

ELEMENTO ÓPTICO DIFRATIVO DE LUZ BRANCA GERADO POR COMPUTADOR

Cristhiane Gonçalves

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
mestre em Engenharia Elétrica, na área
de Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz
Gonçalves Neto

São Carlos

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Dedicatória

“À minha mãe, minha primeira e grande professora”.

Agradecimentos

Ao professor Dr. Luiz Gonçalves Neto, pela orientação e amizade durante a elaboração deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP pela colaboração e amizade.

Ao Dr. José Carlos Pizolato Junior, pelo apoio e auxílio durante a execução deste trabalho.

A meus pais, José Carlos e Rosely, aos quais agradeço pela compreensão, paciência e apoio oferecido para a conclusão de meus estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
Capítulo 1	1
1-Introdução	1
Capítulo 2	5
2-ÓPTICA DIFRATIVA	5
Capítulo 3	11
3- HOLOGRAFIA	11
Capítulo 4	18
4-COERÊNCIA DE UMA FONTE LUMINOSA	18
4.1-O EXPERIMENTO DE YOUNG	18
Capítulo 5	24
5-O ELEMENTO DE LUZ BRANCA	24
5.1-A TÉCNICA DE <i>HALFTONING</i>	24
5.2-PROCESSO DE CODIFICAÇÃO DO ELEMENTO DE LUZ BRANCA	26
5.3-SIMULAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO ELEMENTO DE LUZ BRANCA	27
5.4- SIMULAÇÃO DO EOD DE LUZ BRANCA	32
5.5-CONSTRUÇÃO DO ELEMENTO DE LUZ BRANCA	37
Capítulo 6	41

6-RESULTADOS EXPERIMENTAIS	41
6.1- MEDIDA DO CONTRASTE	41
Capítulo 7	53
7-CONCLUSÕES	53
Capítulo 8	55
8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
Apêndice A	60
A-TRANSFORMADA DE FOURIER	60
B-EQUAÇÃO DE HELMHOLTZ	60
Apêndice B	61
RESPOSTA IMPULSIONAL, FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA, E SISTEMAS LINEARES INVARIANTES.....	61
Apêndice C	64
AMOSTRAGEM NO PLANO DE FREQUÊNCIAS	64
Anexo A	67
Anexo B	68

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1- Princípio de Huygens-Fresnel [33], onde cada ponto de uma frente de onda incidente age como uma nova fonte de onda esférica, cuja interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica por sua vez nos dá uma nova frente de onda. 5
- FIGURA 2-Obtenção de uma distribuição de luz desejada utilizando-se um Elemento Óptico Difractivo para a modulação de uma frente de luz incidente. 6
- FIGURA 3- Os *EODs* podem ser classificados em três grupos [34]: (a) espaço-livre para espaço-livre; (b) onda-guiada para onda-guiada; e (c) onda-guiada para espaço-livre (ou espaço-livre para onda-guiada). 7
- FIGURA 4- (a)Holograma rainbow convencional, (b) cédula monetária de 20 reais, emitida pelo Banco do Brasil, utilizando um holograma *rainbow* como elemento de identificação; e (c) detalhe do holograma impresso na cédula de 20 reais.No holograma, são vistas duas imagens do mico-leão-dourado e da inscrição “20”. 8
- FIGURA 5- Comparação entre a Holografia Clássica e a Holografia Computacional. 11
- FIGURA 6- Reconstrução óptica de um EOD iluminado por uma onda plana monocromática coerente. (A) Reconstrução de um holograma de Fourier (difração de Fraunhofer) utilizando-se uma lente de Fourier; (B) Reconstrução de um holograma de Fresnel (difração de Fresnel), obtido pela propagação da luz de $g(x',y')$ pela distância d [20]. 13

FIGURA 7-Diagrama esquemático do método iterativo da transformada de <i>Fourier</i> (<i>Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA</i>) para o cálculos de hologramas em regime de modulação de fase ou de amplitude, com a reconstrução em intensidade [42].	14
FIGURA 8-Janela de reconstrução, localizada no centro do plano de reconstrução, utilizada para melhorar a reconstrução do holograma. Fora da região g_r de dimensões $A \times B$, a fase e a amplitude da distribuição $g(x,y)$ pode variar livremente [42].	16
FIGURA 9-Difração da luz por duas fendas, produzindo máximos e mínimos de intensidade luminosa, observados como franjas de interferência claras e escuras.	18
FIGURA 10-Diferença de caminhos entre dois feixes de luz que incidem na parte inferior e superior da fenda, em destaque.	19
FIGURA 11-Relação entre a distância entre dois pontos espacialmente coerentes emergindo de uma fonte luminosa de diâmetro ρ , de comprimento de onda $\bar{\lambda}$, a uma distância R de propagação.	21
FIGURA 12(a)- Imagem original de Lenna 128x128 pixels;(b) Imagem obtida a partir da imagem original,	24
FIGURA 13- Técnica de <i>halftoning</i> aplicada a uma imagem com 17 níveis de cinza.	25
FIGURA 14-Projeto do EOD para uma informação binária	26
FIGURA 15-Diagrama do algoritmo para o cálculo da propagação da luz modulada pelos	27
FIGURA 16-(a)pixel tipo I e (b)sua respectiva intensidade de propagação.	28
FIGURA 17- (a)Pixel tipo II e (b) intensidade de propagação do pixel tipo II.	28
FIGURA 18-(a) Modelo proposto para o pixel tipo I ; (b) sua representação como função $rect(x)$ e (c) sua transformada de <i>Fourier</i> , $\sin c(s)$	29

-
- FIGURA 19- Modelo para o pixel tipo II e (b) sua representação como função $-\frac{1}{2}\prod\left(x+\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}\prod\left(x-\frac{1}{2}\right)$; e (c) sua transformada de *Fourier*, $-i \sin c(s) \sin c(\pi s)$ 30
- FIGURA 20- Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da resposta impulsional dos pixels tipo I. 32
- FIGURA 21- Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da resposta impulsional dos pixels tipo II. 32
- FIGURA 22- Reconstrução simulada para o holograma gerado a partir da figura Lenna para uma distância do plano do holograma ao plano de reconstrução de (a) 0 cm e (b) 2 cm. 33
- FIGURA 23- Figuras utilizadas no algoritmo para gerar o holograma de luz branca: (a) Lenna; (b) tigre, (c) periquito; (d) gato. 34
- FIGURA 24- Reconstrução simulada para o holograma gerado a partir das figuras (a) Lenna, (b) tigre, (c) periquito e (d) gato, para uma distância do plano do holograma ao plano de reconstrução de 2 cm. Estas figuras são as mesmas utilizadas para a fabricação do elemento de luz branca. 35
- FIGURA 25- Visão esquemática da seqüência do processo de fabricação do EOD no modo transmissão. Devido ao baixo custo de fabricação foi utilizada uma máscara que consiste de um filme transparente tipo fotolito. O padrão a ser transferido foi impresso no filme transparente por uma plotter com máxima definição 15 μ m (AGFA AVANTRA 30e 2400 dpi). Nenhuma máscara gerada por feixe de elétrons é necessária. 38

FIGURA 26- Montagem do holograma de luz branca realizada no laboratório de óptica do departamento de engenharia elétrica da EESC-USP. No plano posterior, observa-se o anteparo, onde a imagem é projetada.	39
FIGURA 27- Lâmpada dicróica halógena 12V, 50W, $\bar{\lambda}=633$ nm, da marca OSRAM, utilizada para obtenção da reconstrução óptica do elemento de luz branca.	41
FIGURA 28- Montagem experimental para cálculo do grau de coerência realizada através de três metodologias: difração por uma fenda dupla, difração através de uma grade de difração e difração através do elemento de luz branca.	42
FIGURA 29- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “Lenna” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.	47
FIGURA 30- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “gato” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.	48
FIGURA 31- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “tigre” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.	49
FIGURA 32- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “periquito” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.	50

LISTA DE TABELAS

TABELA I. Contrastes determinados através da difração por uma grade de difração obtido com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul43

TABELA II. Contrastes determinados através da difração por uma fenda dupla obtido com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....44

TABELA III.(a) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca Lenna obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....44

TABELA III.(b) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca gato obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....45

TABELA III.(c) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca tigre obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....45

TABELA III.(d) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca periquito obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

EOD – Elemento Óptico Difractivo

FFT – Fast Fourier Transform

FT- Fourier Transform

IFTA – Iterative Fourier Transform Algorithm

USP-Universidade de São Paulo

POLI- Escola Politécnica da USP

RESUMO

Palavras-chave: hologramas gerados por computador, luz branca, halftoning.

Hologramas podem ser produzidos utilizando-se técnicas tradicionais de holografia ou podem ser gerados também por computador, conhecidos como hologramas gerados por computador (HGCs). A maioria destes hologramas opera usando luz monocromática. Por outro lado, os hologramas podem também operar com luz branca. Estes elementos de luz branca são usados em diversas aplicações, como segurança, para verificar a autenticidade dos cartões de crédito e outros documentos, porque seus processos de fabricação são difíceis e caros de serem reproduzidos. Entretanto, os hologramas de luz branca convencionais operam baseados na reflexão da luz, e apresentam alguns efeitos indesejáveis, como distorções cromáticas, como o efeito *rainbow*.

Neste trabalho foi proposto um elemento óptico difrativo de luz branca gerado por computador. O elemento é calculado baseado na técnica de halftoning e na coerência espacial parcial de uma fonte de luz branca estendida. Os elementos da fase são produzidos através de técnicas de fabricação bem estabelecidas de circuitos integrados, e as simulações óticas são apresentadas. Não há necessidade de métodos iterativos.

Os resultados das reconstruções óticas e simuladas deste elemento de luz branca são muito semelhantes e produzem imagens nítidas, não sendo observadas distorções cromáticas.

O elemento de luz branca ainda não foi descrito na literatura, e algumas de suas aplicações podem ser um correlator óptico ou arte holográfica.

Este trabalho foi realizado no laboratório de óptica do departamento da engenharia elétrica do EESC, e financiado por CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

ABSTRACT

Keywords: Computer –generated holograms, white light, halftoning.

Holograms can be produced using traditional holography techniques or may be also generated by computer, which are known as CGHs(Computer-generated holograms). Most of these holograms operate using monochromatic light. On the other hand, holograms can also operate with white light. These white light holograms are used in several applications, such as security, to verify the authenticity of credit cards and other documents, because their fabrication processes are difficult to reproduce and are expensive. However, conventional white light holograms operate based on reflection of light, and present some undesirable effects, like chromatic distortions, such as rainbow effect.

In this work it was proposed a computer-generated phase optical diffractive element designed to operate under white light illumination. The element is calculated based on the halftoning technique and in the partial spatial coherence of a white light extended source. Phase elements are manufactured using well-established integrated circuits fabrication techniques and optical simulations are shown. No iterative methods are necessary.

Simulated and optical reconstruction results are very similar and produce good clear images, and no chromatic distortions are observed.

The white light element was not yet described in literature, and some of its applications may be an optical correlator or holographic art.

This work was carried out at the laboratory of optics of the department of electrical engineering of the EESC, and supported by CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Capítulo 1

1-Introdução

A técnica de holografia clássica foi proposta por Gabor [1], em 1948, ao observar que uma frente de onda de referência em coerência com a luz difratada ou espalhada por um objeto permite que as informações de amplitude e de fase das ondas difratadas sejam gravadas. Esta mesma técnica foi utilizada por Denisyuk [2] e Benton [3] utilizando iluminação não-coerente na fabricação de hologramas. Denisyuk combinou as técnicas de holografia convencional de Gabor e de fotografia colorida para a produção de hologramas que poderiam ser vistos através de uma iluminação não-coerente de um bulbo incandescente. Já os hologramas de Benton, também conhecidos como hologramas *rainbow*, empregavam a iluminação não-coerente de uma luz branca para visualizar o holograma. Estes hologramas minimizavam o efeito de distorções cromáticas, porém ocorria perda de informação gravada em uma dimensão.

Após a descoberta do laser nos anos 60, trabalhos de holografia convencional que utilizavam como fonte de iluminação coerente de um laser foram divulgados [4-6]. Além dos métodos holográficos convencionais, vários outros foram propostos para o cálculo de hologramas gerados por computador (HGCs), entre eles o algoritmo iterativo da transformada de Fourier (*Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA*), introduzido na holografia digital por Gerchberg & Saxton [7] e por Hirsh et al. [8]; o desvio de fase de Brown & Lohmann [9-11]; o holograma binário sintético em amplitude de Lee [12]; a pesquisa binária direta, de Seldowitz et al. [13]; o holograma com modulação de densidade de pulso de Hanck & Bryngdahl [14] e a quantização iterativa de hologramas de amplitude digital de Wyrowski [15].

O *IFTA* foi posteriormente modificado por Wyrowski [15-17], que implementou neste algoritmo o conceito de liberdade de fase durante as iterações para o cálculo de hologramas com

modulação em níveis discretos. Infelizmente, este método numérico requer várias iterações, além de geralmente introduzir ruído do tipo *speckle* no plano de reconstrução [18,19].

Neto et al. [20] propuseram a implementação de hologramas digitais de modulação completa de amplitude e fase. Cada pixel do elemento é composto por duas regiões de relevo de fase que podem assumir valores de fase 0 e $\pi/2$, $\pi/2$ e π , π e $3\pi/2$, ou $3\pi/2$ e 0 . A modulação de amplitude é obtida removendo pequenas partes de uma camada de alumínio depositada sobre o relevo de fase de cada pixel.

Hologramas gerados por computador obtidos por *halftoning* [21] foram investigados por Ishioka [22], Caulfield [23] e Pinhasi [24], porém esta técnica foi utilizada para gerar uma máscara utilizada para produção de hologramas operando em iluminação monocromática coerente. Recentemente, Pizolato et al. [25] utilizaram a técnica de *halftoning* para projetar hologramas de fase binários que funcionam com iluminação coerente. Cada pixel é constituído por duas regiões de relevo de fase que podem assumir valores de fase 0 e π . O projeto deste EOD dispensa cálculos iterativos computacionais e a fabricação do mesmo é realizada utilizando técnicas tradicionais de circuitos integrados.

A maioria dos trabalhos recentes que abordam holografia computacional utilizando luz branca descreve hologramas *rainbow* reconstruídos a partir da superposição de imagens de projeção de três ou mais hologramas produzidos em três cores diferentes [26,27]. Neste trabalho é proposto um EOD gerado por computador baseado na técnica de *halftoning* que utiliza iluminação não-coerente [28,29](vide anexos A e B). Este EOD apresenta as seguintes vantagens em relação aos trabalhos até então publicados: o método para a geração do EOD não utiliza processos computacionais iterativos e as imagens reproduzidas não apresentam distorções cromáticas visíveis ao olho humano. Estes EODs correspondem a elementos de fase binários e são produzidos através de técnicas de fabricação bem estabelecidas de circuitos integrados. O

EOD de luz branca aqui proposto pode ser empregado em processamento óptico, sistemas de segurança para verificação da autenticidade de documentos, cartões de crédito e processos de fabricação de produtos.

A apresentação do trabalho está organizada conforme a seqüência. No Capítulo 2 são explicados alguns conceitos sobre elementos ópticos difrativos (EOD) e difração. O Capítulo 3 aborda os hologramas clássicos e digitais, que são um tipo de EOD. No Capítulo 4 são abordados os tópicos de coerência de uma fonte de onda luminosa. O Capítulo 5 apresenta o EOD de luz branca abordando projeto, funcionamento e construção. No Capítulo 6 são apresentados resultados experimentais da reconstrução óptica obtida com o EOD de luz branca proposto. Conclusões e considerações sobre o trabalho são realizadas no Capítulo 7. Referências bibliográficas são apontadas no Capítulo 8.

Capítulo 2

Introdução

O EOD apresentado neste trabalho funciona segundo os princípios da óptica difrativa. Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais de difração e óptica difrativa.

2-Óptica difrativa

A óptica difrativa ou óptica binária [30] é uma nova tecnologia que elimina quase todas as etapas dos métodos tradicionais (abrasão e polimento) para a fabricação de elementos ópticos. Por operarem segundo os princípios da difração, estes elementos ópticos são denominados Elementos Ópticos Difrativos (EOD) [31].

Elementos ópticos difrativos são estruturas que difratam a luz, gerando uma distribuição de luz desejada. Segundo o princípio de Huygens-Fresnel [32,33], ilustrado na Figura 1, quando um elemento óptico difrativo é iluminado por uma frente de onda. Cada ponto da nova frente de onda Σ que emerge da superfície do elemento age como uma fonte de luz pontual, gerando ondas esféricas de raio r' . A interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica gera uma nova frente de onda Σ' .

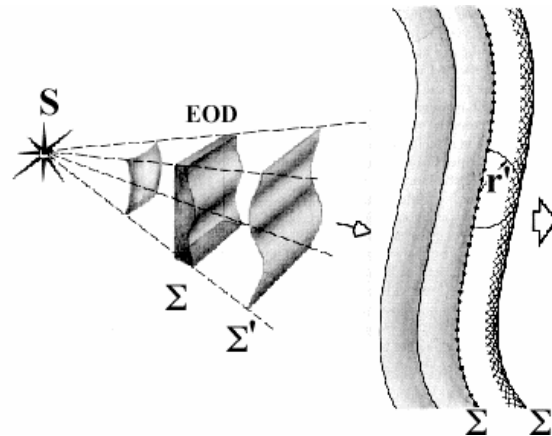


FIGURA 1- Princípio de Huygens-Fresnel [33], onde cada ponto de uma frente de onda incidente age como uma nova fonte de onda esférica, cuja interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica por sua vez nos dá uma nova frente de onda.

Hologramas gerados por computador, redes de difração e microlentes de Fresnel são alguns exemplos de EODs que podem ser obtidos por intermédio de relevos gravados na superfície de um material transparente ou reflexivo, ou por padrões gravados em filmes fotográficos. Estes relevos ou padrões impõem uma modulação espacial na fase da luz incidente [30] que, após sofrer o efeito da difração, resulta em uma distribuição luminosa desejada em algum plano próximo do elemento difrativo, como é ilustrado na Figura 2. Geralmente, por ser necessário apenas introduzir um pequeno atraso na fase ou o bloqueio em cada ponto da frente de onda incidente, os EODs podem ser mais finos e leves que os elementos ópticos convencionais (refrativos).

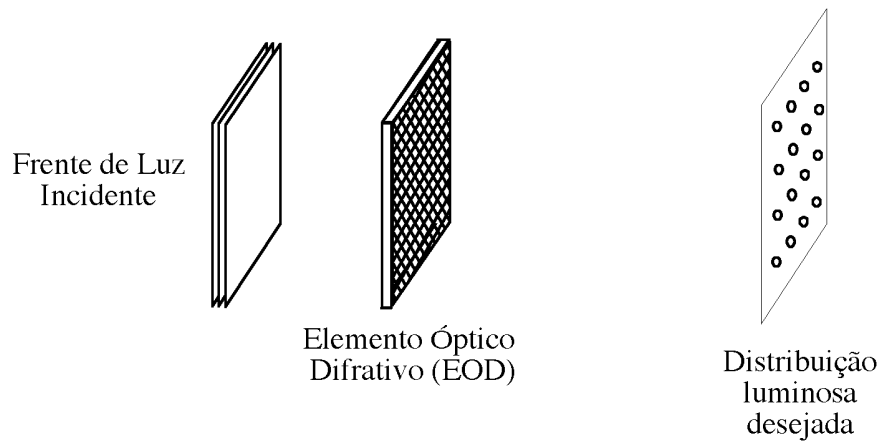


FIGURA 2-Obtenção de uma distribuição de luz desejada utilizando-se um Elemento Óptico Difractivo para a modulação de uma frente de luz incidente.

Os EODs são projetados com base nas propriedades de difração de sua superfície, geralmente uma interface micro-estruturada com detalhes geométricos próximos ao comprimento de onda da luz. Como geralmente é utilizada a teoria escalar da difração [18] para o cálculo destes elementos, as dimensões das micro-estruturas abordadas são maiores que 10λ , onde λ é o comprimento de onda da luz incidente. Várias distribuições ópticas podem ser “gravadas” em um EOD modificando-se a geometria das microestruturas, que podem ser fabricadas utilizando as técnicas inicialmente desenvolvidas para a fabricação de circuitos integrados eletrônicos: litografia óptica, corrosão por plasma, deposição de filmes finos, corrosão úmida e litografia por feixe de elétrons. Estas técnicas podem gravar diretamente na superfície de qualquer material óptico as mais variadas geometrias, em dimensões extremamente reduzidas. Podem-se produzir dispositivos de alta qualidade em série, com propriedades ópticas complexas e impossíveis de serem implementadas com a tecnologia tradicional. A geometria dos elementos é obtida por cálculo numérico, considerando a difração da luz, as características ópticas do material utilizado (óxido de silício, nitreto de silício, *DLC*, etc.) e das micro-estruturas a serem projetadas.

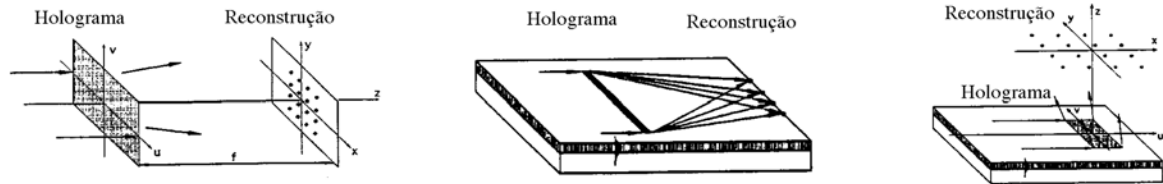


FIGURA 3- Os *EODs* podem ser classificados em três grupos [34]: (a) espaço-livre para espaço-livre; (b) onda-guiada para onda-guiada; e (c) onda-guiada para espaço-livre (ou espaço-livre para onda-guiada).

De acordo com as características de entrada e saída das ondas, os *EODs* podem ser classificados em três grupos [34]: (1) espaço-livre para espaço-livre; (2) onda-guiada para onda guiada; e (3) onda-guiada para espaço-livre (ou espaço-livre para onda-guiada). Exemplos destes três tipos de *EODs* são ilustrados com hologramas na Figura 3. Os hologramas do tipo (1) são chamados de espaço-livre para espaço-livre pois nenhuma onda guiada está envolvida. Por outro lado, guias de onda ópticos estão envolvidos nos grupos (2) e (3).

Entre as inúmeras aplicações desta tecnologia podem-se citar: fabricação de microlentes para sistemas de visão artificial [35], implementação de multiplexadores e demultiplexadores de luz [36], filtros holográficos para aplicações em reconhecimento de objetos e alvos [37,38], conexões ópticas e distribuição de sinais de relógio em micro-circuitos [38], correção da aberração cromática em sistemas ópticos [30,35], modulação e correção da luz laser; redes de difração; acoplamento entre laser e fibras ópticas [34] acoplamento entre fibra óptica e sensores [34], guias de onda [34,39], discos holográficos para a armazenagem de informações [31].

Dentre os *EODs* estão os hologramas *rainbow* [40] que podem ser replicados em larga escala utilizando técnica de *embossing* de baixo custo. Com esta metodologia, os hologramas podem ser replicados a um custo muito baixo. O primeiro passo da técnica é gravar um

holograma com um objeto de interesse, em fotorresiste. Posteriormente, um laser é utilizado em processo de gravação, e o fotorresiste é exposto, produzindo um relevo que é coberto com um spray de prata. Esta máscara é imersa em um tanque com um eletrodo de níquel e uma corrente passa através do mesmo, depositando uma fina camada de níquel sobre a mesma, através de um processo de eletrodeposição. Esta camada de níquel é separada do fotorresiste e este relevo metálico criado é utilizado como uma espécie de carimbo no processo de reprodução.

Entre os processos de *embossing* muito conhecidos está o *hot-embossing*. Por este motivo, estes EODs foram rapidamente difundidos em aplicações de segurança na forma de selos holográficos para a verificação da autenticidade de produtos como cartões de créditos, livros, revistas, cédulas monetárias, CDs e DVDs. Na Figura 4 são ilustrados alguns exemplos de hologramas *rainbow* utilizados na verificação da autenticidade de cartões de crédito e cédulas monetárias.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4- (a)Holograma rainbow convencional, (b) cédula monetária de 20 reais, emitida pelo Banco do Brasil, utilizando um holograma *rainbow* como elemento de identificação; e (c) detalhe do holograma impresso na cédula de 20 reais.No holograma, são vistas duas imagens do mico-leão-dourado e da inscrição “20”.

Neste trabalho, os esforços foram centrados para o domínio da teoria, projeto e fabricação de EODs envolvidos no grupo (1): hologramas gerados por computador do tipo espaço-livre para espaço-livre, como ilustrado pela Figura 3(a) submetidos a iluminação não-coerente (luz branca por exemplo), com baixa distorção cromática e baixo custo de produção.

Capítulo 3

Introdução

O EOD de luz branca abordado neste trabalho é um elemento óptico difrativo gerado por computador, que funciona sob iluminação parcialmente coerente em uma região localizada. Neste capítulo são apresentadas as diferenças básicas entre holografia clássica e digital. Atenção especial será dedicada aos hologramas gerados por computador.

3- Holografia

Na Holografia Clássica, as ondas de uma frente de luz são "armazenadas" em um holograma utilizando a interferência como processo de gravação. Na holografia computacional, as ondas são "armazenadas sinteticamente" no holograma utilizando cálculos computacionais. Em ambos os processos, a reconstrução óptica das ondas gravadas é obtida pela difração da luz. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos indicando a diferença entre os processos [41].

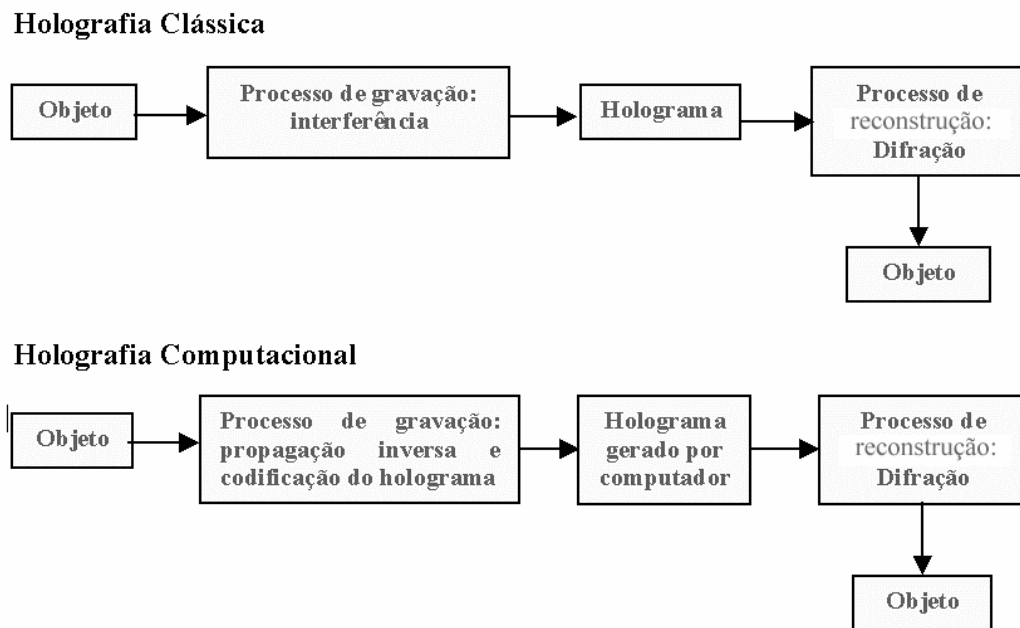


FIGURA 5- Comparação entre a Holografia Clássica e a Holografia Computacional.

Os hologramas gerados por computador são projetados por cálculo computacional considerando a difração escalar da luz [18], as características ópticas do meio em que o holograma será fabricado, que poderá ser uma distribuição de fase ou amplitude, e as características da distribuição de luz no plano de reconstrução do holograma.

