

Processamento de imagens: Conceitos básicos relacionados com o fenômeno de difração e uso de um computador óptico

(Image processing: Basic concepts on the phenomenon of diffraction and the use of an optical computer)

N. Carlin ¹, E.M. Szanto, W.A. Seale, F.O. Jorge,
F.A. Souza, I.H. Bechtold e L.R. Gasques

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, SP, Brasil

Recebido em 24/06/04; Aceito em 30/08/04

O fenômeno de difração é utilizado em um experimento relacionado à óptica de Fourier com o objetivo de estudar conceitos básicos de processamento de imagens. Um computador óptico e programas de suporte são utilizados de maneira que os estudantes tenham contato com procedimentos de filtragem espacial e reconstrução da imagem processada.

Palavras-chave: difração, óptica de Fourier, computador óptico.

The diffraction phenomenon is used in an experiment related to Fourier Optics with the aim of studying the basic concepts of image processing. An optical computer and support softwares are used in such a way that the students make contact with the procedures for spatial filtering and the reconstruction of the image being processed.

Keywords: diffraction, Fourier optics, optical computer.

1. Introdução

O presente experimento é parte de uma série de atividades laboratoriais relacionadas a eletricidade, magnetismo e óptica, para estudantes de segundo e terceiro anos do curso de bacharelado no Instituto de Física e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, ambos situados na Universidade de São Paulo.

A filosofia adotada para o desenvolvimento de experimentos é a base inicial, mas seguida de um estudo formal dos fenômenos em questão juntamente com uma introdução de aplicações em uma abordagem mais quantitativa. A infraestrutura adequada foi preparada, com computadores acoplados em interfaces para aquisição de dados, câmeras CCD para gravação de imagens, bem como *softwares* para realização de cálculos, simulações e gráficos em grupos de dois a três estudantes.

Este experimento é realizado em três aulas com quatro horas de duração. A primeira aula é dedicada a um estudo formal básico da difração e fenômenos

de interferência, nos quais os estudantes têm oportunidade de medir as dimensões de fendas simples e duplas, aberturas circulares e fios de cabelo, bem como determinar as incertezas experimentais. Na segunda e na terceira aulas os conceitos básicos de processamento de imagens e a relação entre o padrão de difração e a transformada de Fourier (aplicadas em alguns objetos simples) são introduzidos. Os conceitos de frequência espacial e filtragem espacial também são introduzidos [1]. No final do experimento, espera-se que os estudantes tenham adquirido as habilidades necessárias para reconhecer padrões básicos de transformadas de Fourier para manipular filtros, com intuito de obter os efeitos desejados na imagem final. O aparato experimental é um computador óptico [1], que consiste de um laser de He-Ne e uma bancada óptica com lentes convergentes.

Iniciando-se com a observação do padrão de difração (transformada de Fourier) de vários objetos no plano focal da primeira lente, obstáculos de diferentes formas e tamanhos são utilizados como filtros

¹Enviar correspondência para N. Carlin. E-mail: nelson.carlin@dfn.if.usp.br.

para criar uma imagem, a qual pode ser observada e analisada. A aquisição das imagens é feita por uma câmera CCD acoplada ao computador e programas que processam imagens e simulam um computador óptico são utilizados para melhor compreensão e fixação dos conceitos estudados.

2. Base teórica

Existem alguns conceitos e nomenclaturas para o entendimento deste experimento. Estas informações são dadas qualitativamente, visto que uma dedução formal não é possível devido à limitação de tempo e bagagem matemática por parte dos estudantes. Entretanto, acreditamos que os estudantes são capazes de entender e explorar estes conceitos.

