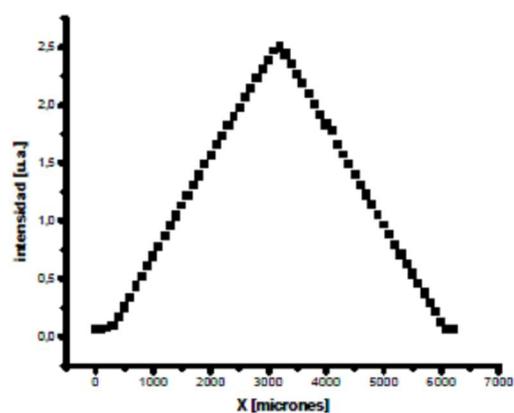


Figura 4. Convolución de dos funciones cuadradas de 2,8mm.

En la Figura 5 se presenta el resultado de la convolución entre el detector (de ancho 2,8 mm) y el diafragma de 1,5mm. Como las dos funciones rectángulo son de distinto ancho el resultado es una función tipo trapecio.

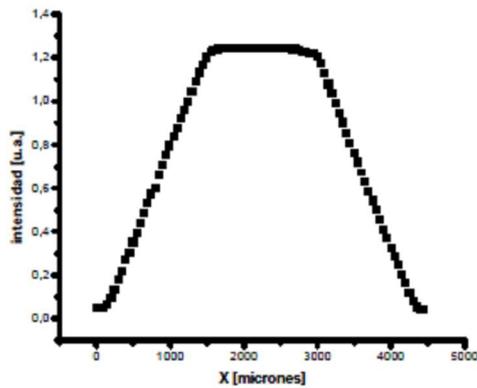


Figura 5. Convolución de una función cuadrada de 2,8mm (detector) contra una cuadrada de 1,5mm (intensidad)

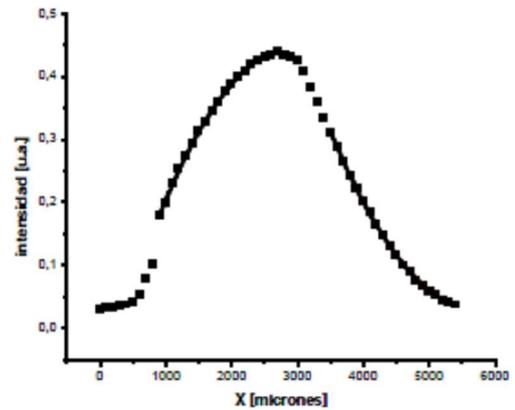


Figura 6. Convolución de una intensidad lineal contra un detector cuadrado, ambos de 2,8mm.

En la Figura 6 se muestran los resultados para un perfil Gaussiano. En el gráfico se muestran los puntos correspondientes a la medición así como los ajustes por dos parábolas: una a izquierda del máximo y otra a derecha del mismo. En la figura se puede apreciar un efecto de redondeo en la zona del máximo mientras que la teoría predice un cambio abrupto entre las dos parábolas donde la derivada no es continua. Además las zonas más alejadas del máximo presentan una leve asimetría. Estas desviaciones de lo predicho teóricamente podrían ser atribuidas a algunas no linealidades en el proceso de generación de la máscara. Se tomaron dos zonas una a izquierda y una a derecha del máximo, donde prevalecía el carácter cuadrático. Se ajustaron las mediciones utilizando el programa Origin y se obtuvo como resultado para los coeficientes cuadráticos $(-6.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-8}$ y $(5.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-8}$ respectivamente. Cabe notar que dado que las unidades de medición son arbitrarias a los efectos de reproducir la forma solo nos interesa la concavidad y por tanto solo presentamos aquí el coeficiente cuadrático. Se observa que la diferencia relativa entre los dos valores es del orden del 10 % lo cual es aceptable considerando que no se ha controlado la linealidad en proceso de registro.

En la Figura 7 se muestra el caso de la función Gaussiana medida con un detector de área finita y el correspondiente ajuste teórico en línea llena. Este caso es de particular interés porque permite dar una estimación del error que se comete al medir una función de distribución típica utilizando un detector de área finita. En efecto esta forma funcional podría modelar la distribución de intensidades resultantes de fenómenos que típicamente aparecen en laboratorios de enseñanza. En particular, en la Figura 7 se muestra que la convolución de una gaussiana con un rectángulo termina dando una función similar a una gaussiana.