É possível escolher entre o projeto de um holograma de *Fourier* ou de *Fresnel*. Um holograma de *Fourier* utiliza a difração de *Fraunhofer* para o cálculo da propagação da luz do plano do holograma ao plano de reconstrução, que também é implementada opticamente utilizando-se uma lente de Fourier para se obter a reconstrução óptica, como mostrado na Figura 6(a). Um holograma de *Fresnel* utiliza a difração de *Fresnel* ou a filtragem espacial para o cálculo da propagação da luz no espaço livre entre o plano do holograma ao plano de reconstrução óptica, como mostrado na Figura 6(b). O cálculo da difração pela filtragem espacial

é realizado considerando a solução da equação de *Helmholtz* (vide Apêndice A) no domínio da frequência [32].

Se o holograma é iluminado por uma onda plana monocromática uniforme e coerente, com distribuição espacial de amplitudes igual a 1, logo após o holograma a distribuição de luz possui a forma: $I \times g(x',y') = g(x',y')$. A propagação da luz da distribuição $g(x',y')$ resulta na distribuição óptica $g(x,y)$, localizada no plano de reconstrução.

No cálculo do holograma, as seguintes etapas devem ser consideradas:

- a) Determinação da distribuição $g(x',y')$ que deve ser gerada no plano do holograma. O cálculo desta distribuição começa pelo cálculo da propagação inversa da distribuição de luz $f(x,y)$ a partir do plano de reconstrução, indo ao plano do Holograma. Pretende-se determinar uma distribuição $g(x',y')$ que gere o mais fielmente possível a reconstrução $g(x,y)$ a distribuição $f(x,y)$, com $0 \leq |f(x,y)| \leq 1$ e $0 \leq \alpha |g(x,y)| \leq 1$, onde α é um fator de escala real e positivo. A distribuição $f(x,y)$ precisa estar disponível de forma a permitir a manipulação computacional (geralmente valores discretos de amplitude).

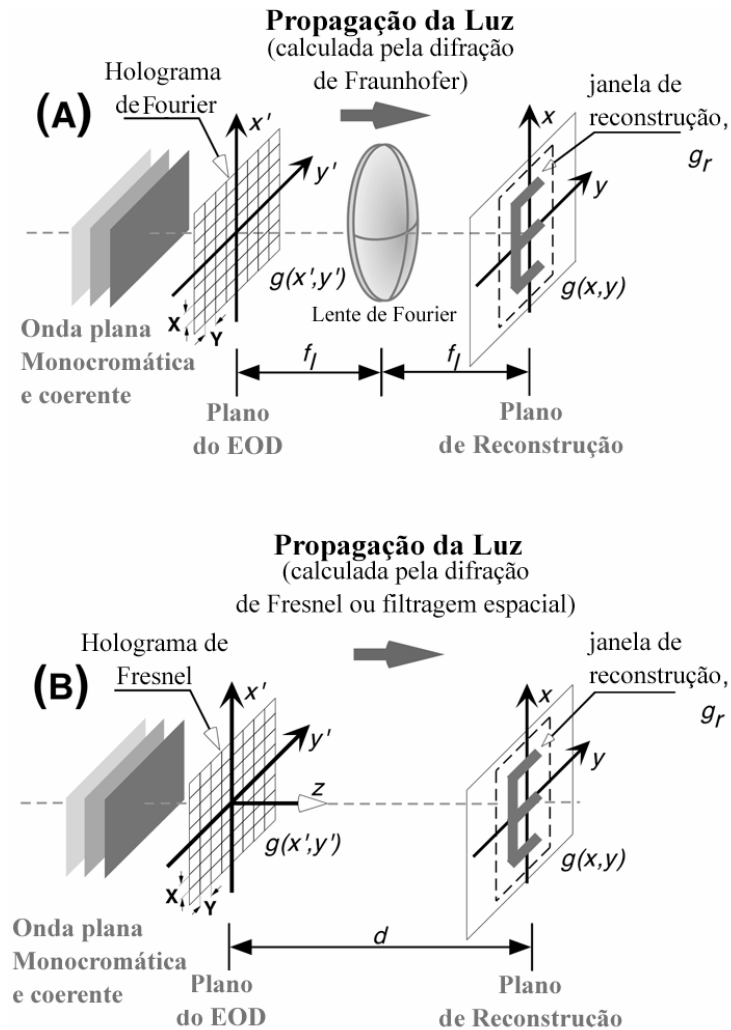


FIGURA 6- Reconstrução óptica de um EOD iluminado por uma onda plana monocromática coerente. (A) Reconstrução de um holograma de Fourier (difração de Fraunhofer) utilizando-se uma lente de Fourier; (B) Reconstrução de um holograma de Fresnel (difração de Fresnel), obtido pela propagação da luz de $g(x',y')$ pela distância d [20].

- b) A distribuição $f(x',y')$ resultante da propagação inversa da luz geralmente apresenta uma distribuição complexa de valores de fase e amplitude, que devem ser adaptados para as possíveis distribuições $g(x',y')$ do holograma, que neste caso é uma distribuição apenas de fase ou amplitude. As limitações físicas e práticas do meio em que será gravado o

holograma irão determinar a escolha do método numérico utilizado para esta implementação.

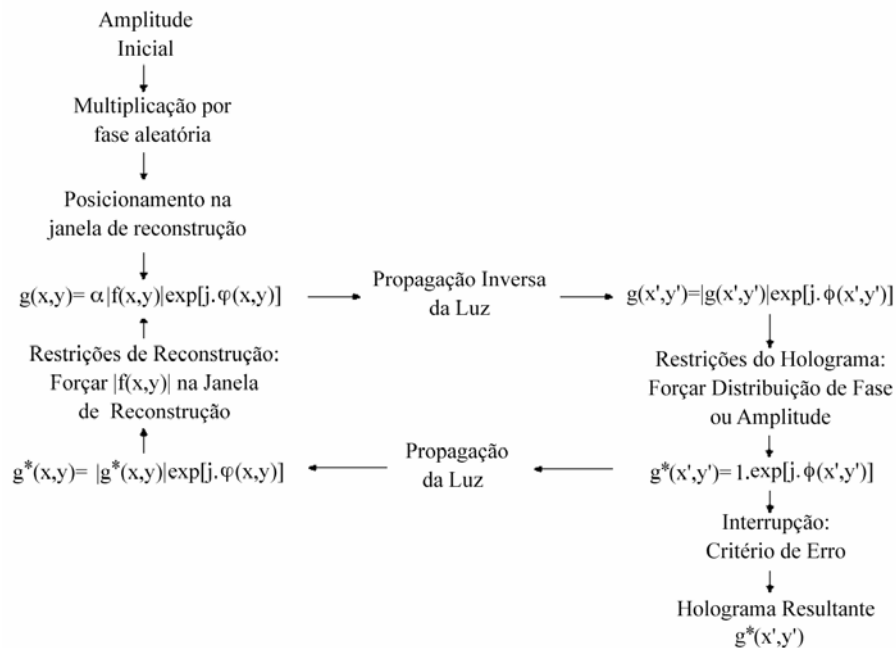


FIGURA 7-Diagrama esquemático do método iterativo da transformada de *Fourier* (*Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA*) para o cálculos de hologramas em regime de modulação de fase ou de amplitude, com a reconstrução em intensidade [42].

O objetivo do cálculo do holograma é formar uma distribuição de luz no plano de reconstrução. Uma distinção é feita entre objetos de amplitude complexa (fase e amplitude determinadas) e objetos de intensidade determinada (apenas amplitude determinada). Desta maneira, para objetos de amplitude complexa tem-se:

$$f(x,y) = |f(x,y)| \exp[i\varphi(x,y)] \quad (1)$$

e para objetos de intensidade $i(x,y)$ tem-se:

$$|f(x,y)|^2 = i(x,y) \quad (2)$$

onde os valores do argumento $\varphi(x,y)$ de $f(x,y)$ possuem total liberdade, podendo assumir quaisquer valores. Desta maneira tem-se:

$$f(x,y) = \sqrt{i(x,y)} \exp[i\varphi(x,y)] \quad (3)$$

Vários métodos foram propostos para o cálculo de hologramas por computador, entre eles o algoritmo iterativo da transformada de *Fourier* (*Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA*), introduzido na holografia digital por Gerchberg & Saxton [7] e por Hirsh et al. [8].

O *IFTA*, descrito na Figura 7, oferece os melhores resultados práticos na codificação de hologramas gerados computador com comprimento de banda (*SBP - Space Band Bandwith Product*) de 256x256 ou mais células (*pixels*). O *IFTA* foi posteriormente modificado por Wyrowski [16], que implementou neste algoritmo o conceito de liberdade de fase durante as iterações para o cálculo de hologramas com modulação em níveis discretos.

No *IFTA*, uma iteração é realizada calculando-se a propagação inversa da luz do plano de reconstrução ao plano do holograma, onde as restrições do holograma são aplicadas (imposição de uma distribuição de fase). Na seqüência, calcula-se a propagação da luz do plano do holograma ao plano de reconstrução, onde as restrições referentes a distribuição desejada são aplicadas (determinar a intensidade da reconstrução desejada $i(x,y)$). Para objetos em intensidade, atribui-se uma distribuição de fase aleatória a $\varphi(x,y)$ na primeira iteração para auxiliar a convergência do algoritmo.

Infelizmente, este método numérico requer várias iterações, além de geralmente introduzir ruído do tipo *speckle* no plano de reconstrução. Cem ou mais iterações são necessárias dependendo da complexidade da reconstrução desejada $f(x,y)$ ou $i(x,y)$. Também é possível que não exista uma distribuição de fase ou amplitude $g(x',y')$ que satisfaça $g(x,y) \approx \alpha f(x,y)$ ou $|g(x,y)| \approx \alpha [i(x,y)]^{1/2}$ sobre toda a região do plano de reconstrução [42].

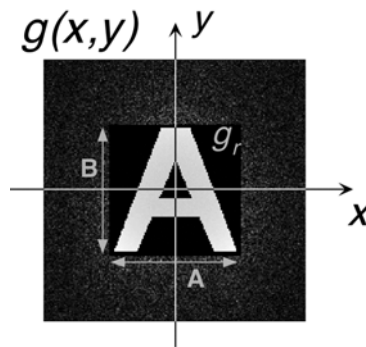


FIGURA 8-Janela de reconstrução, localizada no centro do plano de reconstrução, utilizada para melhorar a reconstrução do holograma. Fora da região g_r de dimensões $A \times B$, a fase e a amplitude da distribuição $g(x,y)$ pode variar livremente [42].

Liberdade nos valores dos parâmetros pode ser introduzida no *IFTA* para auxiliar na convergência numérica, como por exemplo:

- c) Liberdade de fase e amplitude para as distribuições fora da janela de reconstrução g_r , mostrada na Figura 8. Fora da região g_r , os valores de fase e amplitude de $g(x,y)$ podem variar livremente. O processo de codificação do holograma consiste em encontrar a distribuição $g(x',y')$ que satisfaça as restrições de modulação do holograma e garanta que a distribuição do objeto $f(x,y)$ está contida dentro de uma região $A \times B$ definida no plano de reconstrução $g(x,y)$, chamada de janela de reconstrução g_r .
- d) Liberdade de fase na janela de reconstrução g_r : para objetos em intensidade, a fase $\phi(x,y)$ pode variar livremente dentro da região g_r .
- e) Liberdade do fator de escala α : é possível variar α sobre a janela de reconstrução g_r de maneira a se obter uma redução do erro dentro de g_r .

Neste trabalho, o EOD de luz branca é gerado por computador e calculado sem a necessidade métodos iterativos computacionais.

Capítulo 4

Introdução

O EOD proposto neste trabalho funciona sob iluminação não-coerente. Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos sobre coerência da luz.

4-Coerência de uma fonte luminosa

4.1-O experimento de Young

Difração é um fenômeno que ocorre quando uma frente de onda luminosa atravessa um orifício ou contorna um objeto cuja dimensão é da mesma ordem de grandeza que o seu comprimento de onda λ . Segundo Sommerfeld [32], difração é definida como “qualquer desvio da trajetória de raios de luz de caminhos retilíneos que não podem ser interpretados como reflexão ou refração”. A difração é causada pelo confinamento de uma onda, quando este confinamento é comparável ao comprimento de onda da radiação incidente.

Um exemplo clássico que ilustra o fenômeno da difração é o experimento de Young [33,43], no qual uma frente de onda incidente em um anteparo com duas fendas, de largura definida a , sofre o fenômeno de difração, e surgem então pontos de máximos e mínimos de intensidade luminosa, que podem ser observados pela formação de franjas claras e escuras, como na Figura 9.

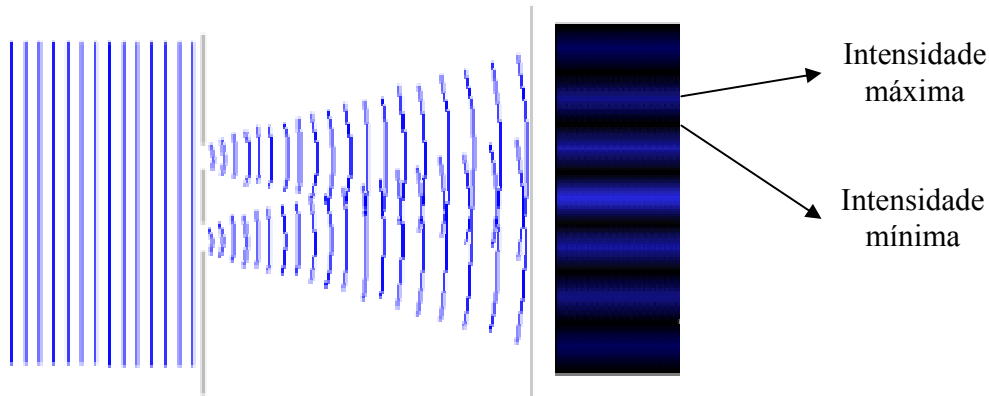


FIGURA 9-Difração da luz por duas fendas, produzindo máximos e mínimos de intensidade luminosa, observados como franjas de interferência claras e escuras.

A Figura 10 ilustra a diferença de caminhos percorridos pela onda incidente num experimento de Young. A distância entre as fendas é d e a grandeza $d \sin \theta$ é a diferença de percurso entre um feixe de luz que parte da extremidade superior da primeira fenda e outro que parte da extremidade inferior da segunda fenda. Considerando cada ponto na frente de onda uma fonte puntiforme de luz, a expressão geral dos pontos de intensidade nula na Figura de difração numa fenda é dada por:

$$m\lambda \equiv 2d \sin \theta \quad (4)$$

onde m é um número inteiro

λ é o comprimento de onda da luz incidente ;

d é a distância entre as fendas;

θ é o ângulo definido na Figura 10.

Uma ilustração da diferença de caminho entre dois feixes de luz transmitidos pela parte inferior e superior da fenda pode ser vista na Figura 10.

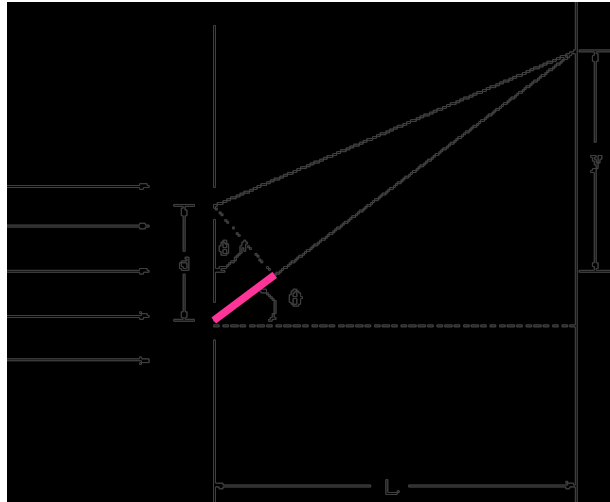


FIGURA 10-Diferença de caminhos entre dois feixes de luz que incidem na parte inferior e superior da fenda, em destaque.

Este experimento pode ser utilizado para medir o grau de coerência de uma fonte luminosa como será mostrado neste capítulo.

4.2-Coerência temporal e espacial de uma fonte luminosa

A coerência de uma fonte luminosa é a medida de correlação de fase entre ondas eletromagnéticas emitidas pela mesma. Existem dois tipos de coerência: coerência temporal e espacial.

A coerência temporal é a medida da correlação da fase de ondas eletromagnéticas em diferentes pontos ao longo da direção de propagação das ondas que emergem de uma fonte. Esta medida informa o quão monocromática é a fonte de iluminação.

Já o conceito de coerência espacial, que é utilizado neste trabalho, é definido como a medida de correlação da fase das ondas eletromagnéticas em diferentes pontos na direção transversal à direção de propagação. Esta medida determina o quão uniforme é a fase da frente de onda. A medida do grau de correlação de uma fonte luminosa pode ser definida pelo coeficiente de correlação, $\gamma_{12}(t)$. A função $\gamma_{12}(t)$ é uma função periódica de t , que considera uma medida de correlação de um trem de ondas tomada entre um intervalo de tempo definido pelos instantes t e $t + \tau$, onde t é o instante inicial, τ é um intervalo de tempo determinado e $t + \tau$ o instante final.

Analisando o módulo do valor do grau de coerência $\gamma_{12}(t)$, podem ocorrer três situações distintas:

Se $|\gamma_{12}(t)| = 1 \rightarrow$ Coerência completa;

Se $0 < |\gamma_{12}(t)| < 1 \rightarrow$ Coerência parcial;

Se $|\gamma_{12}(t)| = 0 \rightarrow$ Incoerência completa.

O conceito de coerência espacial de uma fonte luminosa policromática com diâmetro ρ e comprimento de onda de emissão médio $\bar{\lambda}$ é ilustrado na Figura 11. Sejam dois pontos consecutivos, espacialmente coerentes entre si P_1 e P_2 , cujas distâncias em relação à fonte policromática são S_1 e S_2 .

O grau de coerência da fonte, γ , pode ser determinado experimentalmente realizando-se o experimento da dupla fenda de Young, ilustrado na Figuras 9-10, Seção 4.1. Neste caso, o grau de coerência da fonte pode ser determinado por:

$$\gamma \equiv \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

onde I_{\max} e I_{\min} correspondem às intensidades máximas e mínimas obtidas no experimento.

A condição para que haja coerência espacial para uma iluminação policromática é, segundo o teorema de Van Cittert-Zernike [43], que se estabeleça uma relação entre a distância de dois pontos consecutivos coerentes, $d(P_1, P_2)$ de uma frente de onda que se propaga ao longo de uma distância R , emergindo de uma fonte luminosa estendida, de diâmetro ρ , e de comprimento de onda médio $\bar{\lambda}$, definida por (6).

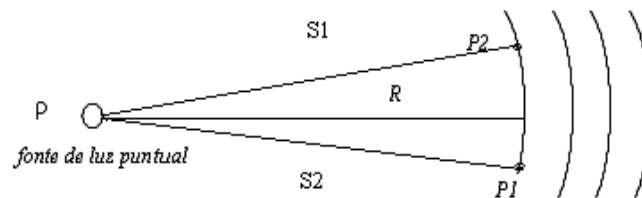


FIGURA 11-Relação entre a distância entre dois pontos espacialmente coerentes emergindo de uma fonte luminosa de diâmetro ρ , de comprimento de onda $\bar{\lambda}$, a uma distância R de propagação.

Segundo o teorema de Van Cittert-Zernike [43], para ocorrer coerência espacial da fonte luminosa ilustrada pela Figura 11 é necessário satisfazer a seguinte equação :

$$d(P_1, P_2) = \frac{0.16R\bar{\lambda}}{\rho} \quad (6)$$

onde ρ é o diâmetro da fonte de iluminação estendida; $\bar{\lambda}$ é o comprimento de onda médio da fonte luminosa ; $d(P_1, P_2)$ é a distância de dois pontos consecutivos coerentes de uma frente de onda que se propaga ao longo de uma distância R , emergindo da fonte luminosa.

A diferença de fase δ [43] entre dois pontos coerentes da frente de onda emitida pela fonte luminosa da Figura 11 é definida por :

$$\delta \equiv \frac{2\pi(S_1 - S_2)}{\bar{\lambda}} \quad (7)$$

onde $\bar{\lambda}$ é o comprimento de onda médio da fonte luminosa; S_1 e S_2 são as distâncias em relação à fonte policromática.

Capítulo 5

Introdução

Nos capítulos anteriores foram apresentados alguns conceitos necessários para a apresentação do EOD de luz branca. Neste capítulo serão apresentados o projeto, funcionamento e o processo de fabricação deste EOD.

5-O Elemento de luz branca

5.1-A técnica de *halftoning*

O método para representação de imagens em tons de cinza utilizando pixels binários é conhecido como *halftoning* [44]. Esta técnica foi utilizada neste trabalho para projetar o elemento de luz branca proposto.

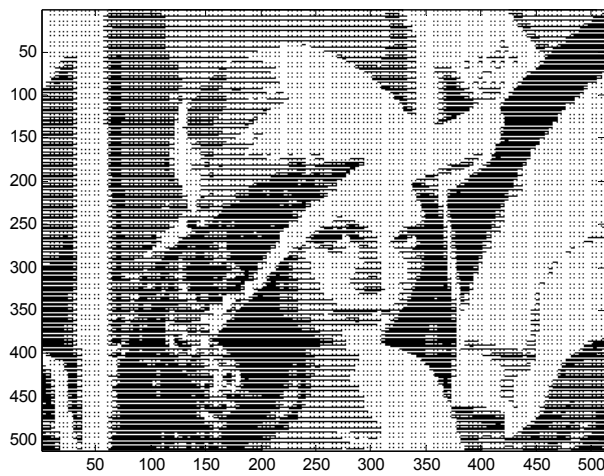
Na técnica de *halftoning* ou “meio-tom” imagens em níveis de cinza são codificadas por *clusters* de pixels brancos e pretos. Numa imagem codificada por *halftoning* uma pequena área que contenha pixels brancos e pretos. A uma determinada distância, da ordem de 30 cm, o olho humano integra o conteúdo desta pequena área, de forma que o observador percebe somente a intensidade média da mesma. Esta propriedade de integração do olho humano é básica para a técnica de *halftoning*.

As Figuras 12(a)e (b) mostram, respectivamente, as imagens original e obtida através de cálculo numérico utilizando a técnica de *halftoning*, com 256 níveis de cinza. Um grupo de

$n \times n$ pixels binários pode produzir $n^2 + 1$ níveis de cinza. Neste caso, cada *cluster* da imagem em halftoning é composto por 4×4 pixels como mostrado na Figura 13.



(a)



(b)

FIGURA 12(a)- Imagem original de Lenna 128x128 pixels;(b) Imagem obtida a partir da imagem original, através da técnica de *halftoning*.

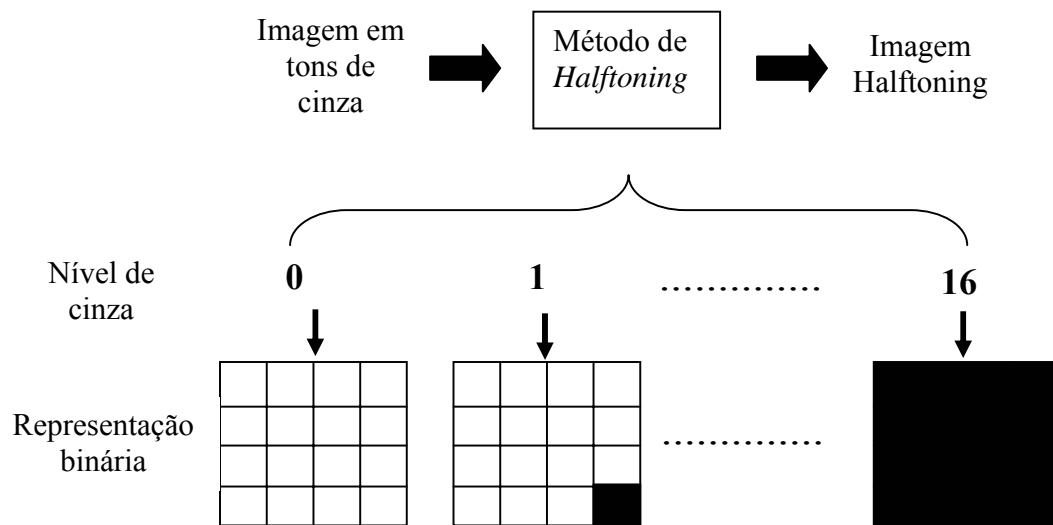


FIGURA 13- Técnica de *halftoning* aplicada a uma imagem com 17 níveis de cinza.

5.2-Processo de codificação do elemento de luz branca

O elemento de luz branca foi fabricado utilizando-se técnica de óptica binária de baixo custo. Considerando-se o custo e o tempo que estão envolvidos num processo para gerar perfis de fase contínuos, foi proposto um EOD binário com níveis de atraso de fase de 0 e π radianos. As máscaras utilizadas no processo de fabricação destes elementos foram geradas através da técnica *halftoning* [44] em que cada pixel com um tom de cinza é representado por um conjunto de subpixels pretos e brancos [21,25].

Os EODs de fase foram projetados para informação binária. A informação binária foi mapeada como mostrado na Figura 14: cada pixel com nível 1 é transformado em quatro pixels com valor de fase e^{j0} , e cada pixel com nível 0 é transformado em quatro pixels (dois pixels com valor de fase e^{j0} e os outros dois pixels com valor de fase $e^{j\pi}$).

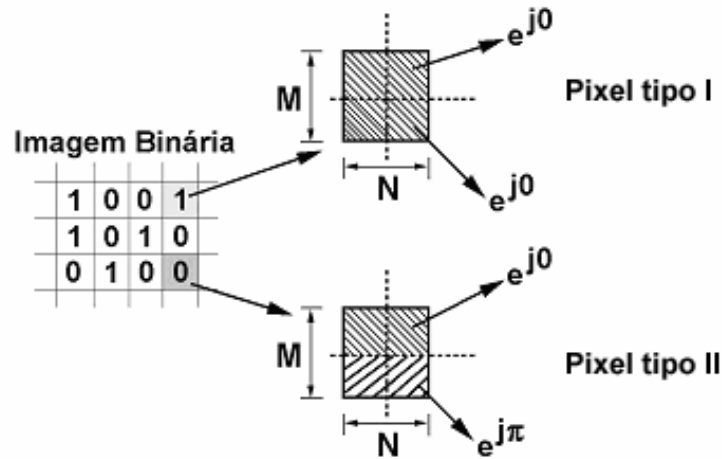


FIGURA 14-Projeto do EOD para uma informação binária

Pode-se classificar dois tipos de pixels codificados conforme ilustrado na Figura 14. Um bloco de pixels composto de 4 pixels de fases e^{j0} , e^{j0} , e^{j0} , e^{j0} , o qual foi denominado pixel tipo I. Outro bloco de pixels composto de 4 pixels de fases e^{j0} , e^{j0} , $e^{j\pi}$, $e^{j\pi}$, o qual foi denominado pixel tipo II. A seguir serão apresentados os padrões de intensidades luminosas geradas quando uma frente de onda atravessa os pixels tipo I e II.

5.3-Simulação e funcionamento do elemento de luz branca

A codificação dos elementos de luz branca foi realizada conforme a metodologia descrita na Seção 5.2. O EOD de luz branca é composto por pixels tipo I e II. Desta forma, simulou-se inicialmente o comportamento de uma frente de onda luminosa modulada por este dois tipos de pixels, segundo a propagação de Fresnel no espectro angular, dada por (8).