O primeiro conceito é que qualquer imagem (tela de TV, figura, projeção, etc...) pode ser descrita por uma distribuição de fluxo bidimensional, a qual pode ser descrita pelo valor da irradiância $I(y, z)$ que é uma função que possui um valor para cada ponto no espaço sobre o qual a imagem está distribuída. O conceito de irradiância é discutido no curso teórico e foi mencionado em outros experimentos. Então é feita uma analogia entre a informação óptica distribuída em uma região do espaço para um determinado instante de tempo e a variação temporal de informação elétrica (entre dois eletrodos) em um ponto fixo do espaço. Esta analogia é apresentada porque os estudantes aprenderam previamente que qualquer forma de voltagem variando no tempo pode ser descrita por uma soma de funções harmônicas usando análise de Fourier, o que também é ensinado no curso teórico.

Através disso, a função $I(y, z)$ pode ser escrita como uma soma de funções de irradiância $I(y)$ para cada valor de z , onde cada uma das funções $I(y)$ pode ser representada por um série de funções senoidais com amplitudes e frequências apropriadas, utilizando análise de Fourier. A amplitude é proporcional ao quadrado do campo elétrico ou intensidade de luz da imagem em cada ponto e a frequência varia espacialmente. Portanto, a função $I(y, z)$ que descreve a imagem pode ser escrita em termos de transformadas de Fourier bidimensionais com amplitudes e frequências espaciais específicas. Este tratamento é possível através da teoria escalar de difração óptica de Huygens-Fresnel [2], a qual utiliza uma representação simplificada da interação de ondas eletromagnéticas com a matéria. Maiores detalhes podem ser obtidos em vários livros-texto de óptica e uma discussão mais

extensiva sobre processamento de sinais ópticos é feita na Ref. [3].

Os conceitos básicos sobre o computador óptico também são introduzidos [4], onde a ferramenta computacional mais utilizada é a transformada de Fourier. Ópticamente, a transformada de Fourier da função imagem ($I(y, z)$) é equivalente ao padrão de difração do objeto no regime de Fraunhofer, o qual pode ser observado sobre um anteparo colocado à uma grande distância do objeto. Ao inserirmos uma lente convergente entre o objeto e o anteparo observamos o mesmo padrão de difração (transformada de Fourier) formado no plano focal da lente, e no anteparo a imagem invertida do objeto (ver Fig. 2(a)). A lente associa as frequências espaciais a pontos no plano focal da mesma. Portanto, quando um objeto bidimensional é posicionado em frente a uma lente convergente, a transformada de Fourier da estrutura espacial pode ser vista no plano focal atrás da lente, o que representa o “coração” do computador óptico e é utilizado diretamente no processamento da imagem. Computação óptica é caracterizada por:

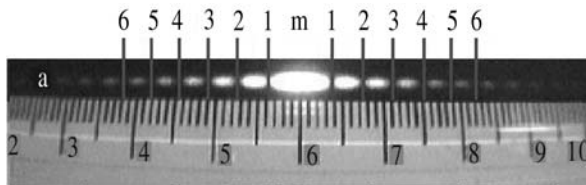
- gravação de informação em sinais ópticos;
- exploração apenas de propriedades ópticas para suprimir o desempenho de sistemas computacionais convencionais;
- uso de técnicas ópticas e/ou opto-eletrônicas que permitam o processamento de informação.

3. Procedimento experimental

Após uma breve explanação, por parte do professor, dos conceitos básicos necessários, o experimento é iniciado com a análise de padrões de difração oriundos de fendas simples e dupla, abertura circular e obstáculo como um fio de cabelo. Para isso, utiliza-se um laser de He-Ne com comprimento de onda $\lambda = 632,8$ nm e o padrão de difração/interferência é projetado próximo de uma régua presa sobre um anteparo. Dessa forma, com uma câmera CCD acoplada ao computador é possível capturar juntamente a imagem do padrão e da régua. Os alunos utilizam programas básicos de tratamento de imagens para medir as distâncias entre a franja central e os máximos e mínimos. Na Fig. 1(a) é mostrada uma imagem do padrão de difração gerado por uma fenda simples. Para este caso, os mínimos de difração de Fraunhofer (m) são dados por $m\lambda = a\sin\theta$, onde $\sin\theta = x/L$, sendo que x é a distância da franja central até o mínimo e L é a distância da fenda