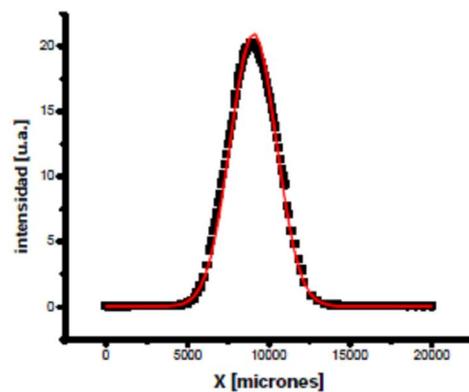


Figura 7. Función gaussiana medida con un detector cuadrado de 2,8mm de ancho, el χ^2 de la aproximación es de 0,046.

Por último, en la Figura 8, se presenta una curva donde se grafica el error que se comete al estimar el ancho de la función a medir utilizando el detector diafragmado en función del ancho de dicho diafragma. Aquí se aprecia que, por ejemplo, si se admite un error del orden del 10% el ancho del diafragma debe ser aproximadamente la mitad del ancho de la gaussiana.

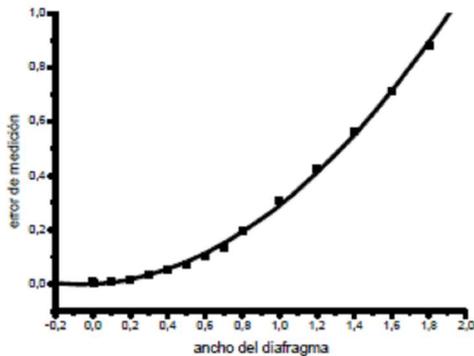


Figura 8. Gráfico del error cometido al estimar el ancho de la función Gaussiana por su convolución con el detector en función del ancho del mismo.

IV. Conclusiones

Mostramos que con un fotodetector de área relativamente grande (como los que comúnmente se utilizan en laboratorios de enseñanza) se puede obtener la convolución de funciones sencillas utilizando para ello distintas máscaras obturando el área de detección. Por otra parte, al utilizar este tipo de detectores es importante tener en cuenta que el resultado es una convolución entre la función a medir y la respuesta del detector.

Naturalmente lo más eficaz sería utilizar algún tipo de obturación que reduzca lo máximo posible el área activa, de esta forma se trataría de obtener algo cercano a una delta de Dirac. El problema es que a medida que se reduce el área activa también se reduce la intensidad de luz captada por el detector lo que eventualmente llevaría a mediciones con muy

baja relación señal-ruido. Eso indica que a la hora de seleccionar el ancho de obturación del detector existe una relación de compromiso entre la mínima intensidad que puede medirse sin ruido apreciable y el error que introduce el aproximar la convolución por la señal.

Agradecimientos

Este trabajo se financió a través de los siguientes subsidios: CONICET PIP 112, ANPCYT 2284, UBACYT X118.

Referencias

- 1- Eugene Hecht, Optics 4th Edition. Pearson Education Publishers, 2002
- 2- J.W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw Hill, 1968.
- 3- J.A. Jamieson (J.A. Jamieson, R.H. McFee, G.N. Plass, R.H.Grube, R.G. Richards, Infrared Physics and Engineering, Mc Graw-Hill, New York, 1963.
- 4- Bracewell R. N., Fourier Transform and Its Applications, II Ed., Mc-Graw HillBatacan, "Can physics make optics compute?" Computers in Physics 2, 14 , 1988.
- 5- HJ Caulfield, "Energetic advantage of analog over digital computing," Optical Computing 1989, Technical Digest Series, Vol. 9, Optical Society of America, 1989.
- 6- H. J. Caulfield, J. D. Brasher, and C. F. Hester, "Complexity Issues in Optical Computing," Optical Computing & Processing 1, 109-113 , 1991..
- 7- Jeffrey B. Norman, Phase conjugate Michelson interferometers for all optical image processing and computing, American Journal of Physics, Volume 60, Issue 3, pp. 212-220, 1992.
- 8 - Ravindra A. Athale and H. John Caulfield, Optical computing: part 1, Applied Optics, Vol. 25 Issue 10, pp.1541-1541, 1986.