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, z\right) \equiv \int \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, z) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] dx dy \quad (8)$$

Onde A é a amplitude resultante da perturbação U(x,y,z), e $\alpha=\lambda f_x$; e $\beta=\lambda f_y$, e f_x e f_y são as frequências referentes ao plano de coordenadas xy. Assim, a função transferência do sistema é dada por (9)

$$H(f_x, f_y) = \begin{cases} \exp\left[j2\pi \frac{z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right], & \text{para } \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < \frac{1}{\lambda} \end{cases} \quad (9)$$

O espectro de uma função de saída de um sistema, $G_2(f_x, f_y)$ está relacionado com o espectro de entrada $G_1(f_x, f_y)$ pela função transferência, de tal forma que:

$$G_2(f_x, f_y) \equiv H(f_x, f_y) G_1(f_x, f_y) \quad (10)$$

O diagrama do algoritmo para o cálculo da propagação da luz modulada pelos pixels tipos I e II é ilustrado na Figura 15.

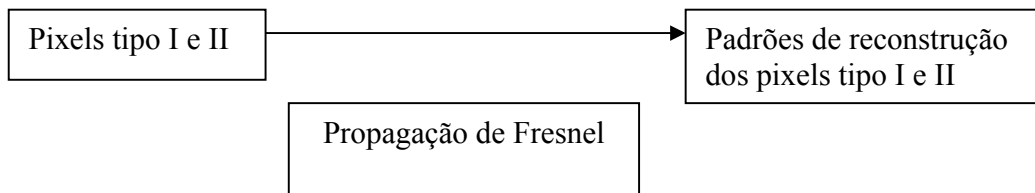


FIGURA 15-Diagrama do algoritmo para o cálculo da propagação da luz modulada pelos

pixels tipos I e II

Analisando a propagação da intensidade luminosa ao longo do eixo é possível observar a formação de padrões de difração. Para uma distância de 2 cm foram observados os padrões de difração para os pixels tipo I e II como ilustrados nas Figuras 16-17.

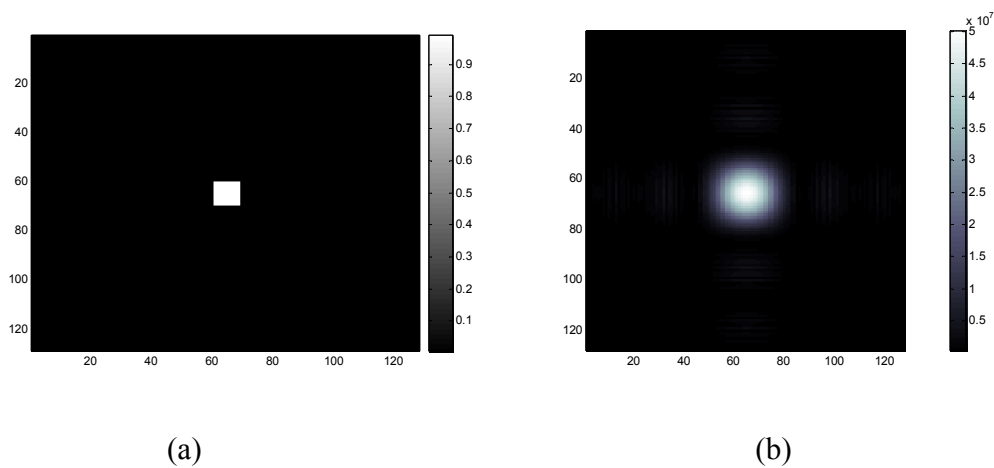


FIGURA 16-(a)pixel tipo I e (b)sua respectiva intensidade de propagação.

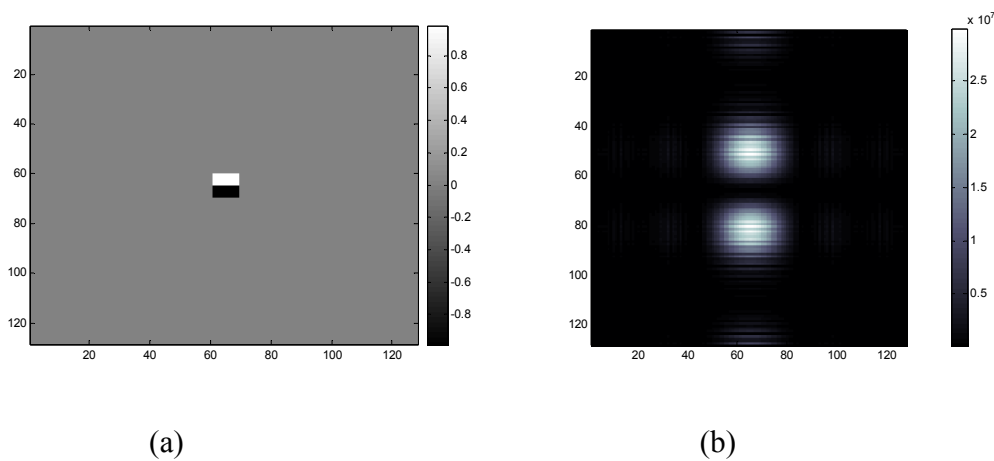


FIGURA 17– (a)Pixel tipo II e (b) intensidade de propagação do pixel tipo II.

Estes pixels dos tipos I e II podem ser interpretados como ondas, cujas propagações podem ser calculadas pelas transformadas de *Fourier* já conhecidas [45]. No caso do pixel tipo I, que modula fase 0, este se comporta como uma função $\Pi(x)$, cuja transformada de *Fourier* é $\text{sinc}(s)$. Analogamente, o pixel tipo II, que apresenta fases 0 e π , tem um comportamento semelhante ao da função $-\frac{1}{2}\Pi\left(x+\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}\Pi\left(x-\frac{1}{2}\right)$, cuja transformada de *Fourier* é $-i \text{sinc}(s)\text{sinc}(s\pi)$. As funções matemáticas dos pixels dos tipos I e II e suas transformadas de *Fourier* estão ilustradas nas Figuras 18 e 19. Estas figuras ilustram os padrões de difração ou transformadas de *Fourier* (vide Apêndice B) dos pixels tipos I e II.

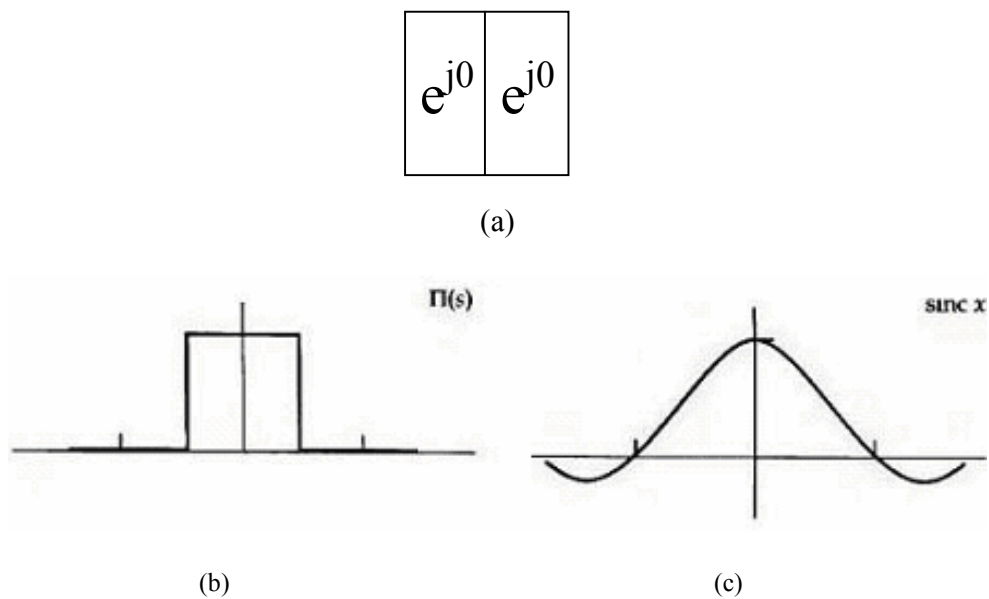


FIGURA 18-(a) Modelo proposto para o pixel tipo I ; (b) sua representação como função $\text{rect}(x)$ e (c) sua transformada de *Fourier*, $\text{sinc}(s)$.

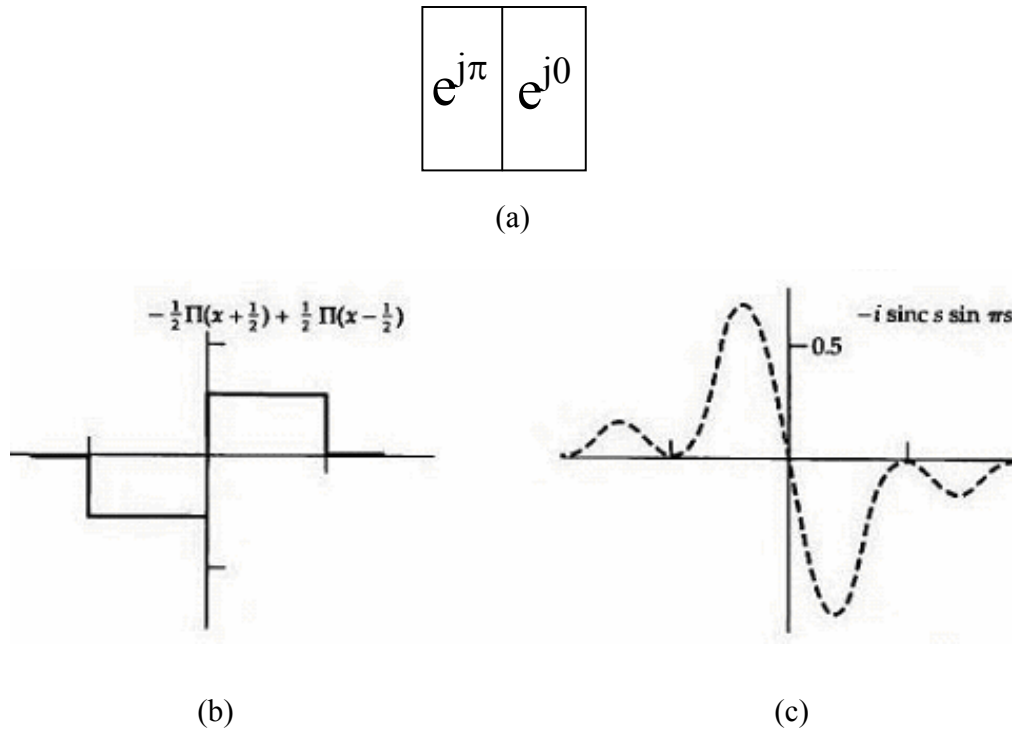


FIGURA 19- Modelo para o pixel tipo II e (b) sua representação como

função $-\frac{1}{2}\Pi\left(x+\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}\Pi\left(x-\frac{1}{2}\right)$; e (c) sua transformada de *Fourier*, $-i \sin c(s) \sin c(\pi s)$.

O EOD de luz branca é composto por um conjunto de pixels tipo I e II. Desta forma, é possível calcular o padrão de difração para cada tipo de pixel no plano de reconstrução para compor a imagem resultante. Cada pixel dos tipos I e II podem ser abordados como micro-hologramas de *Fresnel*. A seguir será apresentado e descrito o algoritmo para a simulação do EOD de luz branca.

5.4- Simulação do EOD de luz branca

O EOD de luz branca foi projetado segundo a técnica de *halftoning* descrita na Seção 5.1. Uma imagem original de 128 x 128 pixels, com 256 níveis de cinza, foi transformada numa imagem *halftoning* de 512 x 512 pixels. Neste processo, cada nível de cinza da imagem original foi mapeado para uma matriz de 4 x 4 pixels. A partir da imagem de *halftoning*, foi gerado o EOD de fase conforme mostrado na Seção 5.2.

A simulação do comportamento da modulação de uma frente de onda luminosa parcialmente coerente em uma região localizada através do EOD de fase foi implementada segundo os diagramas esquemáticos dos algoritmos presentes nas Figuras 20-21. Neles foi utilizado o cálculo da propagação da luz utilizando a aproximação de Fresnel no espectro angular, mostrada em (8). O cálculo da reconstrução da imagem foi dividido em duas etapas : cálculo da propagação de Fresnel para pixels tipo I e cálculo da propagação de Fresnel para pixels tipo II. Desta forma, é obtida a função transferência (vide anexo B) para cada caso, obtida a partir de (12). Fazendo-se a operação de convolução bidimensional [32] da imagem gerada por *halftoning* com cada função transferência obtém-se a imagem de saída para cada tipo de pixel. Como o sistema é linear, utilizando o princípio da superposição, as imagens de saída para cada tipo de pixel podem ser somadas para a obtenção da imagem no plano de reconstrução.

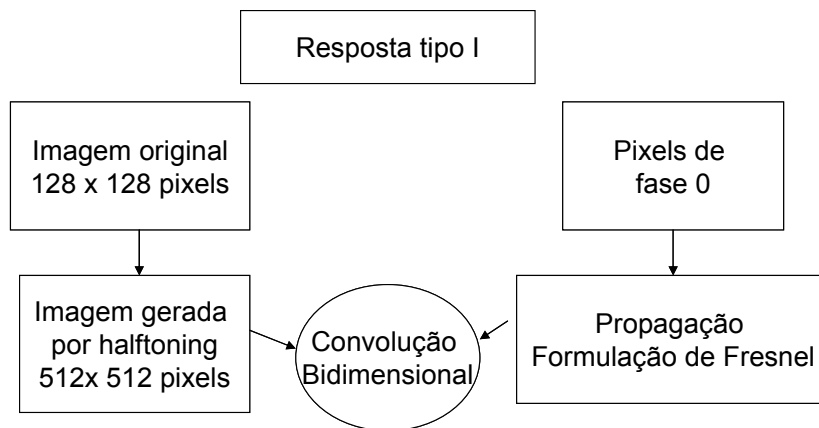


FIGURA 20- Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da resposta impulsional dos pixels tipo I.

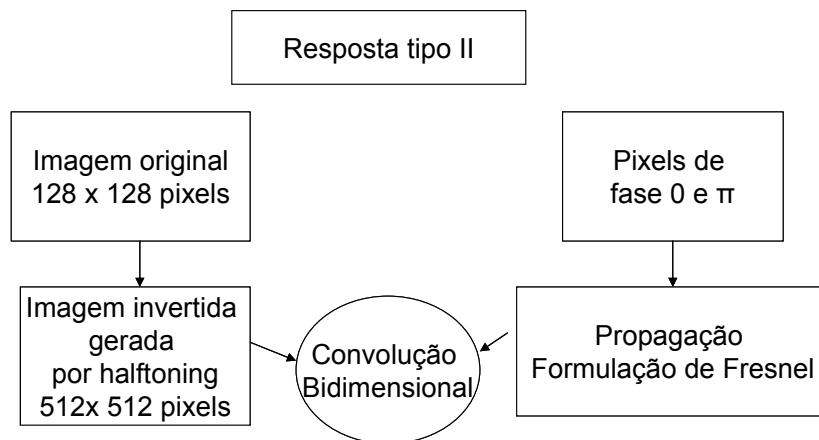


FIGURA 21- Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da resposta impulsional dos pixels tipo II.

Foram feitas simulações computacionais para as distâncias (0 e 2 cm) entre o plano do EOD e o plano de reconstrução. Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 22(a-b).

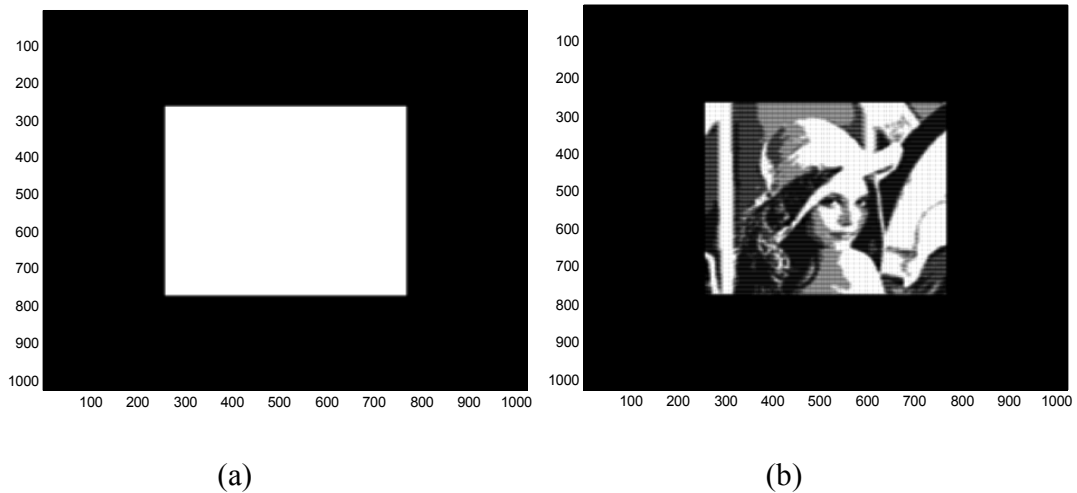


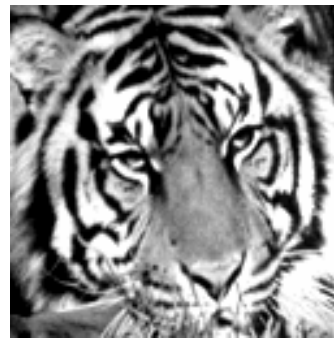
FIGURA 22- Reconstrução simulada para o EOD gerado a partir da figura Lenna para uma distância do plano do EOD ao plano de reconstrução de (a) 0 cm e (b) 2 cm.

Observa-se na Figura 22 que para uma distância muito próxima entre o plano do EOD e o plano de reconstrução não há a formação de imagem. Já para uma distância de 2 cm entre os planos ocorre a formação de uma imagem. A Figura 22(b) ilustra o caso em que ocorre coerência local nas regiões dos pixels tipo I e II. Como consequência há a formação dos padrões simulados e mostrados nas Figuras 16-17 da Seção 5.3.

Para a construção de EOD de luz branca foram escolhidas quatro imagens de dimensão 128 x 128 pixels como mostrado na Figura 23. O EOD de fase foi gerado utilizando o mesmo processo aplicado anteriormente nesta seção. Na Figura 24 são mostradas as reconstruções ópticas simuladas computacionalmente para uma distância de propagação de 2 cm. Estes resultados mostram que há uma determinada distância de propagação, neste caso 2 cm, em que ocorre coerência espacial local nas regiões dos pixels tipo I e II. Estas regiões podem ser interpretadas como micro-hologramas de Fresnel, cuja soma das reconstruções origina a imagem de interesse.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 23- Figuras utilizadas no algoritmo para gerar o EOD de luz branca: (a) Lenna; (b) tigre, (c) periquito; (d) gato.

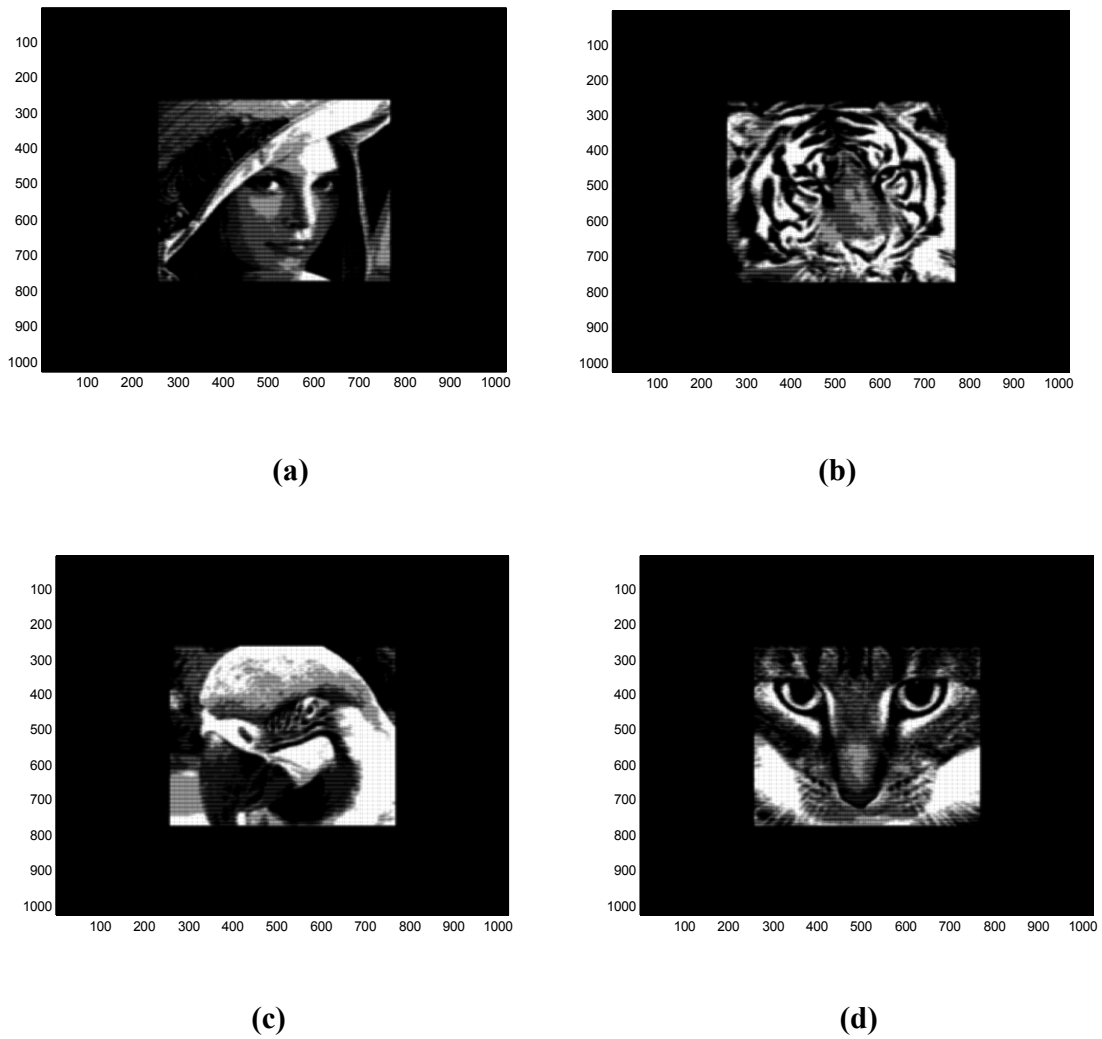


FIGURA 24- Reconstrução simulada para o EOD gerado a partir das figuras (a)Lenna, (b) tigre, (c) periquito e (d) gato, para uma distância do plano do EOD ao plano de reconstrução de 2 cm. Estas figuras são as mesmas utilizadas para a fabricação do elemento de luz branca.

5.5-Construção do elemento de luz branca

Nesta seção são descritos os processos de fabricação do elemento de luz branca, que foi fabricado com a colaboração do Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica – USP – Brasil.

A modulação de fase no EOD é descrita por (11) [18].

$$th(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi(n-1)}\phi(x, y) \quad (11)$$

onde : $\phi(x, y)$ ($0 \leq \phi(x, y) \leq 2\pi$) é a distribuição de fase, $th(x, y)$ é a variação de espessura necessária para gerar o padrão de difração, λ é o comprimento de onda de operação e n é o índice de refração do material da rede de fase. Visto que o EOD funciona no espectro visível foi escolhido $\lambda = 633$ nm.

O EOD foi fabricado empregando óptica binária de baixo custo e a seqüência de etapas para fabricação é mostrada esquematicamente na Figura 25. Considerando o custo e o tempo deste processo, o qual gera perfis de fase contínuos, foi proposto um EOD binário com níveis de atraso de fase de 0 e π radianos, que são gerados por etapas de fotolitografia e corrosão por plasma [20].

Um substrato de vidro de qualidade óptica com diâmetro de três polegadas foi utilizado como base para as estruturas de deslocamento de fase. Estas estruturas foram implementadas em filme fino de fotorresiste cujo índice de refração é $n_R = 1,65$.

Substituindo $\phi(x, y) = \pi$ em(10), a espessura de rede encontrada é $th(x, y) = 633 / [2(1.65 - 1)] = 486,9$ nm.

Neste trabalho, foi utilizado um processo de seis etapas, que são bem controladas e conhecidas para aplicações em micromecânica e microeletrônica. Estas etapas são apresentadas a seguir :

- a) **Limpeza das lâminas de vidro.** O substrato de vidro utilizado apresenta diâmetro de 3 polegadas e espessura de 1,0 mm ;
- b) **Aplicação (spin) de álcool isopropílico,** 20 seg., 2500 rpm;
- c) **Aplicação do promotor de aderência,** 20 seg., 2500 rpm;
- d) **Aplicação do fotoresiste TOKYO OHKA ONPR – 800,** 20 seg., 2500 rpm, a espessura do fotoresiste obtida foi de 1,1 μm ;
- e) **Pré-Cura,** 90 seg@90°C;
- f) **Exposição UV,** 40 seg., 25 mW/cm². O fotolito utilizado para a transferência do padrão desejado foi gerado sobre um filme transparente por uma *plotter* (AGFA AVANTRA 30e 2400 dpi) com máxima resolução de 15 μm .
- g) **Revelação,** 2 partes de revelador : 1 parte de H₂O-DI. O tempo de revelação foi mantido constante em 60 s. O revelador empregado foi o HPRD-402;
- h) **Pós cura,** 30 min @ 105°C;
- i) **Medição de altura de degrau antes da corrosão.** Verificação da altura de degraus do fotoresiste, antes da corrosão por plasma, via técnica de perfilometria;
- j) **Corrosão por plasma.** Os substrato com fotoresiste foi submetido a corrosão por plasma de CF₄ + 20% H₂, durante 10 minutos;

- k) **Medição de altura de degrau após a remoção do fotorresiste.** Verificação das alturas de degraus após a remoção do fotorresiste remanescente da corrosão, via perfilometria.

Na Figura 26, pode ser visto o EOD de fase de luz branca produzido através da metodologia descrita nesta seção.

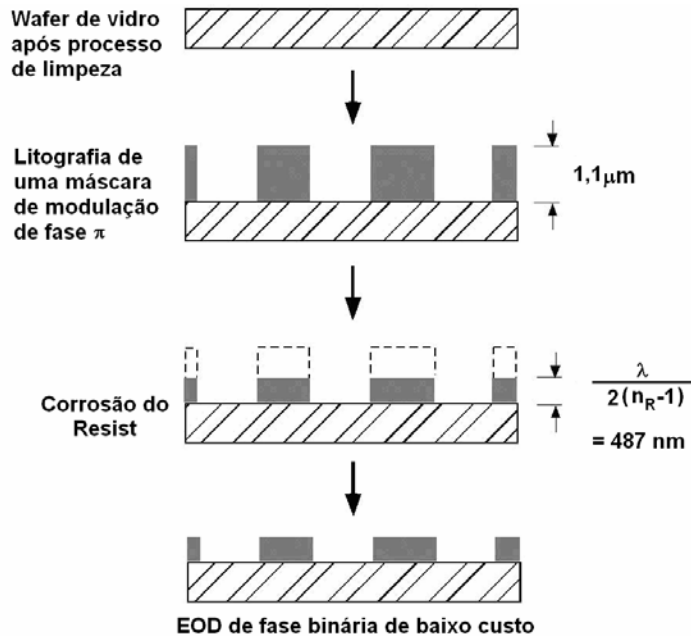


FIGURA 25- Visão esquemática da seqüência do processo de fabricação do EOD no modo transmissão. Devido ao baixo custo de fabricação foi utilizada uma máscara que consiste de um filme transparente tipo fotolito. O padrão a ser transferido foi impresso no filme transparente por uma plotter com máxima definição 15 μm (AGFA AVANTRA 30e 2400 dpi). Nenhuma máscara gerada por feixe de elétrons é necessária.