até o anteparo. Dessa forma, é possível determinar a largura da fenda (a) com boa precisão, através do coeficiente angular da reta obtida graficando-se $\text{sen}\theta$ em função de m . Este procedimento está apresentado na Fig. 1(b), onde um grupo de estudantes obteve experimentalmente $a = 146,1 \pm 2,0 \mu\text{m}$ para um valor nominal de $a = 144 \pm 1 \mu\text{m}$.

a)



b)

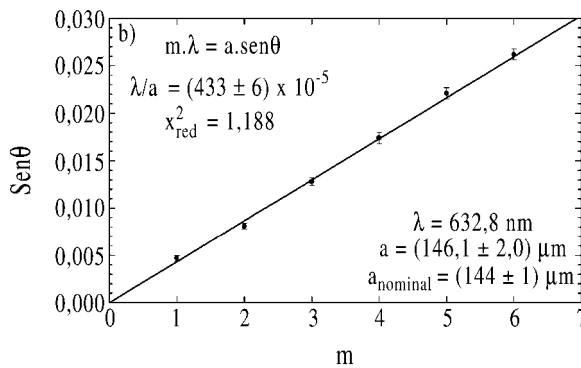


Figura 1 - (a) Imagem mostrando o padrão de difração de uma fenda simples. As posições dos mínimos de difração foram identificadas e marcadas pelos estudantes. (b) Gráfico do $\text{sen}\theta$ em função dos mínimos de difração (m), onde através do coeficiente angular obtém-se a largura da fenda.

Na segunda parte do experimento, também após breve explanação dos conceitos básicos por parte do professor, os estudantes passam a realizar simulações com o computador óptico [4]. O primeiro objeto utilizado no exercício é uma grade quadriculada, cujo padrão de difração é facilmente entendido pelos estudantes. Na Fig. 2(a) é apresentado um diagrama simulado com o computador óptico, onde observa-se o plano de Fourier (figura de difração gerada pelo objeto) e a imagem do objeto reconstruída após a segunda transformada de Fourier. Na Fig. 2(b) é possível observar a mesma imagem quando é adicionado um filtro que elimina as frequências espaciais mais altas, causando um arredondamento nas bordas da grade reconstruída, que em analogia ocorre quando é aplicado

um filtro “passa-baixas” em uma onda quadrada. A Fig. 2(c) mostra o resultado quando é aplicado um filtro capaz de remover as componentes horizontais da transformada de Fourier, onde através da imagem reconstruída do objeto percebe-se que a eliminação das componentes horizontais do padrão de difração resulta na obtenção apenas de linhas horizontais. Neste ponto, com o objetivo de fixação do conceito de frequências espaciais, é enfatizado o fato de que no caso de difração por fendas simples a frequência espacial é definida por $f = m/a = x/\lambda L$. De forma geral, esse conceito pode ser generalizado para casos mais complexos.

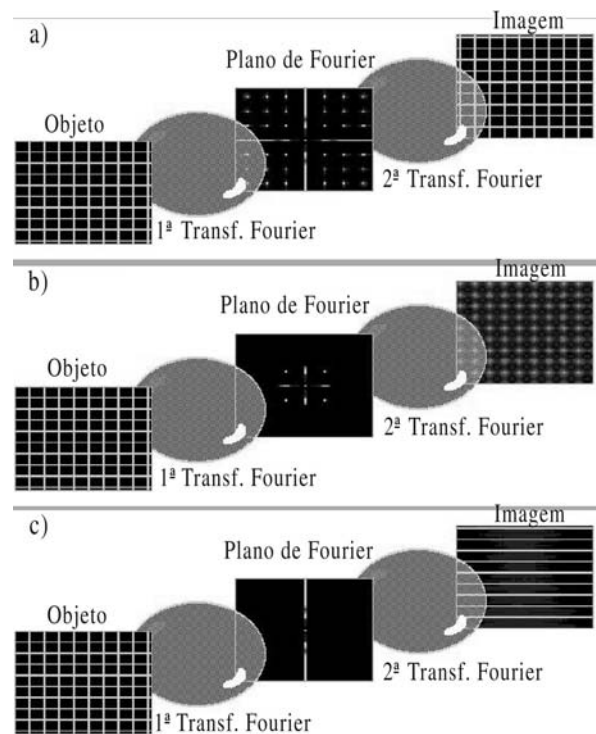


Figura 2 - Simulações de um computador óptico utilizando uma grade quadrada como objeto. (a) Diagrama mostrando o plano de Fourier e a imagem do objeto reconstruída após a segunda transformada de Fourier. (b) Mesmo de (a) com a adição de um filtro espacial que elimina as frequências mais altas. (c) Mesmo de (a) com a adição de um filtro espacial que remove as componentes horizontais da transformada de Fourier.

Após isso, os estudantes utilizam uma bancada óptica com uma grade quadriculada e um filtro similares às do exercício computacional, para observar experimentalmente as simulações realizadas. Inicialmente, é necessário alinhar cuidadosamente a bancada óptica com o uso de dois discos com pequenos orifícios centralizados por onde a luz do laser deve passar. Na Fig. 3(a) é mostrada uma fotografia da bancada óptica com os discos de alinhamento e na Fig. 3(b) apresenta-

se uma visão geral com a grade quadriculada (G) de 11 linhas/cm e as lentes incluídas. As duas lentes convergentes auxiliares L1 e L2, com distância focal de 1 cm e 20 cm, respectivamente, são utilizadas para aumentar o diâmetro do feixe de um fator 20, para que uma área maior do objeto possa ser iluminada. O objeto a ser estudado é posicionado depois do feixe expandido e antes da lente convergente L3 (com distância focal de 40 cm), a qual é utilizada para observar o padrão de difração (ou seja, realiza a transformada de Fourier do objeto), que se forma no foco de L3 onde está posicionado o anteparo (A). Quando o anteparo é removido desta posição e posto no final da bancada após a lente L4, observa-se a imagem da grade de 11 linhas/cm, conforme Fig. 4(a). A função de L4 é aproximar a imagem reconstruída do objeto, que representa a segunda transformada de Fourier. Colocando-se um filtro espacial constituído de uma fenda retangular vertical no foco de L3, claramente se observa que as componentes verticais na imagem reconstruída da grade foram eliminadas (Fig. 4(b)).

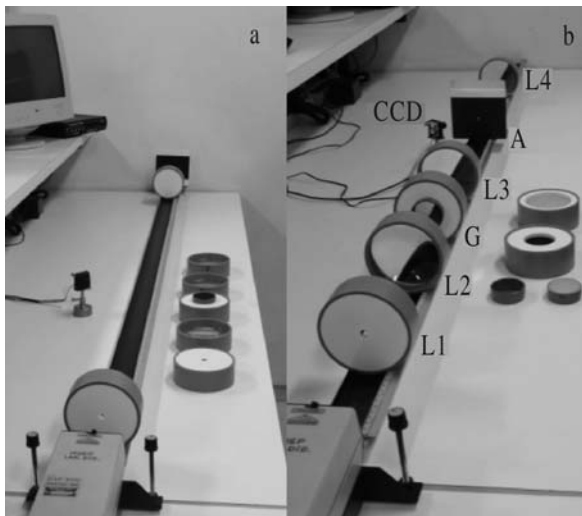


Figura 3 - (a) Imagem da bancada óptica com os discos de alinhamento. (b) Visão geral da bancada óptica montada com identificação dos elementos envolvidos, onde L1, L2, L3 e L4 são lentes convergentes com distâncias focais de 1 cm, 20 cm, 40 cm e 40 cm, respectivamente; G é a grade quadriculada e A o anteparo.