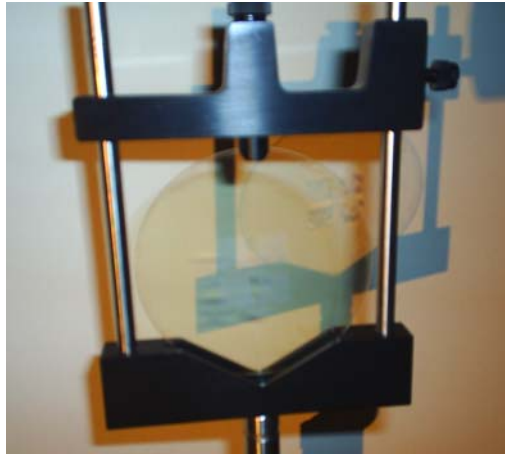


FIGURA 26- Montagem do EOD de luz branca realizada no laboratório de óptica do departamento de engenharia elétrica da EESC-USP. No plano posterior, observa-se o anteparo, onde a imagem é projetada.

Capítulo 6

Introdução

No capítulo anterior foram apresentados a metodologia de projeto, funcionamento e construção do EOD de fase que opera sob iluminação parcialmente coerente em uma região localizada. Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais referentes às reconstruções ópticas utilizando os EODs fabricados através do método proposto.

6-Resultados experimentais

6.1- Medida do contraste

O EOD de fase projetado e construído é iluminado com uma fonte luminosa não-coerente. Logo, torna-se necessário avaliar o contraste obtido através da fonte luminosa utilizada.

A iluminação utilizada no processo de reconstrução óptica corresponde a uma lâmpada dicróica halógena (12V, 50W e comprimento de onda médio $\bar{\lambda}=633$ nm) da marca OSRAM mostrada na Figura 27.



FIGURA 27- Lâmpada dicrónica halógena 12V, 50W, $\bar{\lambda}=633$ nm, da marca OSRAM, utilizada para obtenção da reconstrução óptica do elemento de luz branca.

Para a determinação do contraste da fonte luminosa utilizada para a reconstrução óptica do EOD de luz branca foram feitos três experimentos: difração da luz por uma fenda dupla (experimento de *Young*); difração da luz através de uma grade de difração, cujo período da rede é $10\ \mu\text{m}$, ou seja, da mesma ordem de grandeza da dimensão dos pixels do EOD; e difração da luz através do EOD de luz branca.

A montagem óptica utilizada nos experimentos acima está ilustrada na Figura 28. Para a reconstrução óptica do elemento de luz branca e posteriormente o cálculo do contraste da fonte luminosa empregada, foi realizada uma montagem, como visto na Figura 28, utilizando : suportes da marca Newport; uma lâmpada dicrónica halógena 12V, 50W, $\bar{\lambda}=633$ nm, da marca OSRAM (vide Figura 27); uma pupila Newport; uma câmera CCD Solid State COHU, acoplada a um PC; uma placa de aquisição NI-IMAQ 2.2 da National Instruments; e duas lentes, de distâncias focais $f=0,15\text{m}$ e $f=0,25\text{m}$, com o objetivo de projetar as imagens no plano do sensor da câmera CCD.

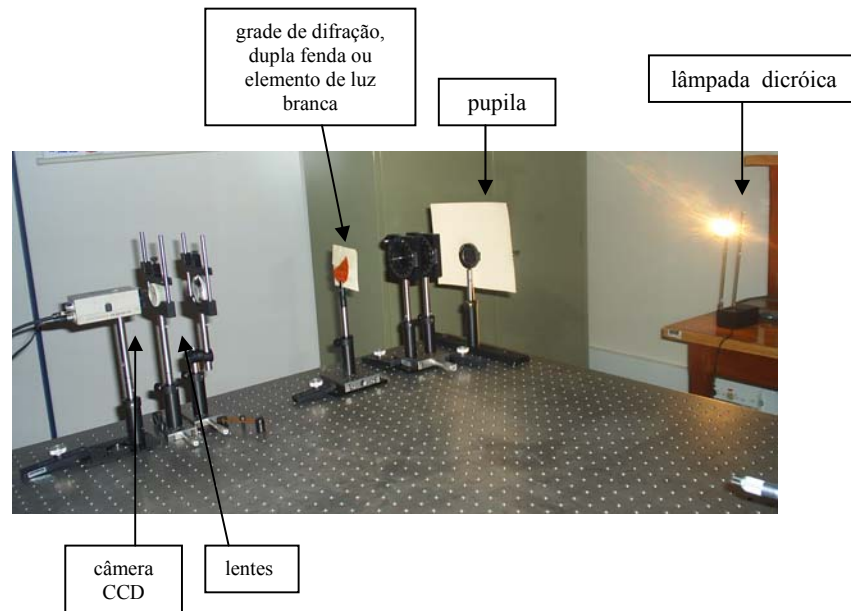


FIGURA 28-Montagem experimental para cálculo do grau de coerência realizada através de três metodologias: difração por uma fenda dupla, difração através de uma grade de difração e difração através do elemento de luz branca.

O grau de coerência da fonte luminosa foi calculado em cada experimento utilizando a formulação de (5). De acordo com (6), Seção 4.2, como a dimensão dos pixels é $20\ \mu\text{m}$, a distância $d(P_1, P_2)$, entre dois pontos coerentes em uma frente de onda, é a mínima distância entre dois pixels, $20\ \mu\text{m}$. O diâmetro do filamento da luz dicrónica ρ é 3mm , e o comprimento de onda médio $\bar{\lambda}$ é 633nm . O valor mínimo da distância R da fonte ao plano do EOD calculado para que haja coerência espacial é $0,6\ \text{m}$. Tendo em vista estes resultados, a fenda dupla, a grade de difração e o elemento de luz branca foram posicionados a esta distância mínima da fonte luminosa, para que a condição de coerência fosse observada. A distância entre o plano do EOD

de luz branca e o plano da câmera CCD foi fixada em 2 cm, como constatado na reconstrução simulada computacionalmente.

Para cada experimento foram calculados quatro valores de contraste: um para a iluminação da lâmpada dicróica somente e outros três com a lâmpada dicróica associada separadamente com filtros (verde, vermelho e azul). Para o cálculo destes contrastes foi implementado um algoritmo simples para identificar os máximos e mínimos de intensidade nas imagens geradas em cada experimento pelos diferentes comprimentos de onda. Os resultados do cálculo dos contrastes dos experimentos são mostrados nas Tabelas I, II e III.

Tabela I. Contrastes determinados através da difração por uma grade de difração obtido com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul .

1. Grade de Difração		
Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contraste
Branca	633	0,7899
Vermelha	700	0,8168
Verde	530	0,8216
Azul	470	0,8155

Tabela II. Contraste determinados através da difração por uma fenda dupla obtido com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul .

2.Fenda de Young		
Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
Branca	633	0,8000
Vermelha	700	0,8242
Verde	530	0,7326
Azul	470	0,7089

Tabela III.(a) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca Lenna obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.

3.Elementos de luz branca			
	Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
a) Lenna	Branca	633	0,7385
	Vermelha	700	0,8022
	Verde	530	0,7364
	Azul	470	0,7754

Tabela III.(b) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca gato obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.

	Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
b)Gato	Branca	633	0,7034
	Vermelha	700	0,7509
	Verde	530	0,7706
	Azul	470	0,7385

Tabela III.(c) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca tigre obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.

	Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
c)Tigre	Branca	633	0,7024
	Vermelha	700	0,7324
	Verde	530	0,7754
	Azul	470	0,7385

Tabela III.(d) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca periquito obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.

	Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
d)Periquito	Branca	633	0,7376
	Vermelha	700	0,8022
	Verde	530	0,7501
	Azul	470	0,7698

Os resultados dos experimentos com a fenda dupla, a grade de difração e o elemento de luz branca mostrados nas Tabelas I, II e III indicam contrastes para a luz branca e para os comprimentos de onda verde, vermelho e azul. Nota-se que o contraste obtido através da fonte de luz branca e de suas componentes estão muito próximos. Estão ilustradas nas Figuras 29-32 as reconstruções ópticas do EOD de luz branca para os seguintes casos: lâmpada dicróica somente e lâmpada dicróica associada com filtros isolados (vermelho, verde e azul).



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 29- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “Lenna” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.

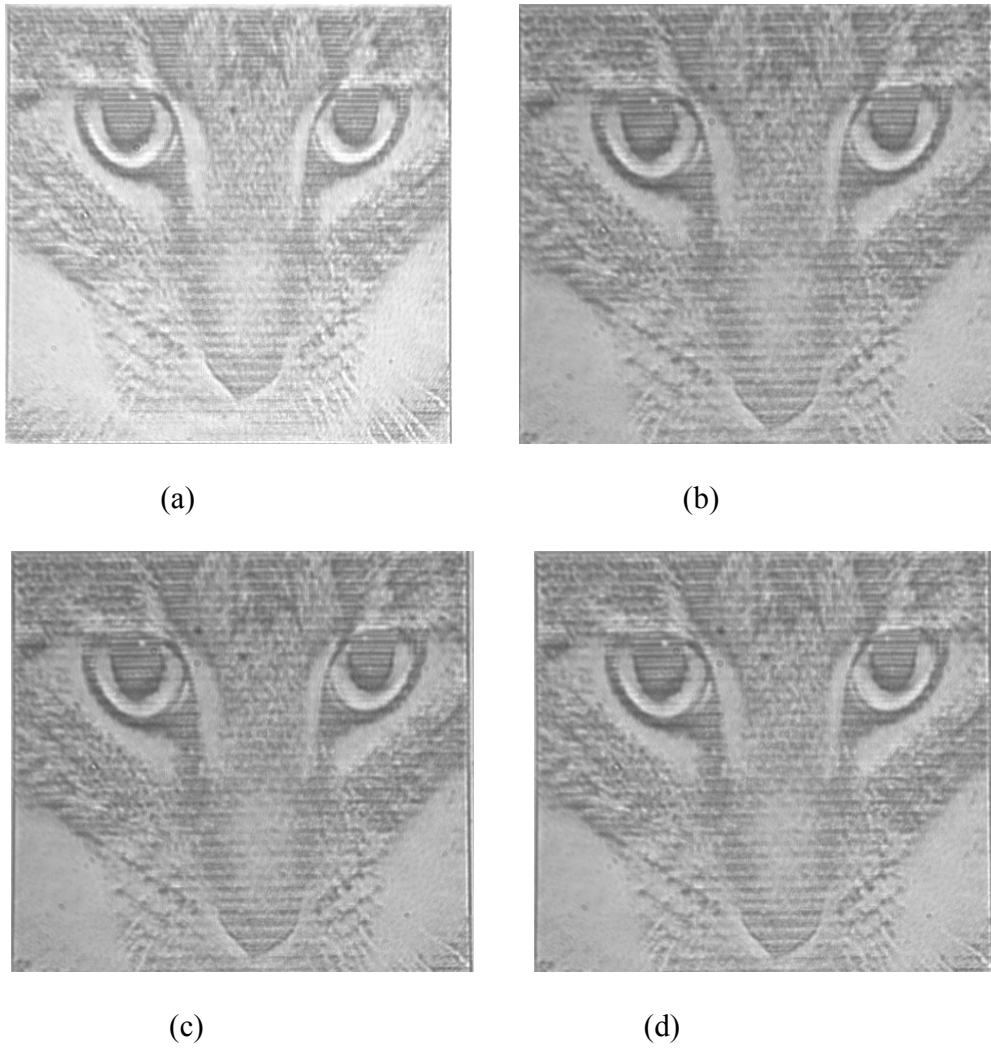


FIGURA 30- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “gato” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.



(a)



(b)

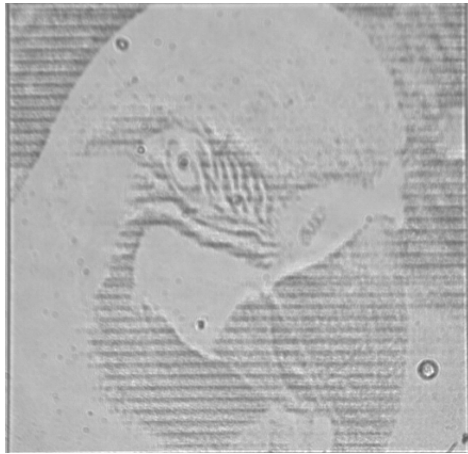


(c)

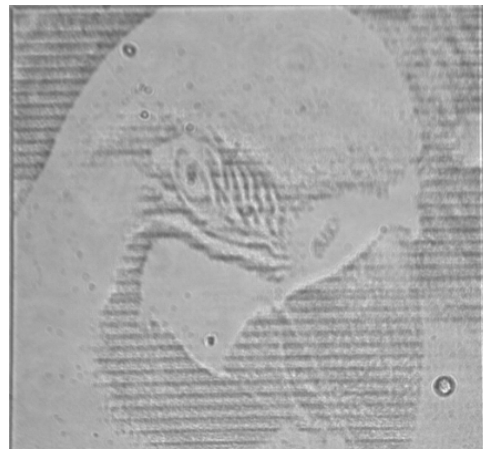


(d)

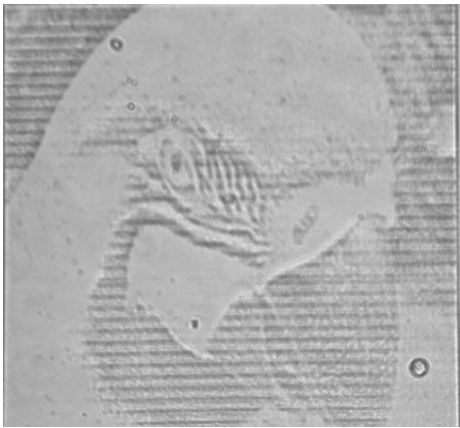
FIGURA 31- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “tigre” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.



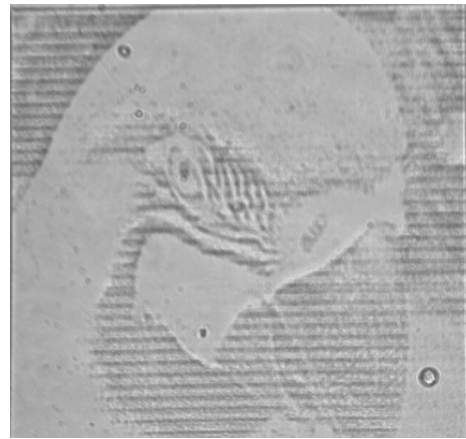
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 32- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “periquito” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.

Como pode ser visto nas Figuras 29(a), 30(a), 31(a) e 32(a), as reconstruções ópticas geradas pelos elementos ópticos difrativos de luz branca apresentam boa nitidez e resultados satisfatórios. Não foi observada distorção cromática considerável, como o efeito *rainbow* constatado em outros hologramas de luz branca convencionais. As reconstruções ópticas do EOD de luz branca obtidas com luz branca somente, e com suas componentes vermelha, verde e azul são muito semelhantes. Segundo o conceito de amostragem (vide Apêndice C), os intervalos de amostragem são proporcionais ao comprimento de onda λ . Entretanto, a diferença de tamanho dos pixels das imagens de reconstrução geradas pelos três comprimentos de onda não é perceptível ao olho humano e, segundo o princípio da superposição, descrito no Apêndice B, cada pixel da imagem resultante gerada a partir do elemento de luz branca iluminado com a lâmpada dicróica é a soma de todos os pixels de cada imagem gerada pelos diferentes comprimentos de onda que a compõem. Os pixels se sobrepõem e o olho humano integra a imagem, de tal forma que distorções cromáticas não são observadas.

Capítulo 7

Introdução

No capítulo anterior foram apresentados resultados experimentais referentes as reconstruções ópticas utilizando os EODs construídos. Neste capítulo serão destacadas algumas conclusões e considerações em relação ao EOD de luz branca proposto.

7-Conclusões

O cálculo e simulação do elemento de luz branca foram propostos a partir de um algoritmo que utiliza a transformada de *Fourier* como ferramenta para o cálculo da propagação de luz através do elemento binário, construído utilizando uma imagem gerada pela técnica de *halftoning*, obtida rearranjando-se regiões de pixels que apresentam coerência espacial local. Esta proposta de fabricação utiliza óptica binária de baixo custo, uma vez que foi introduzida uma modulação de fases 0 e π .

Uma das vantagens da utilização deste algoritmo é a eliminação de métodos iterativos, utilizados na maioria dos hologramas gerados por computador. Utilizando conceitos da técnica de *halftoning* no algoritmo proposto, pode-se gerar uma máscara para produzir o elemento de luz branca facilmente, utilizando uma impressora de alta resolução e técnicas de fabricação de circuito impresso.

Uma outra vantagem deste EOD de fase de luz branca é que os resultados da reconstrução óptica mostram mínima distorção cromática, imperceptível ao olho humano, ao contrário do

observado em hologramas de luz branca convencionais. Outras vantagens importantes são o baixo custo e o tempo envolvidos no processo de fabricação do EOD de luz branca proposto, já que este utiliza técnicas simples de fabricação de circuitos impressos.

Os resultados obtidos a partir da reconstrução óptica e simulada do EOD de fase de luz branca apresentam semelhança entre si, o que indica que o algoritmo proposto neste trabalho foi capaz de reproduzir este comportamento óptico do elemento, de forma simples e sem necessidade de métodos complexos ou iterativos.

O EOD de luz branca poderia ser utilizado em diversas aplicações: processamento óptico não-corente (correladores ópticos), sistemas de segurança para autenticação de informações (documentos, cartões de crédito) e projeção de imagens holográficas como arte.

Capítulo 8

8-Referências Bibliográficas

- [1] GABOR, D.(1948). “A new microscope principle”. *Nature*, vol. 161, pp.777.
- [2] DENISYUK, Y. N.(1997). “From Lippmann photography to selectograms via white light holography”. *Journal of imaging science and technology*. vol 41(3), pp.205-210, mai/jun.
- [3] BENTON, S. A.(1969). “On a method for reducing the information content of holograms”. *Journal of Optical Society of America*, vol.59, pp.1969.
- [4] SIEBERT, L. D.(1967). “Front-lighted pulse laser holography”. *Applied Physics Letters*, vol. 11(10), pp.326.
- [5] MOLLENST, G. ; WAHL, H.(1968). “Electron holography and reconstruction with laser light”. *Naturwissenschaften*, vol.55(7), pp. 340.
- [6] TANNER, L.H. (1968). “A study of fringe clarity in laser interferometry and holography”. *Journal of Physics e Scientific Instruments*, vol.1(5), pp. 517.
- [7] GERCHBERG, R. W ; SAXTON, W.O. (1972). *Optik* vol.35, pp. 237.
- [8] HIRSCH, P.M.; JORDAN, J.A.; LESEM, L.B. (1971). US Patent N°. 3.619.022.
- [9] BROWN, B. R.; LOHMANN, A.W.(1969). *IBM J. Res. & Dev.* vol. 13, pp160.
- [10] LOHMANN, A.W; PARIS, D.P. (1967). *Applied Optics* vol.6, pp.1739.
- [11] BROWN, B. R.; LOHMANN, A.W.(1969). *IBM J. Res. & Dev.* vol. 14, pp. 380
- [12] LEE, W. H.(1974). Binary Synthetic Holograms. *Applied Optics* vol. 13, 1677-1682.
- [13] SELDOWITZ, M. A.; ALLEBACH, J. P.; SWEENEY, D. W.(1987).Synthesis of digital holograms by direct binary search. *Applied Optics*, vol. 26, nº. 14, pp. 2788-2797.

-
- [14] HAUCK, R.; BRYNGDAHL, O.(1984). Computer-Generated Holograms with Pulse-Density *Journal of Optical Society of America A*1, 5-10.
- [15] WYROWSKI, F.(1989). Iterative quantization of digital amplitude holograms. *Applied Optics*, vol. 28, nº18, pp.3864-3870.
- [16] WYROWSKI, F.(1989). Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blase phase structures. *Journal of Optical Society of America A*, vol.7, nº6, pp.961-969.
- [17] TURUNEN, J. ; WYROWSKI, F. (1997) - In : *Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications* (Akademie Verlag, Alemanha).
- [18] Y. FU et al.Temporal wavelet analysis for deformation and velocity measurement in speckle interferometry. In: SPIE Optical Engineering Press, ISSN 0091-3286,1994.
- [19] ARSENAULT H.; SHENG Y. An Introduction to Optics in Computers. In: SPIE Optical Engineering Press, ISBN 0-8194-0825-5, 1992.
- [20] NETO; L. G. et al (2003). Design, fabrication and characterization of a full complex-amplitude modulation diffractive optical element. *Journal of Microlithography Microsystems and Microfabrication*, vol.2, nº2, pp. 96-104.
- [21] PIZOLATO JUNIOR; J. C. Novas Técnicas de contraste de fase para a verificação de padrões cifrados, [Tese], Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- [22] ICHIOKA, Y.; IZUMI, M.; SUZUKI, T.(1971). Scanning halftone plotter and computer-generated continuous-tone hologram. *Applied Optics* vol. 10(2), pp. 403.
- [23] CAULFIELD, H. J.; MUELLER P. et al (1983). Continuous tone holograms by halftoning. In: PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 437.
- [24] PINHASI, Y.; PERI, D.(1993). “A generalized analysis of binary half-tone representation of images”.*Optics Communications*, vol. 101(3-4), pp. 277-285.

- [25] PIZOLATO JUNIOR, J. C.; et al.(2007). Zeroth-order phase-contrast technique, *Applied Optics*, vol. 10. No prelo.
- [26] MERZLYAKOV, N. S.; MOZEROV, M. G. (1998). “Computer-generated True-color Rainbow Holograms”.*Optics and Lasers in Engineering*, vol. 29, pp.369-376.
- [27] SANDO, Y.; ITOH, M.; YATAGAI, T.(2004). “Color computer-generated hologram from projection images”. *Optical Society of America*, vol. 12(11), pp.2487-2493.
- [28]GONÇALVES, C.; et al. White light computer-generated element based on halftoning. In: XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2007, São Lourenço.
- [29] GONÇALVES, C. et al. White light computer-generated element based on halftoning. In: OSA Topical meetings, 2007, Vancouver, Canadá.
- [30] VELDKAMP, W. B.; MCHUGH, T. J. (1992).“*Binary Optics*”, Scientific American, maio, pp.92-97.
- [31] Consulte artigos em “*Applied Optics – Diffractive Optics*”. vol. 34, nº14.
- [32]GOODMAN, J.W. Foundations of Scalar Diffraction Theory. In: “*Introduction to Fourier Optics*”. McGraw-Hill Publishing Company, 1988.
- [33] HECHT, E. “*Optics*”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc,1984.
- [34] LI, M.; et al.(1996). “Optical Waveguide Fan out Elements Using Dislocated Gratings for Both Outcoupling and Phase Shifting”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, n ° 9.
- [35]VELDKAMP, W. B. “*Wireless Focal Planes: On the Road to Amacronic Sensors*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.29, nº. 2, February 1993, p.801-813.
- [36] AGRAWAL, G. P. “*Fiber-Optics Communication Systems*”, John Wiley & Sons, Inc, 1992, p.282.
- [37] SHENG.,Y; ROBERGE, D., NETO,L.G; L. SHEN e PAUL-HUS G, “*Programmable phase-mostly holograms and correlation filters*”, Laser and Opt. Tech., vol. 28, nº.2, pp.129-143, 1996

-
- [38] SHENG.,Y et al. (1996). “Optoelectronic Devices and Systems for Processing”,A. Critical Reviews Series, *SPIE Optical Engineering Press*, pp.103-127.
- [39] BULLA, D.A.P; et al. (2002)“*Design and Fabrication of SiO₂/Si₃N₄ Integrated-Optics Waveguides with Application to Free-Space Optical Interconnects*”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques - Special Issue on Selected Papers of the International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC’99.
- [40] VAN RENESSE, R.L. In: “Optical document security”, 2nd Edition, Artech House Optoelectronics Library,1997.
- [41] BRYNGDAHL, O.; WYROWSKI, F.(1990). Digital Holography - Computer-Generated Holograms. E. Wolf, *Progress in Optics XXVIII, Elsevier Science Publishers B.V.*
- [42] ROBERTO, L. B. Algoritmos para o Cálculo de Hologramas Gerados por Computador. [Dissertação], Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
- [43] BORN, M.; WOLF, E. “*Principles of Optis-Eletromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light*”, Editora Pergamon, 1980.
- [44] GONZALEZ, R. C ; WOODS, R. E. In:“Digital Image Processing”, 2nd Edition, Prentice Hall, 2002.
- [45] BRACEWELL, R. N. In: “The Fourier Transform & Its Applications”, 3rd Edition, McGraw-Hill Science/Engineering/Math ,1999.

Apêndice A

A-Transformada de Fourier

$$F\{g\} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

Onde f_x e f_y são as frequências relativas às coordenadas do plano xy .

B-Equação de Helmholtz

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, z\right) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, z) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] dx dy$$

Onde A é o espectro angular de uma perturbação U , e $\alpha = \lambda f_x$; $\beta = \lambda f_y$.

Apêndice B

Resposta impulsional, função transferência, e sistemas lineares invariantes

Muitos fenômenos físicos apresentam uma resposta a vários estímulos como sendo identicamente iguais à soma de suas várias respostas contabilizadas individualmente. Quando isto ocorre, o sistema é chamado linear. Exemplos destes são redes elétricas compostas de resistores, capacitores e resistores, que são lineares para várias entradas. Analogamente, a equação de onda descrita pela propagação da luz ao longo de muitos meios permite a análise de operações de imagem como um mapeamento linear de distribuições luminosas de um objeto em distribuições luminosas de uma imagem.

Analisar a formação de imagens utilizando-se a propriedade de linearidade é uma vasta simplificação matemática, a qual recorre-se à teoria de sistemas lineares. A vantagem de se utilizar esta teoria é a habilidade de expressar a resposta (seja corrente, tensão, amplitude da luz ou intensidade luminosa) em termos de respostas a estímulos elementares. Quando um estímulo é decomposto em uma combinação linear de pequenos estímulos, cada um destes produz uma resposta, e a resposta total é calculada como a soma de todas as respostas aos estímulos elementares.

Se a iluminação utilizada em um sistema óptico apresenta coerência espacial local, a luz pode ser descrita como um campo de valores complexos de amplitude, e é interessante descrevê-la como uma distribuição de valores reais de intensidade. Para sistemas lineares invariantes no tempo, como o caso de um sistema óptico com iluminação parcialmente coerente, a análise de

Fourier é uma ferramenta útil para simplificar os cálculos de funções de saída do sistema, no caso, as imagens reproduzidas.

A transformada de *Fourier* de uma função $g(x,y)$ é representada por $F\{g\}$ e é definida por:

$$F\{g\} \equiv \iint_{-\infty}^{\infty} g(x,y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (1)$$

onde $g(x,y)$ é a função de entrada, f_x e f_y são freqüências no plano de coordenadas.

Da mesma forma, a transformada de *Fourier* inversa é definida por:

$$F\{G\} \equiv \iint_{-\infty}^{\infty} G(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (2)$$

Considerando que a fonte luminosa esteja a uma distância considerável, de forma que seja vista como puntual, esta fonte pode ser representada por uma função delta de Dirac, definida por:

$$\delta(x,y) \equiv \lim_{N \rightarrow \infty} N^2 \exp\left[-N^2 \pi(x^2 + y^2)\right] \quad (3)$$

onde N é um valor arbitrário. A transformada de *Fourier* para a função δ é então:

$$F\{\delta(x,y)\} \equiv \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ \exp\left[-\frac{\pi(f_x^2 + f_y^2)}{N^2}\right] \right\} \equiv 1 \quad (4)$$

O espectro da função delta se estende ao longo do domínio das freqüências.

Segundo o teorema da convolução, sejam $F[g(x,y)] \equiv G(f_x, f_y)$ e $F[h(x,y)] \equiv H(f_x, f_y)$,

tem-se:

$$F\left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} g(x', y') h(x - x', y - y') dx' dy' \right\} \equiv G(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \quad (5)$$

onde x' e y' são coordenadas do plano xy .

Outra função de interesse em sistemas lineares invariantes, como um sistema óptico com iluminação parcialmente coerente, é a função transferência. No caso do holograma de *Fresnel*, sejam z a distância de um plano onde situa-se o holograma e o plano de reconstrução de sua

imagem e λ o comprimento de onda da fonte luminosa empregada no sistema óptico, a função transferência $H(f_x, f_y)$ é definida por:

$$H(f_x, f_y) = \left\{ \exp \left[j2\pi \frac{z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right], \text{ para } \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < \frac{1}{\lambda} \right. \quad (6)$$

O espectro de uma função de saída de um sistema, $G_2(f_x, f_y)$ está relacionado com o espectro de entrada $G_1(f_x, f_y)$ pela função transferência, de tal forma que:

$$G_2(f_x, f_y) \equiv H(f_x, f_y) G_1(f_x, f_y) \quad (7)$$

Para calcular a imagem de reconstrução, calcula-se a função transferência do sistema e, posteriormente, faz-se uma operação de convolução com a imagem de interesse, a fim de se obter a sua reconstrução.

Apêndice C

Amostragem no plano de frequências

O processo de holografia, tanto analógico como digital, envolve invariavelmente a criação de um campo complexo no plano do holograma, um campo que deve ser regenerado com o processo de reconstrução da frente de onda. Para hologramas gerados por computador, este campo é calculado utilizando um computador, e deve ser amostrados e os valores complexos são computados em cada ponto de amostra. Para saber quantas amostras do campo devem ser computadas, deve-se considerar que o objetivo é criar um campo do holograma que seja a transformada de *Fourier* do campo do objeto que deseja-se reproduzir. Considerando o caso do holograma de *Fresnel*, a relação entre a largura de banda do campo do holograma e o tamanho do objeto pode ser aproximada por uma função. Um objeto no caso é visto como uma função $U_0(x, y)\exp\left[j\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right]$, onde U_0 é a amplitude da intensidade luminosa, x e y são coordenadas espaciais, λ é o comprimento de onda da iluminação e z é a distância entre o plano do holograma e o plano de reconstrução, como visto na Figura A1. A presença de uma distribuição de fase ao longo do objeto não afeta a distribuição de intensidade, que é a quantidade que deseja-se recriar através do campo do holograma. As larguras de banda do holograma podem ser obtidas, de acordo com Goodman[32] como :

$$2B_x = \frac{L_{x'} + L_x}{\lambda z} \quad (1)$$

$$2B_y = \frac{L_{y'} + L_y}{\lambda z} \quad (2)$$

onde $L_{x'}, L_x, L_{y'}, L_y$ são freqüências espaciais locais e B_x e B_y são as larguras de banda nas direções dos eixos x e y respectivamente.

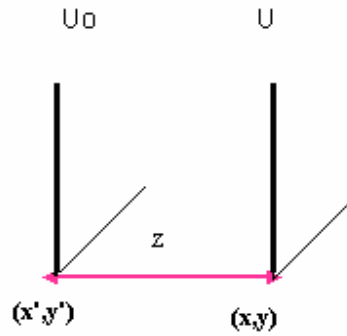


FIGURA A1-Ilustração do holograma de *Fresnel*; (x, y) são as coordenadas do plano do holograma e (x', y') as coordenadas do plano de reconstrução.

A largura de banda depende da extensão do campo de um objeto e do campo do holograma.

Os intervalos de amostragem nos eixos x e y neste caso são definidos como:

$$\Delta x = \frac{\lambda z}{L_{x'} + L_x} \quad (3)$$

$$\Delta y = \frac{\lambda z}{L_{y'} + L_y} \quad (4)$$

Sendo assim, o número total de amostras em x e y , necessárias para reconstruir o objeto através do holograma é:

$$N_x = \frac{L_x}{\Delta_x} \quad (5)$$

$$N_y = \frac{L_y}{\Delta_y} \quad (6)$$

De acordo com as equações 1 a 6, observa-se que para cada comprimento de onda há um determinado número de amostras requeridas e um intervalo de amostragem. Todas as contribuições provenientes da luz branca, ou seja, vários comprimentos de onda são somados a fim de se obter a imagem de reconstrução resultante, segundo o princípio da superposição. Estes valores podem ser alterados conforme o comprimento de onda da iluminação utilizada. Considerando que neste trabalho foi utilizada luz branca, cujo comprimento de onda médio $\bar{\lambda}$ é da ordem de 633 nm, a soma de várias contribuições relativas a vários comprimentos de onda vai gerar a imagem de reconstrução.

Dedicatória

“À minha mãe, minha primeira e grande professora”.

Agradecimentos

Ao professor Dr. Luiz Gonçalves Neto, pela orientação e amizade durante a elaboração deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP pela colaboração e amizade.

Ao Dr. José Carlos Pizolato Junior, pelo apoio e auxílio durante a execução deste trabalho.

A meus pais, José Carlos e Rosely, aos quais agradeço pela compreensão, paciência e apoio oferecido para a conclusão de meus estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
Capítulo 1	1
1-Introdução	1
Capítulo 2	5
2-ÓPTICA DIFRATIVA	5
Capítulo 3	11
3- HOLOGRAFIA	11
Capítulo 4	18
4-COERÊNCIA DE UMA FONTE LUMINOSA	18
4.1-O EXPERIMENTO DE YOUNG	18
Capítulo 5	24
5-O ELEMENTO DE LUZ BRANCA.....	24
5.1-A TÉCNICA DE <i>HALFTONING</i>	24
5.2-PROCESSO DE CODIFICAÇÃO DO ELEMENTO DE LUZ BRANCA.....	26
5.3-SIMULAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO ELEMENTO DE LUZ BRANCA	27
5.4- SIMULAÇÃO DO EOD DE LUZ BRANCA	32
5.5-CONSTRUÇÃO DO ELEMENTO DE LUZ BRANCA.....	37
Capítulo 6	41

6-RESULTADOS EXPERIMENTAIS	41
6.1- MEDIDA DO CONTRASTE	41
Capítulo 7	53
7-CONCLUSÕES	53
Capítulo 8	55
8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
Apêndice A	60
A-TRANSFORMADA DE FOURIER	60
B-EQUAÇÃO DE HELMHOLTZ	60
Apêndice B	61
RESPOSTA IMPULSIONAL, FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA, E SISTEMAS LINEARES INVARIANTES.....	61
Apêndice C	64
AMOSTRAGEM NO PLANO DE FREQUÊNCIAS	64
Anexo A	67
Anexo B	68

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1- Princípio de Huygens-Fresnel [33], onde cada ponto de uma frente de onda incidente age como uma nova fonte de onda esférica, cuja interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica por sua vez nos dá uma nova frente de onda. 5
- FIGURA 2-Obtenção de uma distribuição de luz desejada utilizando-se um Elemento Óptico Difractivo para a modulação de uma frente de luz incidente. 6
- FIGURA 3- Os *EODs* podem ser classificados em três grupos [34]: (a) espaço-livre para espaço-livre; (b) onda-guiada para onda-guiada; e (c) onda-guiada para espaço-livre (ou espaço-livre para onda-guiada). 7
- FIGURA 4- (a)Holograma rainbow convencional, (b) cédula monetária de 20 reais, emitida pelo Banco do Brasil, utilizando um holograma *rainbow* como elemento de identificação; e (c) detalhe do holograma impresso na cédula de 20 reais.No holograma, são vistas duas imagens do mico-leão-dourado e da inscrição “20”. 8
- FIGURA 5- Comparação entre a Holografia Clássica e a Holografia Computacional. 11
- FIGURA 6- Reconstrução óptica de um EOD iluminado por uma onda plana monocromática coerente. (A) Reconstrução de um holograma de Fourier (difração de Fraunhofer) utilizando-se uma lente de Fourier; (B) Reconstrução de um holograma de Fresnel (difração de Fresnel), obtido pela propagação da luz de $g(x',y')$ pela distância d [20]. 13

FIGURA 7-Diagrama esquemático do método iterativo da transformada de <i>Fourier</i> (<i>Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA</i>) para o cálculos de hologramas em regime de modulação de fase ou de amplitude, com a reconstrução em intensidade [42].	14
FIGURA 8-Janela de reconstrução, localizada no centro do plano de reconstrução, utilizada para melhorar a reconstrução do holograma. Fora da região g_r de dimensões $A \times B$, a fase e a amplitude da distribuição $g(x,y)$ pode variar livremente [42].	16
FIGURA 9-Difração da luz por duas fendas, produzindo máximos e mínimos de intensidade luminosa, observados como franjas de interferência claras e escuras.	18
FIGURA 10-Diferença de caminhos entre dois feixes de luz que incidem na parte inferior e superior da fenda, em destaque.	19
FIGURA 11-Relação entre a distância entre dois pontos espacialmente coerentes emergindo de uma fonte luminosa de diâmetro ρ , de comprimento de onda $\bar{\lambda}$, a uma distância R de propagação.	21
FIGURA 12(a)- Imagem original de Lenna 128x128 pixels;(b) Imagem obtida a partir da imagem original,	24
FIGURA 13- Técnica de <i>halftoning</i> aplicada a uma imagem com 17 níveis de cinza.	25
FIGURA 14-Projeto do EOD para uma informação binária	26
FIGURA 15-Diagrama do algoritmo para o cálculo da propagação da luz modulada pelos	27
FIGURA 16-(a)pixel tipo I e (b)sua respectiva intensidade de propagação.	28
FIGURA 17- (a)Pixel tipo II e (b) intensidade de propagação do pixel tipo II.	28
FIGURA 18-(a) Modelo proposto para o pixel tipo I ; (b) sua representação como função $rect(x)$ e (c) sua transformada de <i>Fourier</i> , $\sin c(s)$	29

-
- FIGURA 19- Modelo para o pixel tipo II e (b) sua representação como função $-\frac{1}{2}\prod\left(x+\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}\prod\left(x-\frac{1}{2}\right)$; e (c) sua transformada de *Fourier*, $-i \sin c(s) \sin c(\pi s)$ 30
- FIGURA 20- Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da resposta impulsional dos pixels tipo I. 32
- FIGURA 21- Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da resposta impulsional dos pixels tipo II. 32
- FIGURA 22- Reconstrução simulada para o holograma gerado a partir da figura Lenna para uma distância do plano do holograma ao plano de reconstrução de (a) 0 cm e (b) 2 cm. 33
- FIGURA 23- Figuras utilizadas no algoritmo para gerar o holograma de luz branca: (a) Lenna; (b) tigre, (c) periquito; (d) gato. 34
- FIGURA 24- Reconstrução simulada para o holograma gerado a partir das figuras (a) Lenna, (b) tigre, (c) periquito e (d) gato, para uma distância do plano do holograma ao plano de reconstrução de 2 cm. Estas figuras são as mesmas utilizadas para a fabricação do elemento de luz branca. 35
- FIGURA 25- Visão esquemática da seqüência do processo de fabricação do EOD no modo transmissão. Devido ao baixo custo de fabricação foi utilizada uma máscara que consiste de um filme transparente tipo fotolito. O padrão a ser transferido foi impresso no filme transparente por uma plotter com máxima definição 15 μ m (AGFA AVANTRA 30e 2400 dpi). Nenhuma máscara gerada por feixe de elétrons é necessária. 38

FIGURA 26- Montagem do holograma de luz branca realizada no laboratório de óptica do departamento de engenharia elétrica da EESC-USP. No plano posterior, observa-se o anteparo, onde a imagem é projetada.	39
FIGURA 27- Lâmpada dicróica halógena 12V, 50W, $\bar{\lambda}=633$ nm, da marca OSRAM, utilizada para obtenção da reconstrução óptica do elemento de luz branca.	41
FIGURA 28- Montagem experimental para cálculo do grau de coerência realizada através de três metodologias: difração por uma fenda dupla, difração através de uma grade de difração e difração através do elemento de luz branca.	42
FIGURA 29- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “Lenna” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.	47
FIGURA 30- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “gato” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.	48
FIGURA 31- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “tigre” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.	49
FIGURA 32- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “periquito” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.	50

LISTA DE TABELAS

TABELA I. Contrastes determinados através da difração por uma grade de difração obtido com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul43

TABELA II. Contrastes determinados através da difração por uma fenda dupla obtido com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....44

TABELA III.(a) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca Lenna obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....44

TABELA III.(b) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca gato obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....45

TABELA III.(c) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca tigre obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....45

TABELA III.(d) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca periquito obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.....46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

EOD – Elemento Óptico Difractivo

FFT – Fast Fourier Transform

FT- Fourier Transform

IFTA – Iterative Fourier Transform Algorithm

USP-Universidade de São Paulo

POLI- Escola Politécnica da USP

RESUMO

Palavras-chave: hologramas gerados por computador, luz branca, halftoning.

Hologramas podem ser produzidos utilizando-se técnicas tradicionais de holografia ou podem ser gerados também por computador, conhecidos como hologramas gerados por computador (HGCs). A maioria destes hologramas opera usando luz monocromática. Por outro lado, os hologramas podem também operar com luz branca. Estes elementos de luz branca são usados em diversas aplicações, como segurança, para verificar a autenticidade dos cartões de crédito e outros documentos, porque seus processos de fabricação são difíceis e caros de serem reproduzidos. Entretanto, os hologramas de luz branca convencionais operam baseados na reflexão da luz, e apresentam alguns efeitos indesejáveis, como distorções cromáticas, como o efeito *rainbow*.

Neste trabalho foi proposto um elemento óptico difrativo de luz branca gerado por computador. O elemento é calculado baseado na técnica de halftoning e na coerência espacial parcial de uma fonte de luz branca estendida. Os elementos da fase são produzidos através de técnicas de fabricação bem estabelecidas de circuitos integrados, e as simulações óticas são apresentadas. Não há necessidade de métodos iterativos.

Os resultados das reconstruções óticas e simuladas deste elemento de luz branca são muito semelhantes e produzem imagens nítidas, não sendo observadas distorções cromáticas.

O elemento de luz branca ainda não foi descrito na literatura, e algumas de suas aplicações podem ser um correlator óptico ou arte holográfica.

Este trabalho foi realizado no laboratório de óptica do departamento da engenharia elétrica do EESC, e financiado por CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

ABSTRACT

Keywords: Computer –generated holograms, white light, halftoning.

Holograms can be produced using traditional holography techniques or may be also generated by computer, which are known as CGHs(Computer-generated holograms). Most of these holograms operate using monochromatic light. On the other hand, holograms can also operate with white light. These white light holograms are used in several applications, such as security, to verify the authenticity of credit cards and other documents, because their fabrication processes are difficult to reproduce and are expensive. However, conventional white light holograms operate based on reflection of light, and present some undesirable effects, like chromatic distortions, such as rainbow effect.

In this work it was proposed a computer-generated phase optical diffractive element designed to operate under white light illumination. The element is calculated based on the halftoning technique and in the partial spatial coherence of a white light extended source. Phase elements are manufactured using well-established integrated circuits fabrication techniques and optical simulations are shown. No iterative methods are necessary.

Simulated and optical reconstruction results are very similar and produce good clear images, and no chromatic distortions are observed.

The white light element was not yet described in literature, and some of its applications may be an optical correlator or holographic art.

This work was carried out at the laboratory of optics of the department of electrical engineering of the EESC, and supported by CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Capítulo 1

1-Introdução

A técnica de holografia clássica foi proposta por Gabor [1], em 1948, ao observar que uma frente de onda de referência em coerência com a luz difratada ou espalhada por um objeto permite que as informações de amplitude e de fase das ondas difratadas sejam gravadas. Esta mesma técnica foi utilizada por Denisyuk [2] e Benton [3] utilizando iluminação não-coerente na fabricação de hologramas. Denisyuk combinou as técnicas de holografia convencional de Gabor e de fotografia colorida para a produção de hologramas que poderiam ser vistos através de uma iluminação não-coerente de um bulbo incandescente. Já os hologramas de Benton, também conhecidos como hologramas *rainbow*, empregavam a iluminação não-coerente de uma luz branca para visualizar o holograma. Estes hologramas minimizavam o efeito de distorções cromáticas, porém ocorria perda de informação gravada em uma dimensão.

Após a descoberta do laser nos anos 60, trabalhos de holografia convencional que utilizavam como fonte de iluminação coerente de um laser foram divulgados [4-6]. Além dos métodos holográficos convencionais, vários outros foram propostos para o cálculo de hologramas gerados por computador (HGCs), entre eles o algoritmo iterativo da transformada de Fourier (*Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA*), introduzido na holografia digital por Gerchberg & Saxton [7] e por Hirsh et al. [8]; o desvio de fase de Brown & Lohmann [9-11]; o holograma binário sintético em amplitude de Lee [12]; a pesquisa binária direta, de Seldowitz et al. [13]; o holograma com modulação de densidade de pulso de Hanck & Bryngdahl [14] e a quantização iterativa de hologramas de amplitude digital de Wyrowski [15].

O *IFTA* foi posteriormente modificado por Wyrowski [15-17], que implementou neste algoritmo o conceito de liberdade de fase durante as iterações para o cálculo de hologramas com

modulação em níveis discretos. Infelizmente, este método numérico requer várias iterações, além de geralmente introduzir ruído do tipo *speckle* no plano de reconstrução [18,19].

Neto et al. [20] propuseram a implementação de hologramas digitais de modulação completa de amplitude e fase. Cada pixel do elemento é composto por duas regiões de relevo de fase que podem assumir valores de fase 0 e $\pi/2$, $\pi/2$ e π , π e $3\pi/2$, ou $3\pi/2$ e 0 . A modulação de amplitude é obtida removendo pequenas partes de uma camada de alumínio depositada sobre o relevo de fase de cada pixel.

Hologramas gerados por computador obtidos por *halftoning* [21] foram investigados por Ishioka [22], Caulfield [23] e Pinhasi [24], porém esta técnica foi utilizada para gerar uma máscara utilizada para produção de hologramas operando em iluminação monocromática coerente. Recentemente, Pizolato et al. [25] utilizaram a técnica de *halftoning* para projetar hologramas de fase binários que funcionam com iluminação coerente. Cada pixel é constituído por duas regiões de relevo de fase que podem assumir valores de fase 0 e π . O projeto deste EOD dispensa cálculos iterativos computacionais e a fabricação do mesmo é realizada utilizando técnicas tradicionais de circuitos integrados.

A maioria dos trabalhos recentes que abordam holografia computacional utilizando luz branca descreve hologramas *rainbow* reconstruídos a partir da superposição de imagens de projeção de três ou mais hologramas produzidos em três cores diferentes [26,27]. Neste trabalho é proposto um EOD gerado por computador baseado na técnica de *halftoning* que utiliza iluminação não-coerente [28,29](vide anexos A e B). Este EOD apresenta as seguintes vantagens em relação aos trabalhos até então publicados: o método para a geração do EOD não utiliza processos computacionais iterativos e as imagens reproduzidas não apresentam distorções cromáticas visíveis ao olho humano. Estes EODs correspondem a elementos de fase binários e são produzidos através de técnicas de fabricação bem estabelecidas de circuitos integrados. O

EOD de luz branca aqui proposto pode ser empregado em processamento óptico, sistemas de segurança para verificação da autenticidade de documentos, cartões de crédito e processos de fabricação de produtos.

A apresentação do trabalho está organizada conforme a seqüência. No Capítulo 2 são explicados alguns conceitos sobre elementos ópticos difrativos (EOD) e difração. O Capítulo 3 aborda os hologramas clássicos e digitais, que são um tipo de EOD. No Capítulo 4 são abordados os tópicos de coerência de uma fonte de onda luminosa. O Capítulo 5 apresenta o EOD de luz branca abordando projeto, funcionamento e construção. No Capítulo 6 são apresentados resultados experimentais da reconstrução óptica obtida com o EOD de luz branca proposto. Conclusões e considerações sobre o trabalho são realizadas no Capítulo 7. Referências bibliográficas são apontadas no Capítulo 8.

Capítulo 2

Introdução

O EOD apresentado neste trabalho funciona segundo os princípios da óptica difrativa. Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais de difração e óptica difrativa.

2-Óptica difrativa

A óptica difrativa ou óptica binária [30] é uma nova tecnologia que elimina quase todas as etapas dos métodos tradicionais (abrasão e polimento) para a fabricação de elementos ópticos. Por operarem segundo os princípios da difração, estes elementos ópticos são denominados Elementos Ópticos Difrativos (EOD) [31].

Elementos ópticos difrativos são estruturas que difratam a luz, gerando uma distribuição de luz desejada. Segundo o princípio de Huygens-Fresnel [32,33], ilustrado na Figura 1, quando um elemento óptico difrativo é iluminado por uma frente de onda. Cada ponto da nova frente de onda Σ que emerge da superfície do elemento age como uma fonte de luz pontual, gerando ondas esféricas de raio r' . A interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica gera uma nova frente de onda Σ' .

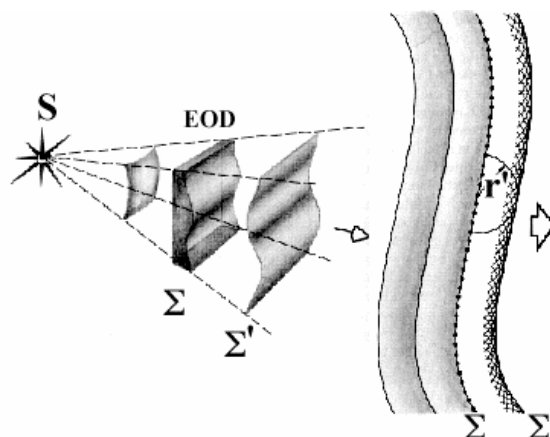


FIGURA 1- Princípio de Huygens-Fresnel [33], onde cada ponto de uma frente de onda incidente age como uma nova fonte de onda esférica, cuja interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica por sua vez nos dá uma nova frente de onda.

Hologramas gerados por computador, redes de difração e microlentes de Fresnel são alguns exemplos de EODs que podem ser obtidos por intermédio de relevos gravados na superfície de um material transparente ou reflexivo, ou por padrões gravados em filmes fotográficos. Estes relevos ou padrões impõem uma modulação espacial na fase da luz incidente [30] que, após sofrer o efeito da difração, resulta em uma distribuição luminosa desejada em algum plano próximo do elemento difrativo, como é ilustrado na Figura 2. Geralmente, por ser necessário apenas introduzir um pequeno atraso na fase ou o bloqueio em cada ponto da frente de onda incidente, os EODs podem ser mais finos e leves que os elementos ópticos convencionais (refrativos).

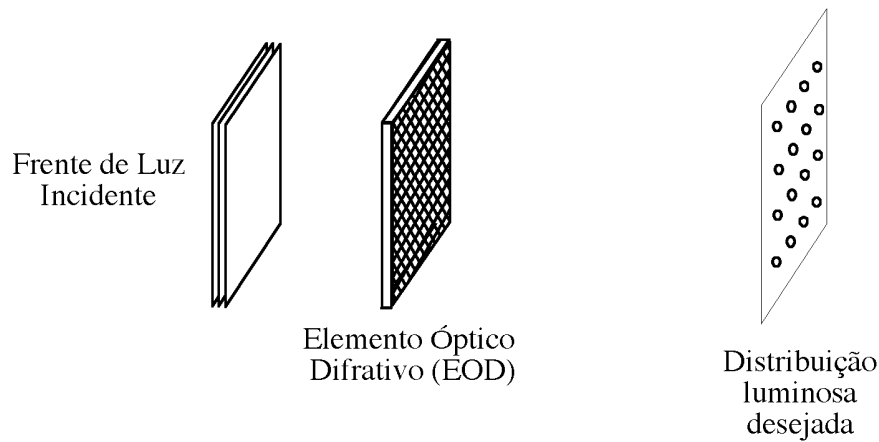


FIGURA 2-Obtenção de uma distribuição de luz desejada utilizando-se um Elemento Óptico Difractivo para a modulação de uma frente de luz incidente.

Os EODs são projetados com base nas propriedades de difração de sua superfície, geralmente uma interface micro-estruturada com detalhes geométricos próximos ao comprimento de onda da luz. Como geralmente é utilizada a teoria escalar da difração [18] para o cálculo destes elementos, as dimensões das micro-estruturas abordadas são maiores que 10λ , onde λ é o comprimento de onda da luz incidente. Várias distribuições ópticas podem ser “gravadas” em um EOD modificando-se a geometria das microestruturas, que podem ser fabricadas utilizando as técnicas inicialmente desenvolvidas para a fabricação de circuitos integrados eletrônicos: litografia óptica, corrosão por plasma, deposição de filmes finos, corrosão úmida e litografia por feixe de elétrons. Estas técnicas podem gravar diretamente na superfície de qualquer material óptico as mais variadas geometrias, em dimensões extremamente reduzidas. Podem-se produzir dispositivos de alta qualidade em série, com propriedades ópticas complexas e impossíveis de serem implementadas com a tecnologia tradicional. A geometria dos elementos é obtida por cálculo numérico, considerando a difração da luz, as características ópticas do material utilizado (óxido de silício, nitreto de silício, *DLC*, etc.) e das micro-estruturas a serem projetadas.

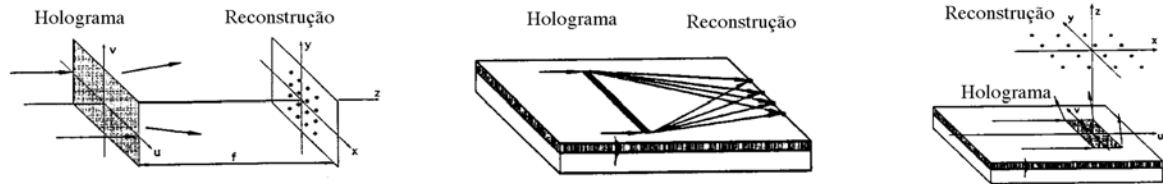


FIGURA 3- Os *EODs* podem ser classificados em três grupos [34]: (a) espaço-livre para espaço-livre; (b) onda-guiada para onda-guiada; e (c) onda-guiada para espaço-livre (ou espaço-livre para onda-guiada).

De acordo com as características de entrada e saída das ondas, os *EODs* podem ser classificados em três grupos [34]: (1) espaço-livre para espaço-livre; (2) onda-guiada para onda guiada; e (3) onda-guiada para espaço-livre (ou espaço-livre para onda-guiada). Exemplos destes três tipos de *EODs* são ilustrados com hologramas na Figura 3. Os hologramas do tipo (1) são chamados de espaço-livre para espaço-livre pois nenhuma onda guiada está envolvida. Por outro lado, guias de onda ópticos estão envolvidos nos grupos (2) e (3).

Entre as inúmeras aplicações desta tecnologia podem-se citar: fabricação de microlentes para sistemas de visão artificial [35], implementação de multiplexadores e demultiplexadores de luz [36], filtros holográficos para aplicações em reconhecimento de objetos e alvos [37,38], conexões ópticas e distribuição de sinais de relógio em micro-circuitos [38], correção da aberração cromática em sistemas ópticos [30,35], modulação e correção da luz laser; redes de difração; acoplamento entre laser e fibras ópticas [34] acoplamento entre fibra óptica e sensores [34], guias de onda [34,39], discos holográficos para a armazenagem de informações [31].

Dentre os *EODs* estão os hologramas *rainbow* [40] que podem ser replicados em larga escala utilizando técnica de *embossing* de baixo custo. Com esta metodologia, os hologramas podem ser replicados a um custo muito baixo. O primeiro passo da técnica é gravar um

holograma com um objeto de interesse, em fotorresiste. Posteriormente, um laser é utilizado em processo de gravação, e o fotorresiste é exposto, produzindo um relevo que é coberto com um spray de prata. Esta máscara é imersa em um tanque com um eletrodo de níquel e uma corrente passa através do mesmo, depositando uma fina camada de níquel sobre a mesma, através de um processo de eletrodeposição. Esta camada de níquel é separada do fotorresiste e este relevo metálico criado é utilizado como uma espécie de carimbo no processo de reprodução.