Durante o experimento, os estudantes investigam o padrão de interferência de outras grades, cujas imagens podem ser captadas com a câmera CCD para análise posterior. Finalmente, os estudantes devem propor um ou dois objetos com diferentes filtros para testar a ca-

pacidade de reconhecer os padrões de difração.

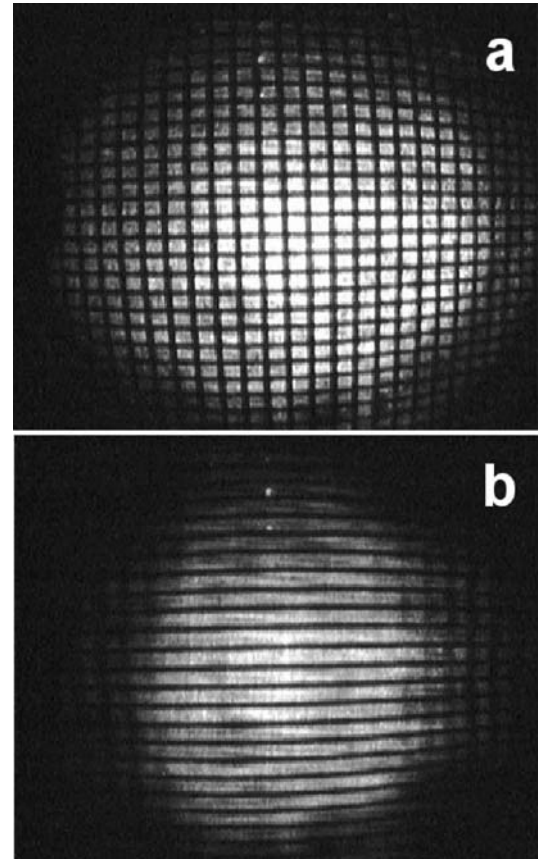


Figura 4 - (a) Imagem experimental reconstruída de uma grade quadriculada de 11 linhas/cm. (b) O mesmo de (a) após aplicação de um filtro espacial constituído de uma fenda vertical no plano focal da lente L3, onde observa-se que as componentes verticais da grade foram eliminadas.

Na segunda aula correspondente ao processamento de imagens, os estudantes utilizam um programa [5] que permite analisar imagens através do cálculo da transformada de Fourier em conjunto com a bancada óptica. Existem dois objetivos específicos:

1) gravação da imagem de objetos postos na bancada óptica e subsequente cálculo da transformada de Fourier com o programa. A transformada de Fourier obtida pode ser analisada e comparada com o padrão observado no plano focal da lente L3. Este procedimento foi realizado para dois objetos, um orifício quadrado na Fig. 5(a) e um orifício triangular na Fig. 5(b), onde o lado esquerdo representa o padrão de difração óptico e o direito a transformada de Fourier da imagem do objeto obtido com o programa. Nesta figura percebe-se uma correlação perfeita entre experimento e cálculo numérico;

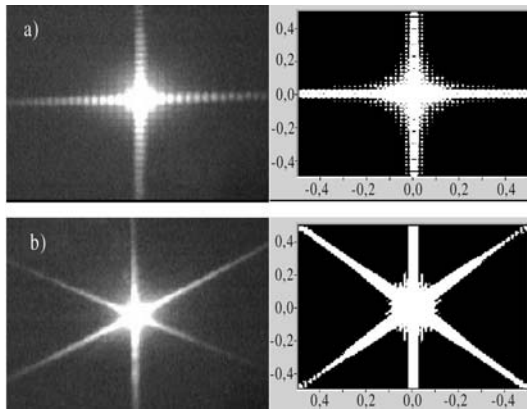


Figura 5 - Comparação entre o padrão de difração no plano focal da lente obtido experimentalmente (imagem da esquerda) com a transformada de Fourier da imagem do objeto obtida através do programa (imagem da direita), para (a) um orifício quadrado e (b) um orifício triangular.

2) gravação de imagens desenhadas (que não foram obtidas da bancada óptica) e cálculo da transformada de Fourier para praticar o reconhecimento de padrões de difração. Na Fig. 6 apresentamos a imagem de uma estrela desenhada por um grupo de estudantes e sua respectiva transformada de Fourier obtida a partir do programa, onde os padrões relacionados com as linhas podem ser facilmente identificados. Nesta figura é possível discriminar as linhas diagonais e vertical que pertencem à estrela composta por dois triângulos invertidos (similar ao resultado da Fig. 5(b) para um orifício triangular) dos anéis circulares provenientes da circunferência exterior à estrela.

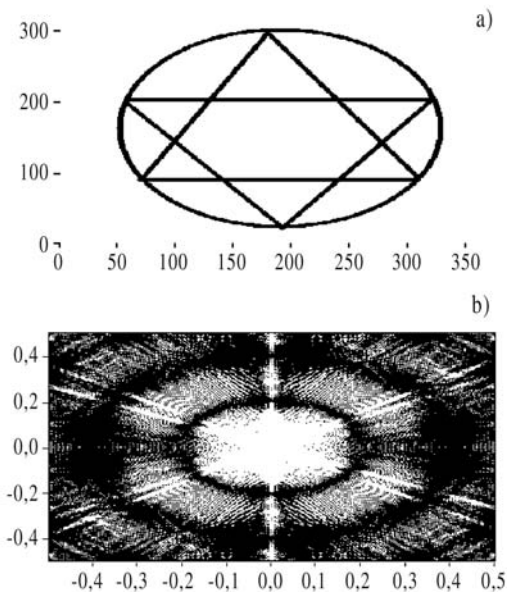


Figura 6 - (a) Imagem de uma estrela dentro de um círculo desenhada por um grupo de estudantes. (b) transformada de Fourier correspondente.

Através dos estudos realizados na segunda aula os estudantes perceberam que a identificação de padrões de difração é facilitada para objetos que apresentam simetrias circulares ou de seções retas, como apresentado nas Figs. 5 e 6. Entretanto, a imagem de qualquer objeto pode ser reconstruída a partir do padrão da transformada de Fourier deste objeto, por mais complicado que seja.

4. Comentários finais

O objetivo do experimento apresentado é o estudo dos fenômenos de difração e interferência da luz, bem como uma aplicação prática. O experimento é realizado em três períodos de quatro horas cada, iniciando com um estudo mais formal do fenômeno de difração. Nesta parte são apresentados os conceitos básicos e os estudantes realizam medidas das dimensões de fendas simples e dupla, orifício circular e fio de cabelo, incluindo medidas de incerteza. Na segunda parte é feita uma abordagem mais qualitativa, onde os conceitos básicos de processamento de imagens são diretamente relacionados com aspectos teóricos. Com este experimento, é possível os estudantes observarem na prática o efeito de filtragem espacial de frequências e entenderem a relação de padrões de difração com a análise de Fourier.

A filosofia descrita é aplicada em experimentos para estudantes de segundo e terceiro anos do Instituto de Física e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Os experimentos são relacionados a eletricidade, magnetismo e óptica. O contato dos estudantes com equipamentos e técnicas experimentais modernas, o aprendizado de grandezas e fenômenos e sua aplicação em atividades do cotidiano, aumentam significativamente seu conhecimento, motivação e criatividade.

Referências

- [1] E. Hecht, *Optics* (Adison Wesley Longman, Inc. editors, 1998), 3a ed.
- [2] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (John Wiley & Sons, Inc., 1962).
- [3] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (MacGraw-Hill, 1968).
- [4] *Program Wave Optics on the Computer* (Moscow Institute of Physics and Technology, Russian Physical Society, Russia).
- [5] Programa *DADISP 2002*, DSP Development Corporation, USA.