Entre os processos de *embossing* muito conhecidos está o *hot-embossing*. Por este motivo, estes EODs foram rapidamente difundidos em aplicações de segurança na forma de selos holográficos para a verificação da autenticidade de produtos como cartões de créditos, livros, revistas, cédulas monetárias, CDs e DVDs. Na Figura 4 são ilustrados alguns exemplos de hologramas *rainbow* utilizados na verificação da autenticidade de cartões de crédito e cédulas monetárias.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4- (a)Holograma rainbow convencional, (b) cédula monetária de 20 reais, emitida pelo Banco do Brasil, utilizando um holograma *rainbow* como elemento de identificação; e (c) detalhe do holograma impresso na cédula de 20 reais.No holograma, são vistas duas imagens do mico-leão-dourado e da inscrição “20”.

Neste trabalho, os esforços foram centrados para o domínio da teoria, projeto e fabricação de EODs envolvidos no grupo (1): hologramas gerados por computador do tipo espaço-livre para espaço-livre, como ilustrado pela Figura 3(a) submetidos a iluminação não-coerente (luz branca por exemplo), com baixa distorção cromática e baixo custo de produção.

Capítulo 3

Introdução

O EOD de luz branca abordado neste trabalho é um elemento óptico difrativo gerado por computador, que funciona sob iluminação parcialmente coerente em uma região localizada. Neste capítulo são apresentadas as diferenças básicas entre holografia clássica e digital. Atenção especial será dedicada aos hologramas gerados por computador.

3- Holografia

Na Holografia Clássica, as ondas de uma frente de luz são "armazenadas" em um holograma utilizando a interferência como processo de gravação. Na holografia computacional, as ondas são "armazenadas sinteticamente" no holograma utilizando cálculos computacionais. Em ambos os processos, a reconstrução óptica das ondas gravadas é obtida pela difração da luz. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos indicando a diferença entre os processos [41].

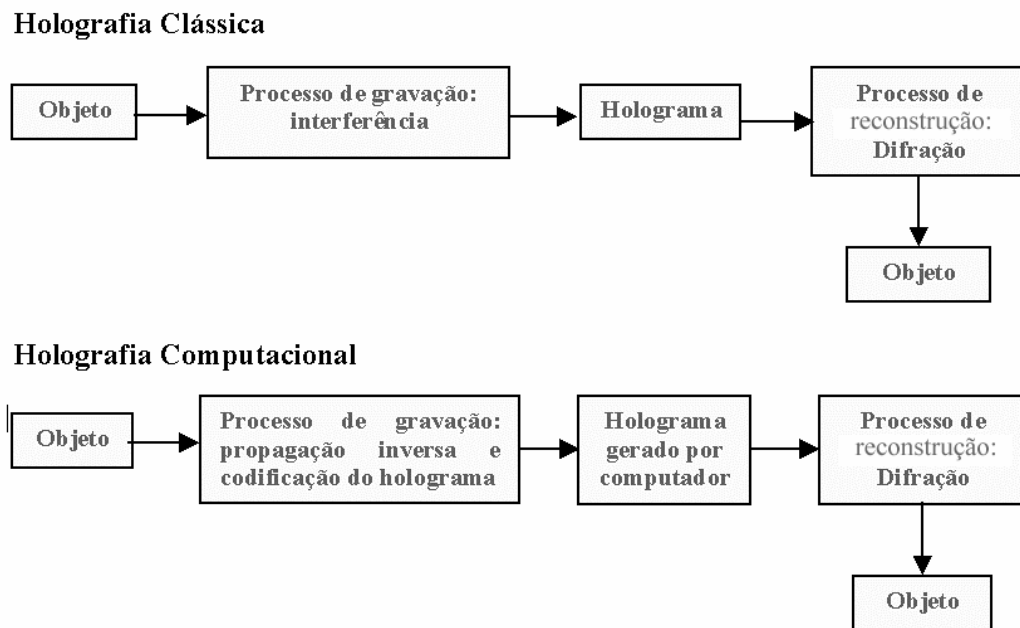


FIGURA 5- Comparação entre a Holografia Clássica e a Holografia Computacional.

Os hologramas gerados por computador são projetados por cálculo computacional considerando a difração escalar da luz [18], as características ópticas do meio em que o holograma será fabricado, que poderá ser uma distribuição de fase ou amplitude, e as características da distribuição de luz no plano de reconstrução do holograma.

É possível escolher entre o projeto de um holograma de *Fourier* ou de *Fresnel*. Um holograma de *Fourier* utiliza a difração de *Fraunhofer* para o cálculo da propagação da luz do plano do holograma ao plano de reconstrução, que também é implementada opticamente utilizando-se uma lente de Fourier para se obter a reconstrução óptica, como mostrado na Figura 6(a). Um holograma de *Fresnel* utiliza a difração de *Fresnel* ou a filtragem espacial para o cálculo da propagação da luz no espaço livre entre o plano do holograma ao plano de reconstrução óptica, como mostrado na Figura 6(b). O cálculo da difração pela filtragem espacial

é realizado considerando a solução da equação de *Helmholtz* (vide Apêndice A) no domínio da frequência [32].

Se o holograma é iluminado por uma onda plana monocromática uniforme e coerente, com distribuição espacial de amplitudes igual a 1, logo após o holograma a distribuição de luz possui a forma: $I \times g(x',y') = g(x',y')$. A propagação da luz da distribuição $g(x',y')$ resulta na distribuição óptica $g(x,y)$, localizada no plano de reconstrução.

No cálculo do holograma, as seguintes etapas devem ser consideradas:

- a) Determinação da distribuição $g(x',y')$ que deve ser gerada no plano do holograma. O cálculo desta distribuição começa pelo cálculo da propagação inversa da distribuição de luz $f(x,y)$ a partir do plano de reconstrução, indo ao plano do Holograma. Pretende-se determinar uma distribuição $g(x',y')$ que gere o mais fielmente possível a reconstrução $g(x,y)$ a distribuição $f(x,y)$, com $0 \leq |f(x,y)| \leq 1$ e $0 \leq \alpha |g(x,y)| \leq 1$, onde α é um fator de escala real e positivo. A distribuição $f(x,y)$ precisa estar disponível de forma a permitir a manipulação computacional (geralmente valores discretos de amplitude).

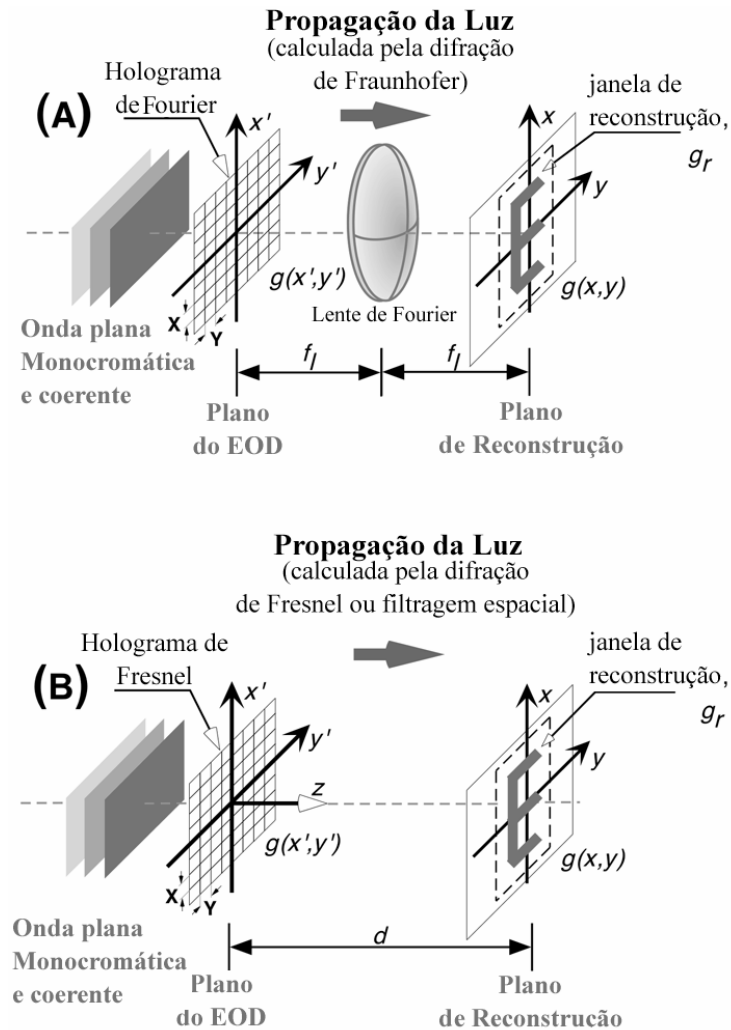


FIGURA 6- Reconstrução óptica de um EOD iluminado por uma onda plana monocromática coerente. (A) Reconstrução de um holograma de Fourier (difração de Fraunhofer) utilizando-se uma lente de Fourier; (B) Reconstrução de um holograma de Fresnel (difração de Fresnel), obtido pela propagação da luz de $g(x',y')$ pela distância d [20].

- b) A distribuição $f(x',y')$ resultante da propagação inversa da luz geralmente apresenta uma distribuição complexa de valores de fase e amplitude, que devem ser adaptados para as possíveis distribuições $g(x',y')$ do holograma, que neste caso é uma distribuição apenas de fase ou amplitude. As limitações físicas e práticas do meio em que será gravado o

holograma irão determinar a escolha do método numérico utilizado para esta implementação.

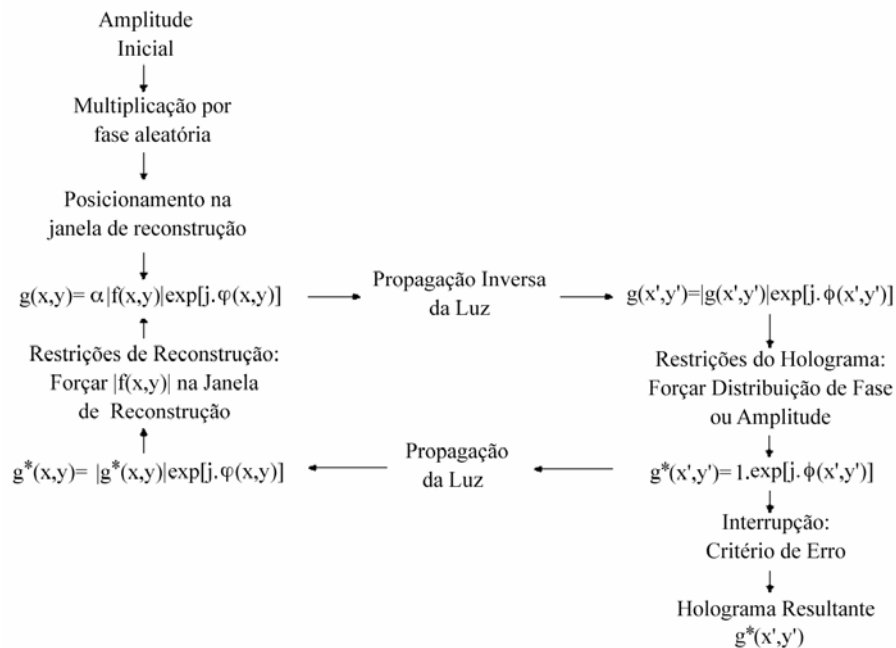


FIGURA 7-Diagrama esquemático do método iterativo da transformada de *Fourier* (*Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA*) para o cálculos de hologramas em regime de modulação de fase ou de amplitude, com a reconstrução em intensidade [42].

O objetivo do cálculo do holograma é formar uma distribuição de luz no plano de reconstrução. Uma distinção é feita entre objetos de amplitude complexa (fase e amplitude determinadas) e objetos de intensidade determinada (apenas amplitude determinada). Desta maneira, para objetos de amplitude complexa tem-se:

$$f(x,y) = |f(x,y)| \exp[i\varphi(x,y)] \quad (1)$$

e para objetos de intensidade $i(x,y)$ tem-se:

$$|f(x,y)|^2 = i(x,y) \quad (2)$$

onde os valores do argumento $\varphi(x,y)$ de $f(x,y)$ possuem total liberdade, podendo assumir quaisquer valores. Desta maneira tem-se:

$$f(x,y) = \sqrt{i(x,y)} \exp[i\varphi(x,y)] \quad (3)$$

Vários métodos foram propostos para o cálculo de hologramas por computador, entre eles o algoritmo iterativo da transformada de *Fourier* (*Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA*), introduzido na holografia digital por Gerchberg & Saxton [7] e por Hirsh et al. [8].

O *IFTA*, descrito na Figura 7, oferece os melhores resultados práticos na codificação de hologramas gerados computador com comprimento de banda (*SBP - Space Band Bandwith Product*) de 256x256 ou mais células (*pixels*). O *IFTA* foi posteriormente modificado por Wyrowski [16], que implementou neste algoritmo o conceito de liberdade de fase durante as iterações para o cálculo de hologramas com modulação em níveis discretos.

No *IFTA*, uma iteração é realizada calculando-se a propagação inversa da luz do plano de reconstrução ao plano do holograma, onde as restrições do holograma são aplicadas (imposição de uma distribuição de fase). Na seqüência, calcula-se a propagação da luz do plano do holograma ao plano de reconstrução, onde as restrições referentes a distribuição desejada são aplicadas (determinar a intensidade da reconstrução desejada $i(x,y)$). Para objetos em intensidade, atribui-se uma distribuição de fase aleatória a $\varphi(x,y)$ na primeira iteração para auxiliar a convergência do algoritmo.

Infelizmente, este método numérico requer várias iterações, além de geralmente introduzir ruído do tipo *speckle* no plano de reconstrução. Cem ou mais iterações são necessárias dependendo da complexidade da reconstrução desejada $f(x,y)$ ou $i(x,y)$. Também é possível que não exista uma distribuição de fase ou amplitude $g(x',y')$ que satisfaça $g(x,y) \approx \alpha f(x,y)$ ou $|g(x,y)| \approx \alpha [i(x,y)]^{1/2}$ sobre toda a região do plano de reconstrução [42].

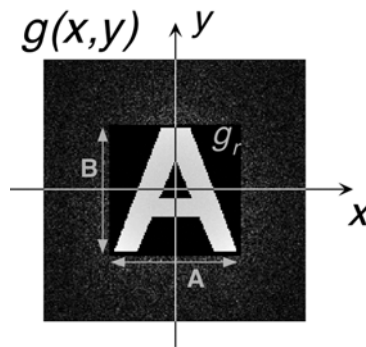


FIGURA 8-Janela de reconstrução, localizada no centro do plano de reconstrução, utilizada para melhorar a reconstrução do holograma. Fora da região g_r de dimensões $A \times B$, a fase e a amplitude da distribuição $g(x,y)$ pode variar livremente [42].

Liberdade nos valores dos parâmetros pode ser introduzida no *IFTA* para auxiliar na convergência numérica, como por exemplo:

- c) Liberdade de fase e amplitude para as distribuições fora da janela de reconstrução g_r , mostrada na Figura 8. Fora da região g_r , os valores de fase e amplitude de $g(x,y)$ podem variar livremente. O processo de codificação do holograma consiste em encontrar a distribuição $g(x',y')$ que satisfaça as restrições de modulação do holograma e garanta que a distribuição do objeto $f(x,y)$ está contida dentro de uma região $A \times B$ definida no plano de reconstrução $g(x,y)$, chamada de janela de reconstrução g_r .
- d) Liberdade de fase na janela de reconstrução g_r : para objetos em intensidade, a fase $\phi(x,y)$ pode variar livremente dentro da região g_r .
- e) Liberdade do fator de escala α : é possível variar α sobre a janela de reconstrução g_r de maneira a se obter uma redução do erro dentro de g_r .

Neste trabalho, o EOD de luz branca é gerado por computador e calculado sem a necessidade métodos iterativos computacionais.

Capítulo 4

Introdução

O EOD proposto neste trabalho funciona sob iluminação não-coerente. Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos sobre coerência da luz.

4-Coerência de uma fonte luminosa

4.1-O experimento de Young

Difração é um fenômeno que ocorre quando uma frente de onda luminosa atravessa um orifício ou contorna um objeto cuja dimensão é da mesma ordem de grandeza que o seu comprimento de onda λ . Segundo Sommerfeld [32], difração é definida como “qualquer desvio da trajetória de raios de luz de caminhos retilíneos que não podem ser interpretados como reflexão ou refração”. A difração é causada pelo confinamento de uma onda, quando este confinamento é comparável ao comprimento de onda da radiação incidente.

Um exemplo clássico que ilustra o fenômeno da difração é o experimento de Young [33,43], no qual uma frente de onda incidente em um anteparo com duas fendas, de largura definida a , sofre o fenômeno de difração, e surgem então pontos de máximos e mínimos de intensidade luminosa, que podem ser observados pela formação de franjas claras e escuras, como na Figura 9.

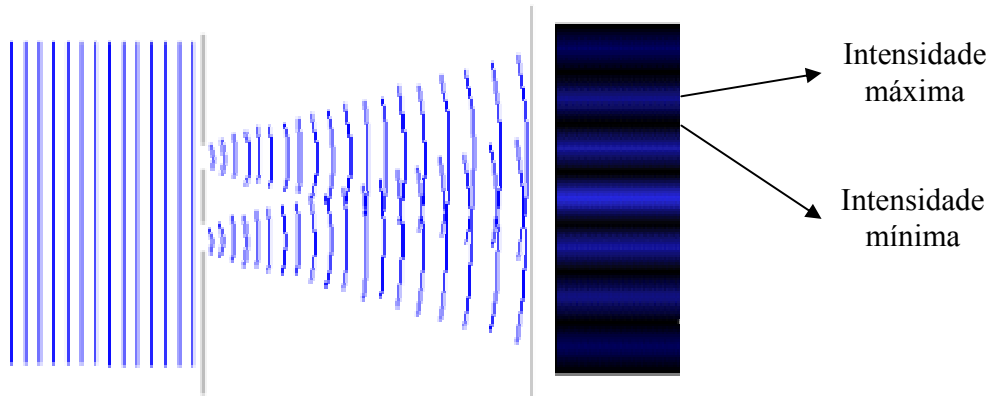


FIGURA 9-Difração da luz por duas fendas, produzindo máximos e mínimos de intensidade luminosa, observados como franjas de interferência claras e escuras.

A Figura 10 ilustra a diferença de caminhos percorridos pela onda incidente num experimento de Young. A distância entre as fendas é d e a grandeza $d \sin \theta$ é a diferença de percurso entre um feixe de luz que parte da extremidade superior da primeira fenda e outro que parte da extremidade inferior da segunda fenda. Considerando cada ponto na frente de onda uma fonte puntiforme de luz, a expressão geral dos pontos de intensidade nula na Figura de difração numa fenda é dada por:

$$m\lambda \equiv 2d \sin \theta \quad (4)$$

onde m é um número inteiro

λ é o comprimento de onda da luz incidente ;

d é a distância entre as fendas;

θ é o ângulo definido na Figura 10.

Uma ilustração da diferença de caminho entre dois feixes de luz transmitidos pela parte inferior e superior da fenda pode ser vista na Figura 10.

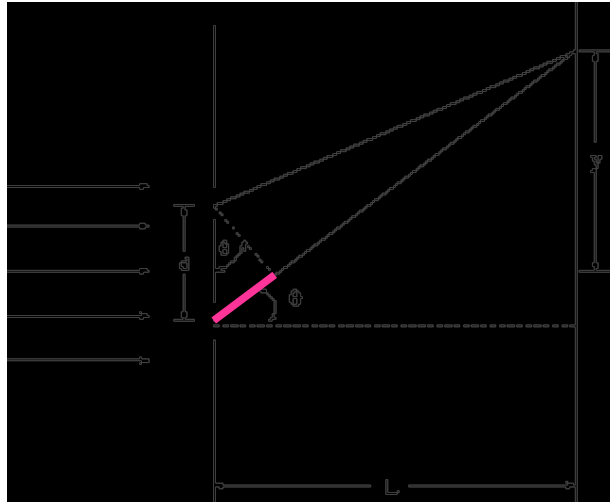


FIGURA 10-Diferença de caminhos entre dois feixes de luz que incidem na parte inferior e superior da fenda, em destaque.

Este experimento pode ser utilizado para medir o grau de coerência de uma fonte luminosa como será mostrado neste capítulo.

4.2-Coerência temporal e espacial de uma fonte luminosa

A coerência de uma fonte luminosa é a medida de correlação de fase entre ondas eletromagnéticas emitidas pela mesma. Existem dois tipos de coerência: coerência temporal e espacial.

A coerência temporal é a medida da correlação da fase de ondas eletromagnéticas em diferentes pontos ao longo da direção de propagação das ondas que emergem de uma fonte. Esta medida informa o quão monocromática é a fonte de iluminação.

Já o conceito de coerência espacial, que é utilizado neste trabalho, é definido como a medida de correlação da fase das ondas eletromagnéticas em diferentes pontos na direção transversal à direção de propagação. Esta medida determina o quão uniforme é a fase da frente de onda. A medida do grau de correlação de uma fonte luminosa pode ser definida pelo coeficiente de correlação, $\gamma_{12}(t)$. A função $\gamma_{12}(t)$ é uma função periódica de t , que considera uma medida de correlação de um trem de ondas tomada entre um intervalo de tempo definido pelos instantes t e $t + \tau$, onde t é o instante inicial, τ é um intervalo de tempo determinado e $t + \tau$ o instante final.

Analisando o módulo do valor do grau de coerência $\gamma_{12}(t)$, podem ocorrer três situações distintas:

Se $|\gamma_{12}(t)| = 1 \rightarrow$ Coerência completa;

Se $0 < |\gamma_{12}(t)| < 1 \rightarrow$ Coerência parcial;

Se $|\gamma_{12}(t)| = 0 \rightarrow$ Incoerência completa.

O conceito de coerência espacial de uma fonte luminosa policromática com diâmetro ρ e comprimento de onda de emissão médio $\bar{\lambda}$ é ilustrado na Figura 11. Sejam dois pontos consecutivos, espacialmente coerentes entre si P_1 e P_2 , cujas distâncias em relação à fonte policromática são S_1 e S_2 .

O grau de coerência da fonte, γ , pode ser determinado experimentalmente realizando-se o experimento da dupla fenda de Young, ilustrado na Figuras 9-10, Seção 4.1. Neste caso, o grau de coerência da fonte pode ser determinado por:

$$\gamma \equiv \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

onde I_{\max} e I_{\min} correspondem às intensidades máximas e mínimas obtidas no experimento.

A condição para que haja coerência espacial para uma iluminação policromática é, segundo o teorema de Van Cittert-Zernike [43], que se estabeleça uma relação entre a distância de dois pontos consecutivos coerentes, $d(P_1, P_2)$ de uma frente de onda que se propaga ao longo de uma distância R , emergindo de uma fonte luminosa estendida, de diâmetro ρ , e de comprimento de onda médio $\bar{\lambda}$, definida por (6).

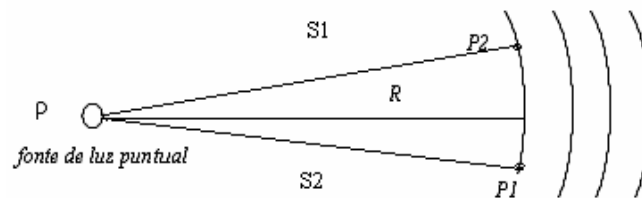


FIGURA 11-Relação entre a distância entre dois pontos espacialmente coerentes emergindo de uma fonte luminosa de diâmetro ρ , de comprimento de onda $\bar{\lambda}$, a uma distância R de propagação.

Segundo o teorema de Van Cittert-Zernike [43], para ocorrer coerência espacial da fonte luminosa ilustrada pela Figura 11 é necessário satisfazer a seguinte equação :

$$d(P_1, P_2) = \frac{0.16R\bar{\lambda}}{\rho} \quad (6)$$

onde ρ é o diâmetro da fonte de iluminação estendida; $\bar{\lambda}$ é o comprimento de onda médio da fonte luminosa ; $d(P_1, P_2)$ é a distância de dois pontos consecutivos coerentes de uma frente de onda que se propaga ao longo de uma distância R , emergindo da fonte luminosa.

A diferença de fase δ [43] entre dois pontos coerentes da frente de onda emitida pela fonte luminosa da Figura 11 é definida por :

$$\delta \equiv \frac{2\pi(S_1 - S_2)}{\bar{\lambda}} \quad (7)$$

onde $\bar{\lambda}$ é o comprimento de onda médio da fonte luminosa; S_1 e S_2 são as distâncias em relação à fonte policromática.

Capítulo 5

Introdução

Nos capítulos anteriores foram apresentados alguns conceitos necessários para a apresentação do EOD de luz branca. Neste capítulo serão apresentados o projeto, funcionamento e o processo de fabricação deste EOD.

5-O Elemento de luz branca

5.1-A técnica de *halftoning*

O método para representação de imagens em tons de cinza utilizando pixels binários é conhecido como *halftoning* [44]. Esta técnica foi utilizada neste trabalho para projetar o elemento de luz branca proposto.

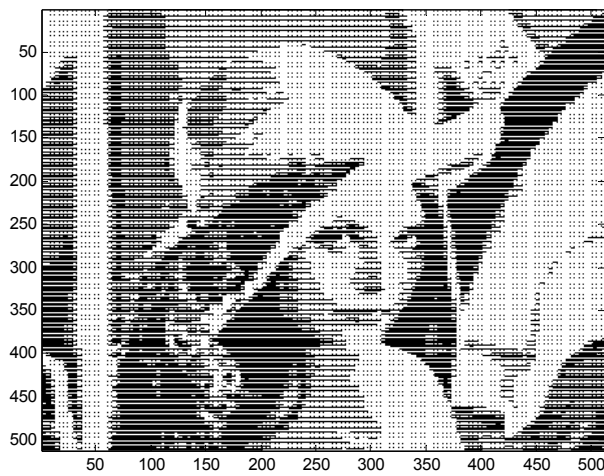
Na técnica de *halftoning* ou “meio-tom” imagens em níveis de cinza são codificadas por *clusters* de pixels brancos e pretos. Numa imagem codificada por *halftoning* uma pequena área que contenha pixels brancos e pretos. A uma determinada distância, da ordem de 30 cm, o olho humano integra o conteúdo desta pequena área, de forma que o observador percebe somente a intensidade média da mesma. Esta propriedade de integração do olho humano é básica para a técnica de *halftoning*.

As Figuras 12(a)e (b) mostram, respectivamente, as imagens original e obtida através de cálculo numérico utilizando a técnica de *halftoning*, com 256 níveis de cinza. Um grupo de

$n \times n$ pixels binários pode produzir $n^2 + 1$ níveis de cinza. Neste caso, cada *cluster* da imagem em halftoning é composto por 4×4 pixels como mostrado na Figura 13.



(a)



(b)

FIGURA 12(a)- Imagem original de Lenna 128x128 pixels;(b) Imagem obtida a partir da imagem original, através da técnica de *halftoning*.

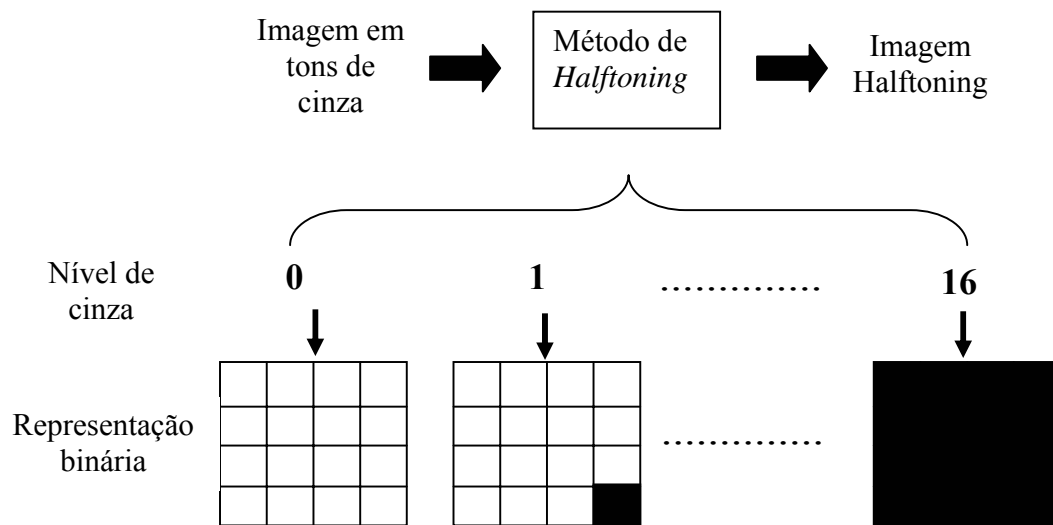


FIGURA 13- Técnica de *halftoning* aplicada a uma imagem com 17 níveis de cinza.

5.2-Processo de codificação do elemento de luz branca

O elemento de luz branca foi fabricado utilizando-se técnica de óptica binária de baixo custo. Considerando-se o custo e o tempo que estão envolvidos num processo para gerar perfis de fase contínuos, foi proposto um EOD binário com níveis de atraso de fase de 0 e π radianos. As máscaras utilizadas no processo de fabricação destes elementos foram geradas através da técnica *halftoning* [44] em que cada pixel com um tom de cinza é representado por um conjunto de subpixels pretos e brancos [21,25].

Os EODs de fase foram projetados para informação binária. A informação binária foi mapeada como mostrado na Figura 14: cada pixel com nível 1 é transformado em quatro pixels com valor de fase e^{j0} , e cada pixel com nível 0 é transformado em quatro pixels (dois pixels com valor de fase e^{j0} e os outros dois pixels com valor de fase $e^{j\pi}$).

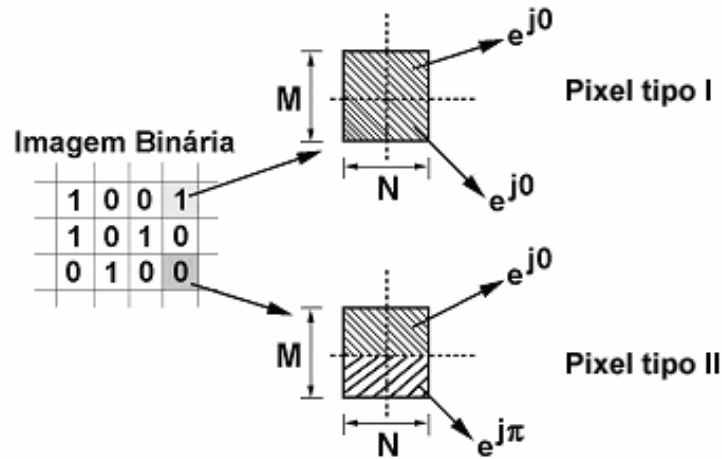


FIGURA 14-Projeto do EOD para uma informação binária

Pode-se classificar dois tipos de pixels codificados conforme ilustrado na Figura 14. Um bloco de pixels composto de 4 pixels de fases e^{j0} , e^{j0} , e^{j0} , e^{j0} , o qual foi denominado pixel tipo I. Outro bloco de pixels composto de 4 pixels de fases e^{j0} , e^{j0} , $e^{j\pi}$, $e^{j\pi}$, o qual foi denominado pixel tipo II. A seguir serão apresentados os padrões de intensidades luminosas geradas quando uma frente de onda atravessa os pixels tipo I e II.

5.3-Simulação e funcionamento do elemento de luz branca

A codificação dos elementos de luz branca foi realizada conforme a metodologia descrita na Seção 5.2. O EOD de luz branca é composto por pixels tipo I e II. Desta forma, simulou-se inicialmente o comportamento de uma frente de onda luminosa modulada por este dois tipos de pixels, segundo a propagação de Fresnel no espectro angular, dada por (8).

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, z\right) \equiv \int \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, z) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] dx dy \quad (8)$$

Onde A é a amplitude resultante da perturbação $U(x,y,z)$, e $\alpha=\lambda f_x$; e $\beta=\lambda f_y$, e f_x e f_y são as freqüências referentes ao plano de coordenadas xy. Assim, a função transferência do sistema é dada por (9)

$$H(f_x, f_y) = \left\{ \exp\left[j2\pi \frac{z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right], \text{ para } \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < \frac{1}{\lambda} \right. \quad (9)$$

O espectro de uma função de saída de um sistema, $G_2(f_x, f_y)$ está relacionado com o espectro de entrada $G_1(f_x, f_y)$ pela função transferência, de tal forma que:

$$G_2(f_x, f_y) \equiv H(f_x, f_y) G_1(f_x, f_y) \quad (10)$$

O diagrama do algoritmo para o cálculo da propagação da luz modulada pelos pixels tipos I e II é ilustrado na Figura 15.

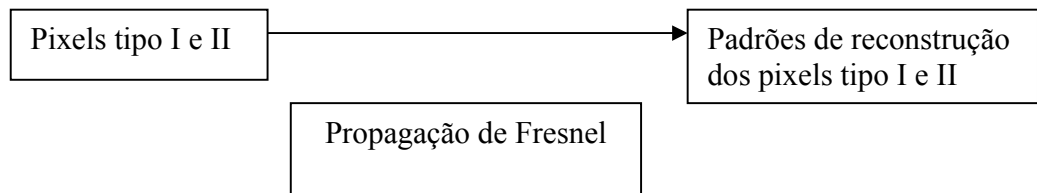


FIGURA 15-Diagrama do algoritmo para o cálculo da propagação da luz modulada pelos

pixels tipos I e II

Analisando a propagação da intensidade luminosa ao longo do eixo é possível observar a formação de padrões de difração. Para uma distância de 2 cm foram observados os padrões de difração para os pixels tipo I e II como ilustrados nas Figuras 16-17.

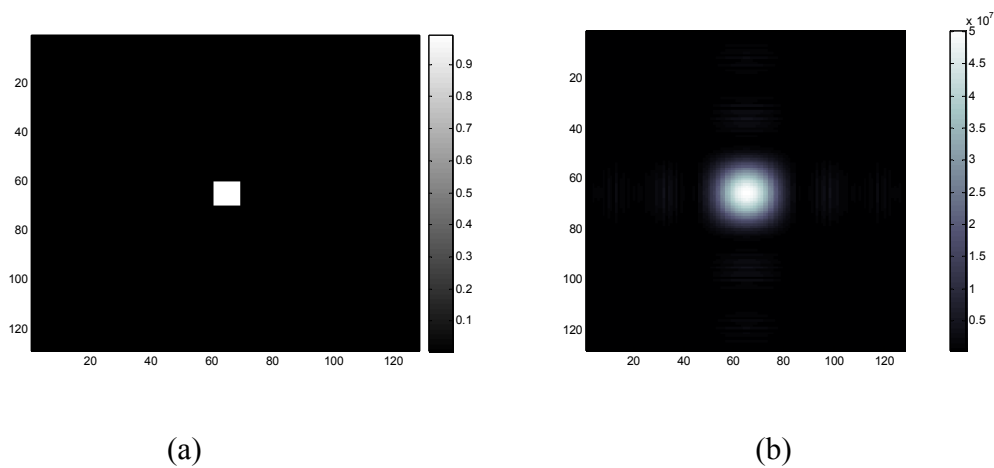


FIGURA 16-(a)pixel tipo I e (b)sua respectiva intensidade de propagação.

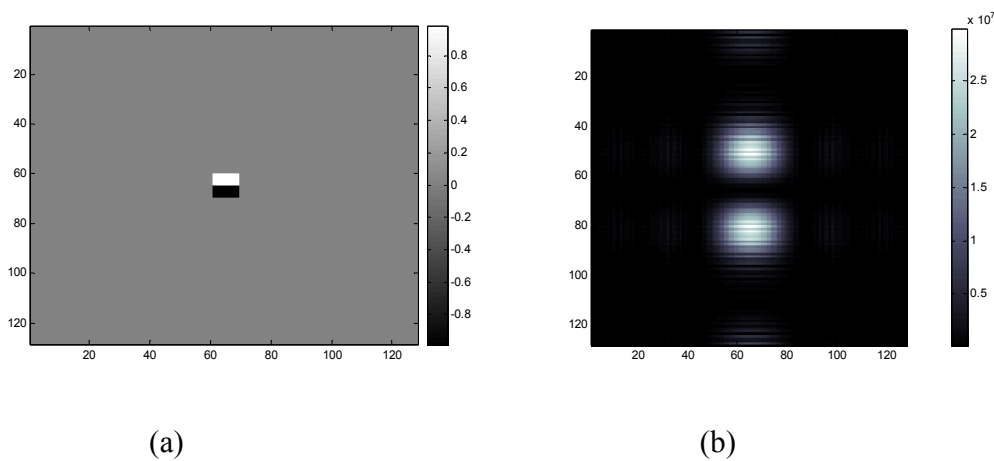


FIGURA 17– (a)Pixel tipo II e (b) intensidade de propagação do pixel tipo II.

Estes pixels dos tipos I e II podem ser interpretados como ondas, cujas propagações podem ser calculadas pelas transformadas de *Fourier* já conhecidas [45]. No caso do pixel tipo I, que modula fase 0, este se comporta como uma função $\Pi(x)$, cuja transformada de *Fourier* é $\text{sinc}(s)$. Analogamente, o pixel tipo II, que apresenta fases 0 e π , tem um comportamento semelhante ao da função $-\frac{1}{2}\Pi\left(x+\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}\Pi\left(x-\frac{1}{2}\right)$, cuja transformada de *Fourier* é $-i \text{sinc}(s)\text{sinc}(s\pi)$. As funções matemáticas dos pixels dos tipos I e II e suas transformadas de *Fourier* estão ilustradas nas Figuras 18 e 19. Estas figuras ilustram os padrões de difração ou transformadas de *Fourier* (vide Apêndice B) dos pixels tipos I e II.

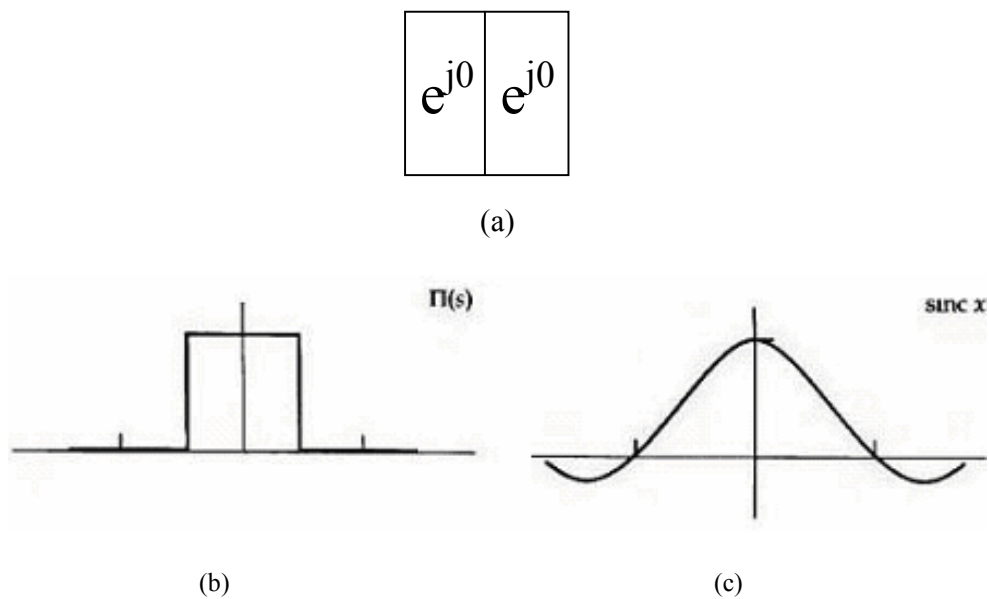


FIGURA 18-(a) Modelo proposto para o pixel tipo I ; (b) sua representação como função $\text{rect}(x)$ e (c) sua transformada de *Fourier*, $\text{sinc}(s)$.

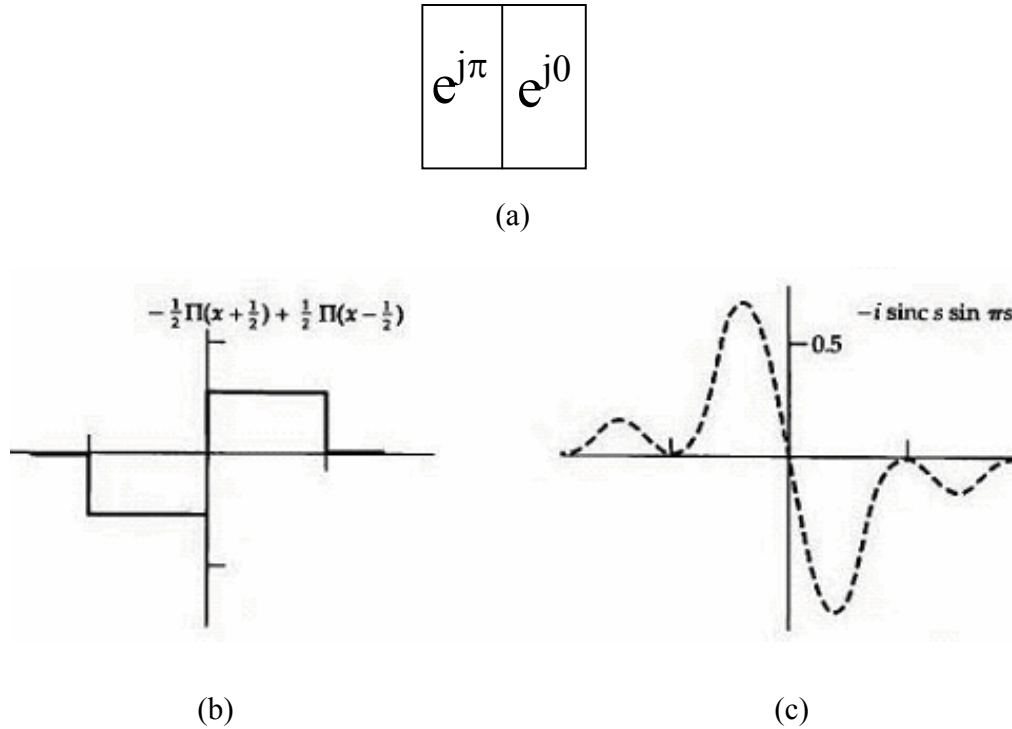


FIGURA 19- Modelo para o pixel tipo II e (b) sua representação como

função $-\frac{1}{2}\Pi\left(x+\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}\Pi\left(x-\frac{1}{2}\right)$; e (c) sua transformada de *Fourier*, $-i \sin c(s) \sin c(\pi s)$.

O EOD de luz branca é composto por um conjunto de pixels tipo I e II. Desta forma, é possível calcular o padrão de difração para cada tipo de pixel no plano de reconstrução para compor a imagem resultante. Cada pixel dos tipos I e II podem ser abordados como micro-hologramas de *Fresnel*. A seguir será apresentado e descrito o algoritmo para a simulação do EOD de luz branca.

5.4- Simulação do EOD de luz branca

O EOD de luz branca foi projetado segundo a técnica de *halftoning* descrita na Seção 5.1. Uma imagem original de 128 x 128 pixels, com 256 níveis de cinza, foi transformada numa imagem *halftoning* de 512 x 512 pixels. Neste processo, cada nível de cinza da imagem original foi mapeado para uma matriz de 4 x 4 pixels. A partir da imagem de *halftoning*, foi gerado o EOD de fase conforme mostrado na Seção 5.2.

A simulação do comportamento da modulação de uma frente de onda luminosa parcialmente coerente em uma região localizada através do EOD de fase foi implementada segundo os diagramas esquemáticos dos algoritmos presentes nas Figuras 20-21. Neles foi utilizado o cálculo da propagação da luz utilizando a aproximação de Fresnel no espectro angular, mostrada em (8). O cálculo da reconstrução da imagem foi dividido em duas etapas : cálculo da propagação de Fresnel para pixels tipo I e cálculo da propagação de Fresnel para pixels tipo II. Desta forma, é obtida a função transferência (vide anexo B) para cada caso, obtida a partir de (12). Fazendo-se a operação de convolução bidimensional [32] da imagem gerada por *halftoning* com cada função transferência obtém-se a imagem de saída para cada tipo de pixel. Como o sistema é linear, utilizando o princípio da superposição, as imagens de saída para cada tipo de pixel podem ser somadas para a obtenção da imagem no plano de reconstrução.

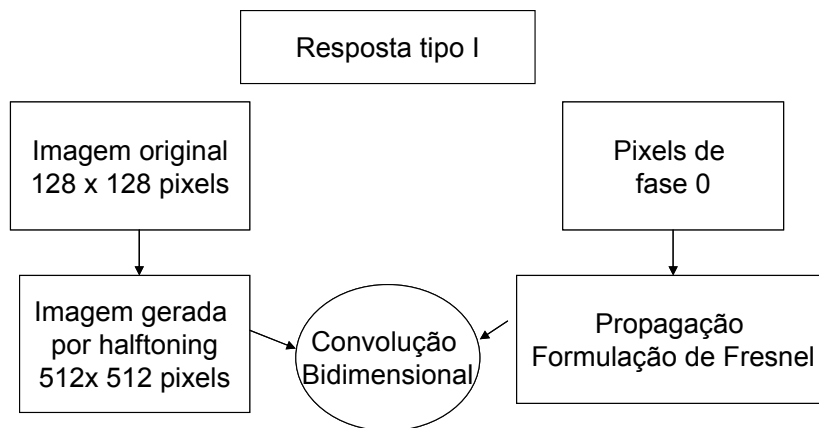


FIGURA 20- Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da resposta impulsional dos pixels tipo I.

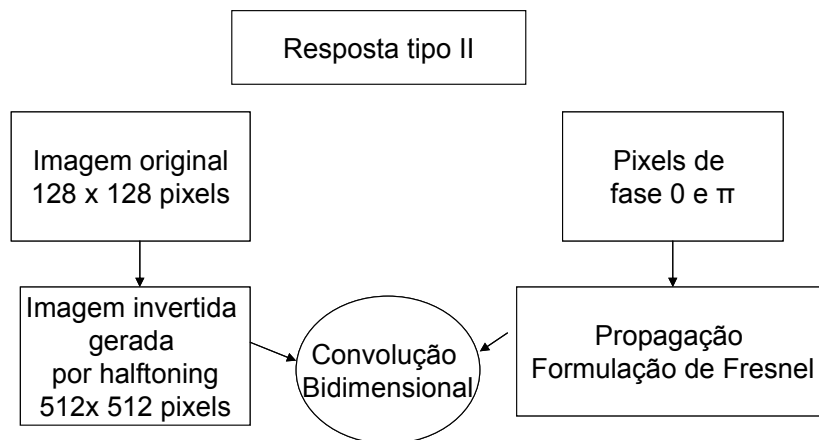


FIGURA 21- Diagrama de blocos do algoritmo para cálculo da resposta impulsional dos pixels tipo II.

Foram feitas simulações computacionais para as distâncias (0 e 2 cm) entre o plano do EOD e o plano de reconstrução. Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 22(a-b).

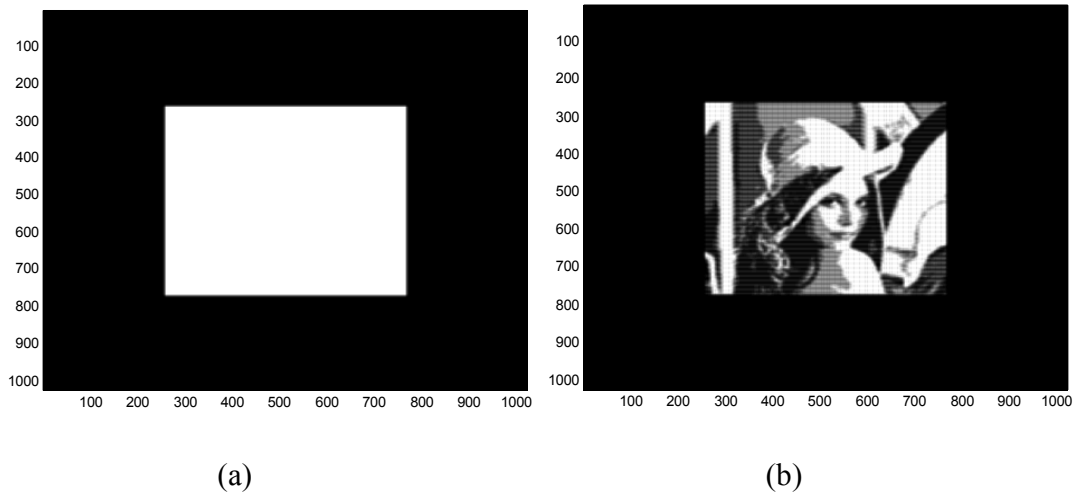


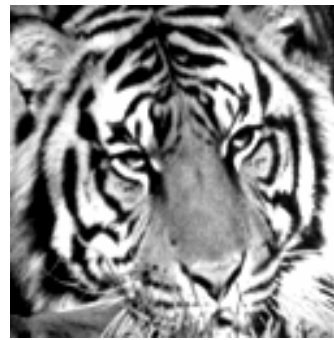
FIGURA 22- Reconstrução simulada para o EOD gerado a partir da figura Lenna para uma distância do plano do EOD ao plano de reconstrução de (a) 0 cm e (b) 2 cm.

Observa-se na Figura 22 que para uma distância muito próxima entre o plano do EOD e o plano de reconstrução não há a formação de imagem. Já para uma distância de 2 cm entre os planos ocorre a formação de uma imagem. A Figura 22(b) ilustra o caso em que ocorre coerência local nas regiões dos pixels tipo I e II. Como consequência há a formação dos padrões simulados e mostrados nas Figuras 16-17 da Seção 5.3.

Para a construção de EOD de luz branca foram escolhidas quatro imagens de dimensão 128 x 128 pixels como mostrado na Figura 23. O EOD de fase foi gerado utilizando o mesmo processo aplicado anteriormente nesta seção. Na Figura 24 são mostradas as reconstruções ópticas simuladas computacionalmente para uma distância de propagação de 2 cm. Estes resultados mostram que há uma determinada distância de propagação, neste caso 2 cm, em que ocorre coerência espacial local nas regiões dos pixels tipo I e II. Estas regiões podem ser interpretadas como micro-hologramas de Fresnel, cuja soma das reconstruções origina a imagem de interesse.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 23- Figuras utilizadas no algoritmo para gerar o EOD de luz branca: (a) Lenna; (b) tigre, (c) periquito; (d) gato.

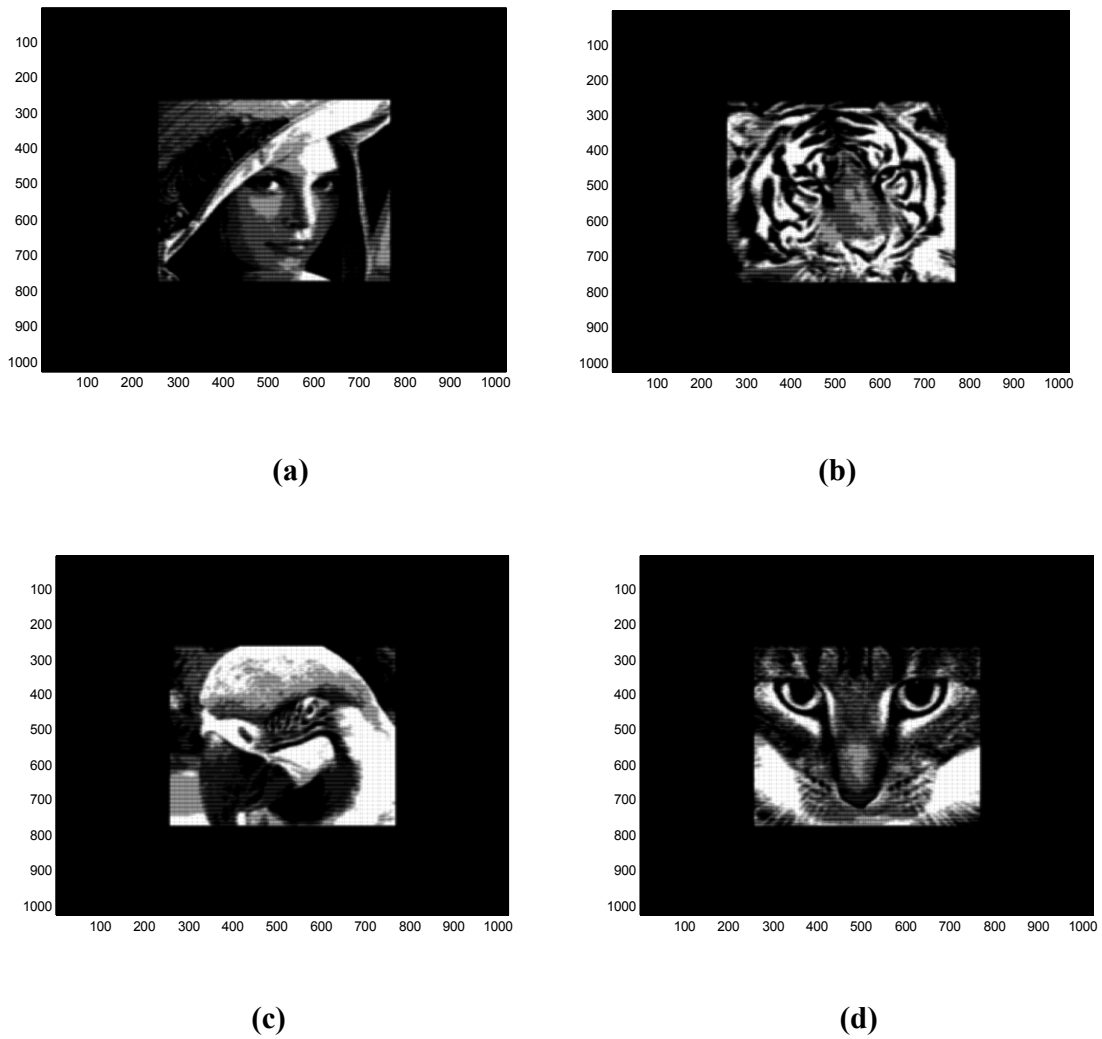


FIGURA 24- Reconstrução simulada para o EOD gerado a partir das figuras (a)Lenna, (b) tigre, (c) periquito e (d) gato, para uma distância do plano do EOD ao plano de reconstrução de 2 cm. Estas figuras são as mesmas utilizadas para a fabricação do elemento de luz branca.

5.5-Construção do elemento de luz branca

Nesta seção são descritos os processos de fabricação do elemento de luz branca, que foi fabricado com a colaboração do Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica – USP – Brasil.

A modulação de fase no EOD é descrita por (11) [18].

$$th(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi(n-1)}\phi(x, y) \quad (11)$$

onde : $\phi(x, y)$ ($0 \leq \phi(x, y) \leq 2\pi$) é a distribuição de fase, $th(x, y)$ é a variação de espessura necessária para gerar o padrão de difração, λ é o comprimento de onda de operação e n é o índice de refração do material da rede de fase. Visto que o EOD funciona no espectro visível foi escolhido $\lambda = 633$ nm.

O EOD foi fabricado empregando óptica binária de baixo custo e a seqüência de etapas para fabricação é mostrada esquematicamente na Figura 25. Considerando o custo e o tempo deste processo, o qual gera perfis de fase contínuos, foi proposto um EOD binário com níveis de atraso de fase de 0 e π radianos, que são gerados por etapas de fotolitografia e corrosão por plasma [20].

Um substrato de vidro de qualidade óptica com diâmetro de três polegadas foi utilizado como base para as estruturas de deslocamento de fase. Estas estruturas foram implementadas em filme fino de fotorresiste cujo índice de refração é $n_R=1,65$.

Substituindo $\phi(x, y) = \pi$ em(10), a espessura de rede encontrada é $th(x, y) = 633 / [2(1.65-1)] = 486,9$ nm.

Neste trabalho, foi utilizado um processo de seis etapas, que são bem controladas e conhecidas para aplicações em micromecânica e microeletrônica. Estas etapas são apresentadas a seguir :

- a) **Limpeza das lâminas de vidro.** O substrato de vidro utilizado apresenta diâmetro de 3 polegadas e espessura de 1,0 mm ;
- b) **Aplicação (spin) de álcool isopropílico,** 20 seg., 2500 rpm;
- c) **Aplicação do promotor de aderência,** 20 seg., 2500 rpm;
- d) **Aplicação do fotoresiste TOKYO OHKA ONPR – 800,** 20 seg., 2500 rpm, a espessura do fotoresiste obtida foi de 1,1 μm ;
- e) **Pré-Cura,** 90 seg@90°C;
- f) **Exposição UV,** 40 seg., 25 mW/cm². O fotolito utilizado para a transferência do padrão desejado foi gerado sobre um filme transparente por uma *plotter* (AGFA AVANTRA 30e 2400 dpi) com máxima resolução de 15 μm .
- g) **Revelação,** 2 partes de revelador : 1 parte de H₂O-DI. O tempo de revelação foi mantido constante em 60 s. O revelador empregado foi o HPRD-402;
- h) **Pós cura,** 30 min @ 105°C;
- i) **Medição de altura de degrau antes da corrosão.** Verificação da altura de degraus do fotoresiste, antes da corrosão por plasma, via técnica de perfilometria;
- j) **Corrosão por plasma.** Os substrato com fotoresiste foi submetido a corrosão por plasma de CF₄ + 20% H₂, durante 10 minutos;

- k) **Medição de altura de degrau após a remoção do fotorresiste.** Verificação das alturas de degraus após a remoção do fotorresiste remanescente da corrosão, via perfilometria.

Na Figura 26, pode ser visto o EOD de fase de luz branca produzido através da metodologia descrita nesta seção.

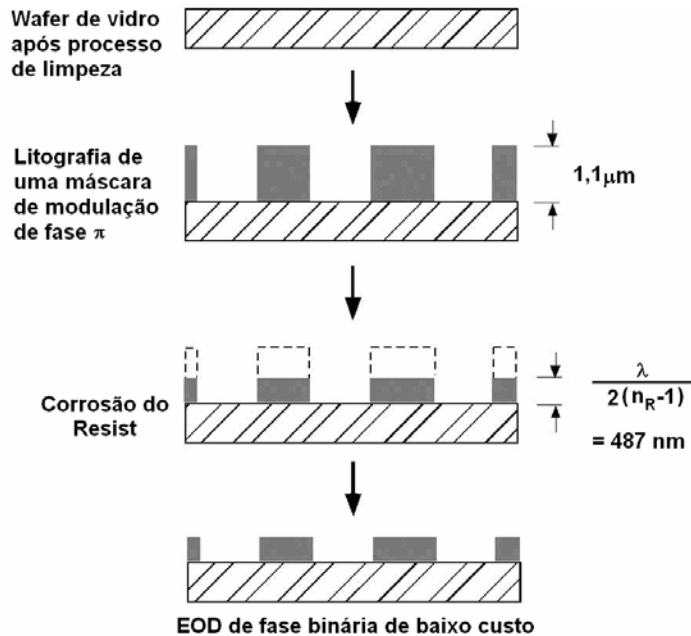


FIGURA 25- Visão esquemática da seqüência do processo de fabricação do EOD no modo transmissão. Devido ao baixo custo de fabricação foi utilizada uma máscara que consiste de um filme transparente tipo fotolito. O padrão a ser transferido foi impresso no filme transparente por uma plotter com máxima definição 15 μm (AGFA AVANTRA 30e 2400 dpi). Nenhuma máscara gerada por feixe de elétrons é necessária.

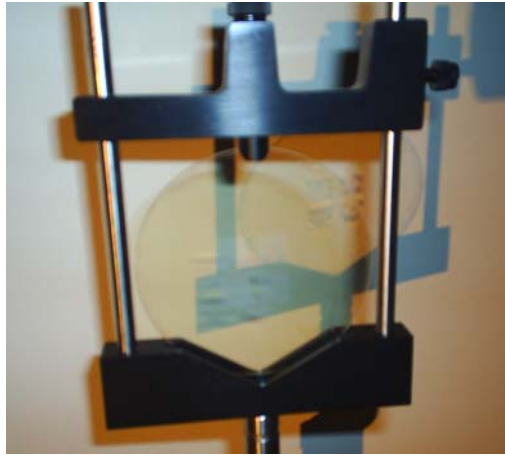


FIGURA 26- Montagem do EOD de luz branca realizada no laboratório de óptica do departamento de engenharia elétrica da EESC-USP. No plano posterior, observa-se o anteparo, onde a imagem é projetada.

Capítulo 6

Introdução

No capítulo anterior foram apresentados a metodologia de projeto, funcionamento e construção do EOD de fase que opera sob iluminação parcialmente coerente em uma região localizada. Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais referentes às reconstruções ópticas utilizando os EODs fabricados através do método proposto.

6-Resultados experimentais

6.1- Medida do contraste

O EOD de fase projetado e construído é iluminado com uma fonte luminosa não-coerente. Logo, torna-se necessário avaliar o contraste obtido através da fonte luminosa utilizada.

A iluminação utilizada no processo de reconstrução óptica corresponde a uma lâmpada dicróica halógena (12V, 50W e comprimento de onda médio $\bar{\lambda}=633$ nm) da marca OSRAM mostrada na Figura 27.



FIGURA 27- Lâmpada dicróica halógena 12V, 50W, $\bar{\lambda}=633$ nm, da marca OSRAM, utilizada para obtenção da reconstrução óptica do elemento de luz branca.

Para a determinação do contraste da fonte luminosa utilizada para a reconstrução óptica do EOD de luz branca foram feitos três experimentos: difração da luz por uma fenda dupla (experimento de *Young*); difração da luz através de uma grade de difração, cujo período da rede é $10\ \mu\text{m}$, ou seja, da mesma ordem de grandeza da dimensão dos pixels do EOD; e difração da luz através do EOD de luz branca.

A montagem óptica utilizada nos experimentos acima está ilustrada na Figura 28. Para a reconstrução óptica do elemento de luz branca e posteriormente o cálculo do contraste da fonte luminosa empregada, foi realizada uma montagem, como visto na Figura 28, utilizando : suportes da marca Newport; uma lâmpada dicróica halógena 12V, 50W, $\bar{\lambda}=633$ nm, da marca OSRAM (vide Figura 27); uma pupila Newport; uma câmera CCD Solid State COHU, acoplada a um PC; uma placa de aquisição NI-IMAQ 2.2 da National Instruments; e duas lentes, de distâncias focais $f=0,15\text{m}$ e $f=0,25\text{m}$, com o objetivo de projetar as imagens no plano do sensor da câmera CCD.

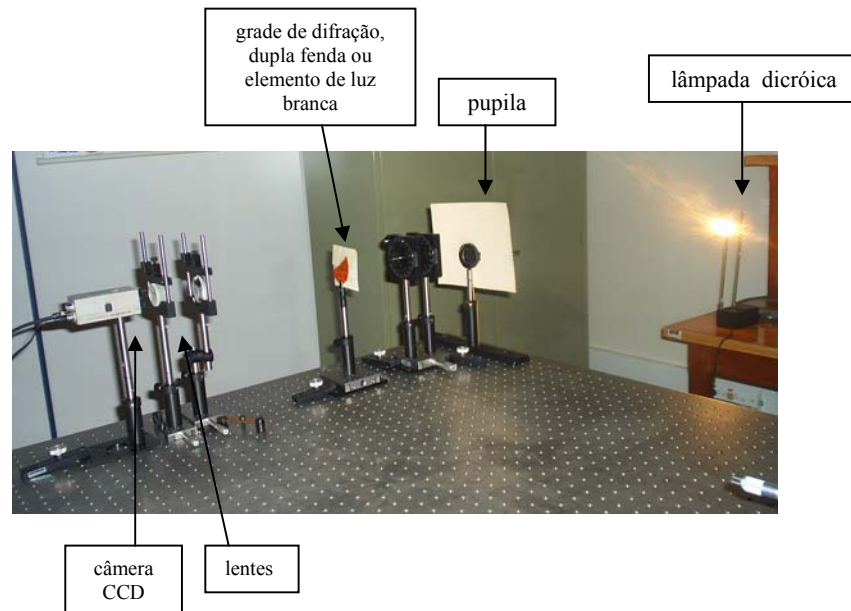


FIGURA 28-Montagem experimental para cálculo do grau de coerência realizada através de três metodologias: difração por uma fenda dupla, difração através de uma grade de difração e difração através do elemento de luz branca.

O grau de coerência da fonte luminosa foi calculado em cada experimento utilizando a formulação de (5). De acordo com (6), Seção 4.2, como a dimensão dos pixels é $20\ \mu\text{m}$, a distância $d(P_1, P_2)$, entre dois pontos coerentes em uma frente de onda, é a mínima distância entre dois pixels, $20\ \mu\text{m}$. O diâmetro do filamento da luz dicrónica ρ é 3mm , e o comprimento de onda médio $\bar{\lambda}$ é 633nm . O valor mínimo da distância R da fonte ao plano do EOD calculado para que haja coerência espacial é $0,6\text{ m}$. Tendo em vista estes resultados, a fenda dupla, a grade de difração e o elemento de luz branca foram posicionados a esta distância mínima da fonte luminosa, para que a condição de coerência fosse observada. A distância entre o plano do EOD

de luz branca e o plano da câmera CCD foi fixada em 2 cm, como constatado na reconstrução simulada computacionalmente.

Para cada experimento foram calculados quatro valores de contraste: um para a iluminação da lâmpada dicróica somente e outros três com a lâmpada dicróica associada separadamente com filtros (verde, vermelho e azul). Para o cálculo destes contrastes foi implementado um algoritmo simples para identificar os máximos e mínimos de intensidade nas imagens geradas em cada experimento pelos diferentes comprimentos de onda. Os resultados do cálculo dos contrastes dos experimentos são mostrados nas Tabelas I, II e III.

Tabela I. Contrastes determinados através da difração por uma grade de difração obtido com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul .

1. Grade de Difração		
Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contraste
Branca	633	0,7899
Vermelha	700	0,8168
Verde	530	0,8216
Azul	470	0,8155

Tabela II. Contraste determinados através da difração por uma fenda dupla obtido com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul .

2.Fenda de Young		
Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
Branca	633	0,8000
Vermelha	700	0,8242
Verde	530	0,7326
Azul	470	0,7089

Tabela III.(a) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca Lenna obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.

3.Elementos de luz branca			
	Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
a) Lenna	Branca	633	0,7385
	Vermelha	700	0,8022
	Verde	530	0,7364
	Azul	470	0,7754

Tabela III.(b) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca gato obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.

	Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
b)Gato	Branca	633	0,7034
	Vermelha	700	0,7509
	Verde	530	0,7706
	Azul	470	0,7385

Tabela III.(c) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca tigre obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.

	Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
c)Tigre	Branca	633	0,7024
	Vermelha	700	0,7324
	Verde	530	0,7754
	Azul	470	0,7385

Tabela III.(d) Contrastes determinados através da difração pelo elemento de luz branca periquito obtidos com a fonte de luz branca separadamente e com filtros vermelho, verde e azul.

	Tipo de iluminação	Comprimento de onda λ (nm)	Contrastes
d)Periquito	Branca	633	0,7376
	Vermelha	700	0,8022
	Verde	530	0,7501
	Azul	470	0,7698

Os resultados dos experimentos com a fenda dupla, a grade de difração e o elemento de luz branca mostrados nas Tabelas I, II e III indicam contrastes para a luz branca e para os comprimentos de onda verde, vermelho e azul. Nota-se que o contraste obtido através da fonte de luz branca e de suas componentes estão muito próximos. Estão ilustradas nas Figuras 29-32 as reconstruções ópticas do EOD de luz branca para os seguintes casos: lâmpada dicróica somente e lâmpada dicróica associada com filtros isolados (vermelho, verde e azul).



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 29- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “Lenna” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.

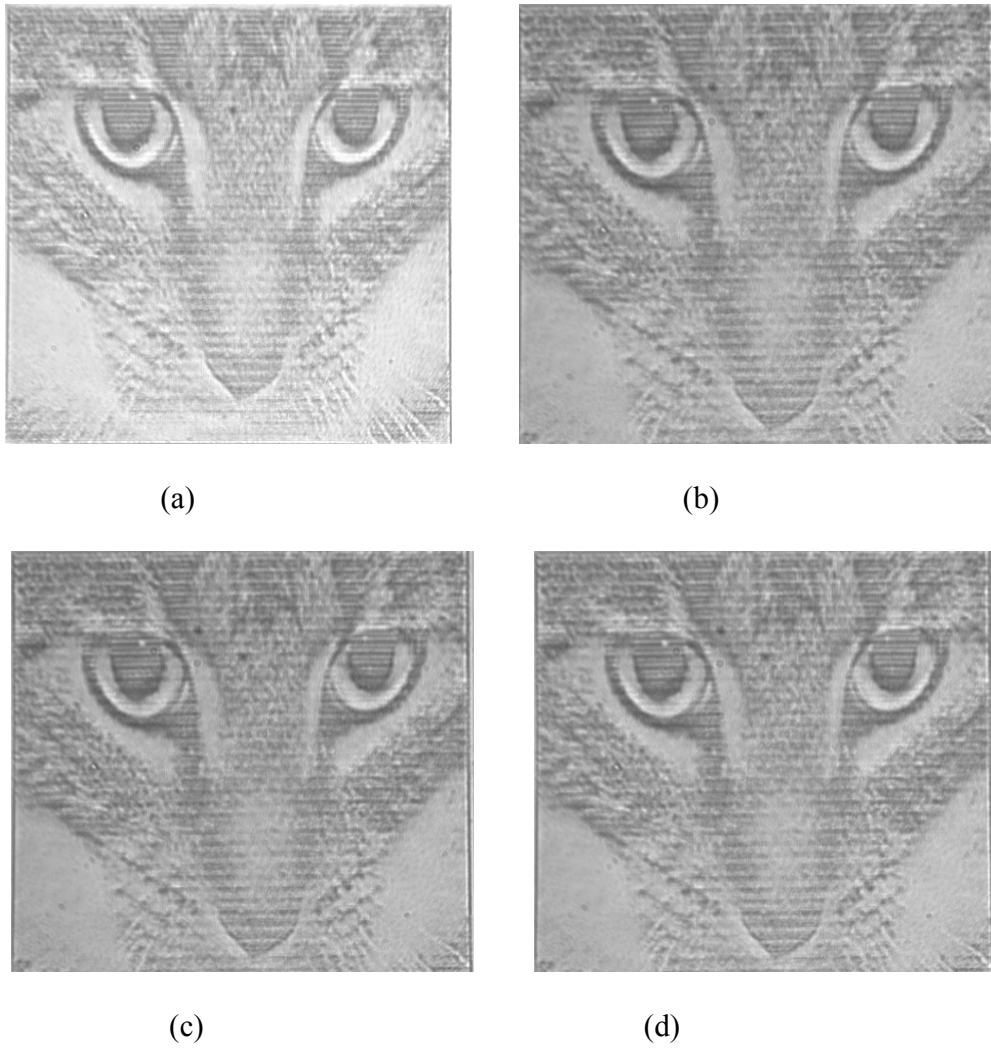


FIGURA 30- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “gato” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.

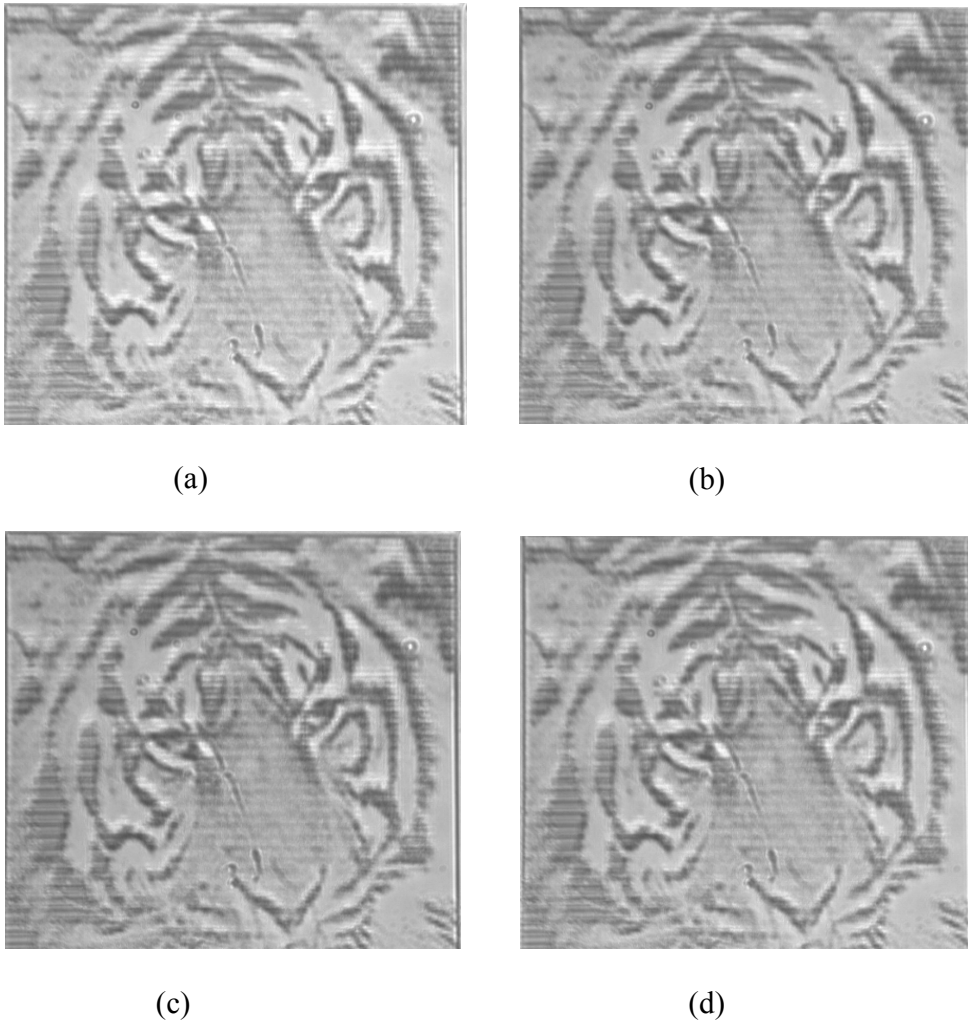
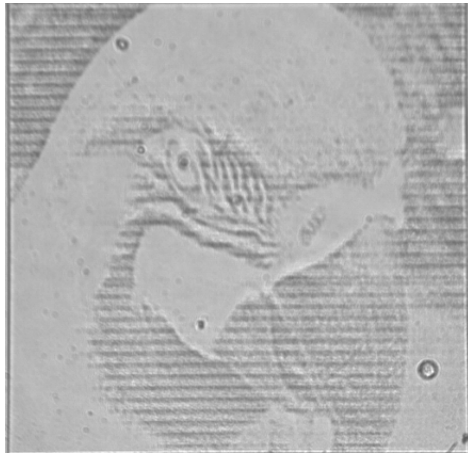
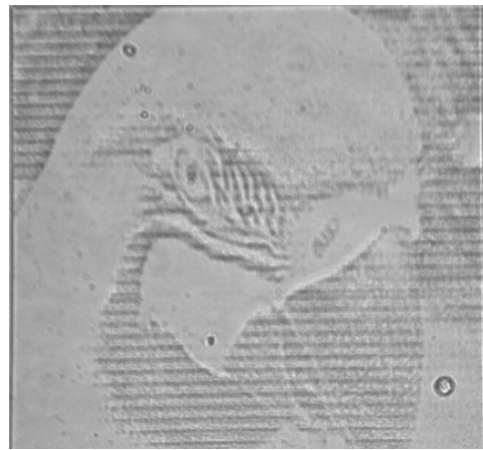


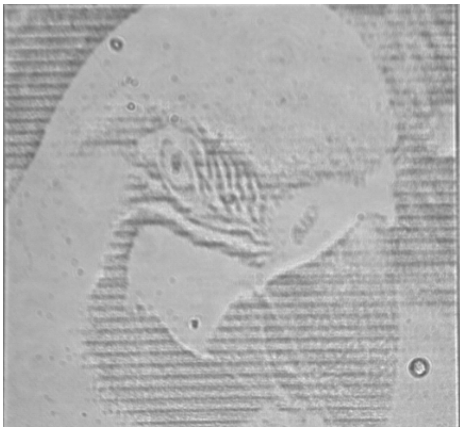
FIGURA 31- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “tigre” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.



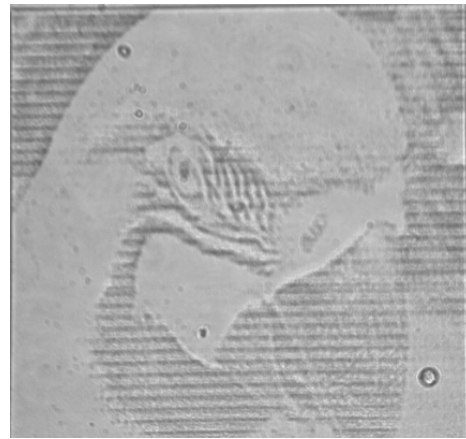
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 32- Reconstruções ópticas geradas a partir do elemento de luz branca “periquito” utilizando: (a) lâmpada dicróica somente; e lâmpada dicróica com filtros (b) vermelho; (c) verde e (d) azul.

Como pode ser visto nas Figuras 29(a), 30(a), 31(a) e 32(a), as reconstruções ópticas geradas pelos elementos ópticos difrativos de luz branca apresentam boa nitidez e resultados satisfatórios. Não foi observada distorção cromática considerável, como o efeito *rainbow* constatado em outros hologramas de luz branca convencionais. As reconstruções ópticas do EOD de luz branca obtidas com luz branca somente, e com suas componentes vermelha, verde e azul são muito semelhantes. Segundo o conceito de amostragem (vide Apêndice C), os intervalos de amostragem são proporcionais ao comprimento de onda λ . Entretanto, a diferença de tamanho dos pixels das imagens de reconstrução geradas pelos três comprimentos de onda não é perceptível ao olho humano e, segundo o princípio da superposição, descrito no Apêndice B, cada pixel da imagem resultante gerada a partir do elemento de luz branca iluminado com a lâmpada dicróica é a soma de todos os pixels de cada imagem gerada pelos diferentes comprimentos de onda que a compõem. Os pixels se sobrepõem e o olho humano integra a imagem, de tal forma que distorções cromáticas não são observadas.

Capítulo 7

Introdução

No capítulo anterior foram apresentados resultados experimentais referentes as reconstruções ópticas utilizando os EODs construídos. Neste capítulo serão destacadas algumas conclusões e considerações em relação ao EOD de luz branca proposto.

7-Conclusões

O cálculo e simulação do elemento de luz branca foram propostos a partir de um algoritmo que utiliza a transformada de *Fourier* como ferramenta para o cálculo da propagação de luz através do elemento binário, construído utilizando uma imagem gerada pela técnica de *halftoning*, obtida rearranjando-se regiões de pixels que apresentam coerência espacial local. Esta proposta de fabricação utiliza óptica binária de baixo custo, uma vez que foi introduzida uma modulação de fases 0 e π .

Uma das vantagens da utilização deste algoritmo é a eliminação de métodos iterativos, utilizados na maioria dos hologramas gerados por computador. Utilizando conceitos da técnica de *halftoning* no algoritmo proposto, pode-se gerar uma máscara para produzir o elemento de luz branca facilmente, utilizando uma impressora de alta resolução e técnicas de fabricação de circuito impresso.

Uma outra vantagem deste EOD de fase de luz branca é que os resultados da reconstrução óptica mostram mínima distorção cromática, imperceptível ao olho humano, ao contrário do

observado em hologramas de luz branca convencionais. Outras vantagens importantes são o baixo custo e o tempo envolvidos no processo de fabricação do EOD de luz branca proposto, já que este utiliza técnicas simples de fabricação de circuitos impressos.

Os resultados obtidos a partir da reconstrução óptica e simulada do EOD de fase de luz branca apresentam semelhança entre si, o que indica que o algoritmo proposto neste trabalho foi capaz de reproduzir este comportamento óptico do elemento, de forma simples e sem necessidade de métodos complexos ou iterativos.

O EOD de luz branca poderia ser utilizado em diversas aplicações: processamento óptico não-corente (correladores ópticos), sistemas de segurança para autenticação de informações (documentos, cartões de crédito) e projeção de imagens holográficas como arte.

Capítulo 8

8-Referências Bibliográficas

- [1] GABOR, D.(1948). “A new microscope principle”. *Nature*, vol. 161, pp.777.
- [2] DENISYUK, Y. N.(1997). “From Lippmann photography to selectograms via white light holography”. *Journal of imaging science and technology*. vol 41(3), pp.205-210, mai/jun.
- [3] BENTON, S. A.(1969). “On a method for reducing the information content of holograms”. *Journal of Optical Society of America*, vol.59, pp.1969.
- [4] SIEBERT, L. D.(1967). “Front-lighted pulse laser holography”. *Applied Physics Letters*, vol. 11(10), pp.326.
- [5] MOLLENST, G. ; WAHL, H.(1968). “Electron holography and reconstruction with laser light”. *Naturwissenschaften*, vol.55(7), pp. 340.
- [6] TANNER, L.H. (1968). “A study of fringe clarity in laser interferometry and holography”. *Journal of Physics e Scientific Instruments*, vol.1(5), pp. 517.
- [7] GERCHBERG, R. W ; SAXTON, W.O. (1972). *Optik* vol.35, pp. 237.
- [8] HIRSCH, P.M.; JORDAN, J.A.; LESEM, L.B. (1971). US Patent N°. 3.619.022.
- [9] BROWN, B. R.; LOHMANN, A.W.(1969). *IBM J. Res. & Dev.* vol. 13, pp160.
- [10] LOHMANN, A.W; PARIS, D.P. (1967). *Applied Optics* vol.6, pp.1739.
- [11] BROWN, B. R.; LOHMANN, A.W.(1969). *IBM J. Res. & Dev.* vol. 14, pp. 380
- [12] LEE, W. H.(1974). Binary Synthetic Holograms. *Applied Optics* vol. 13, 1677-1682.
- [13] SELDOWITZ, M. A.; ALLEBACH, J. P.; SWEENEY, D. W.(1987).Synthesis of digital holograms by direct binary search. *Applied Optics*, vol. 26, nº. 14, pp. 2788-2797.

-
- [14] HAUCK, R.; BRYNGDAHL, O.(1984). Computer-Generated Holograms with Pulse-Density *Journal of Optical Society of America A*1, 5-10.
- [15] WYROWSKI, F.(1989). Iterative quantization of digital amplitude holograms. *Applied Optics*, vol. 28, nº18, pp.3864-3870.
- [16] WYROWSKI, F.(1989). Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blase phase structures. *Journal of Optical Society of America A*, vol.7, nº6, pp.961-969.
- [17] TURUNEN, J. ; WYROWSKI, F. (1997) - In : *Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications* (Akademie Verlag, Alemanha).
- [18] Y. FU et al.Temporal wavelet analysis for deformation and velocity measurement in speckle interferometry. In: SPIE Optical Engineering Press, ISSN 0091-3286,1994.
- [19] ARSENAULT H.; SHENG Y. An Introduction to Optics in Computers. In: SPIE Optical Engineering Press, ISBN 0-8194-0825-5, 1992.
- [20] NETO; L. G. et al (2003). Design, fabrication and characterization of a full complex-amplitude modulation diffractive optical element. *Journal of Microlithography Microsystems and Microfabrication*, vol.2, nº2, pp. 96-104.
- [21] PIZOLATO JUNIOR; J. C. Novas Técnicas de contraste de fase para a verificação de padrões cifrados, [Tese], Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- [22] ICHIOKA, Y.; IZUMI, M.; SUZUKI, T.(1971). Scanning halftone plotter and computer-generated continuous-tone hologram. *Applied Optics* vol. 10(2), pp. 403.
- [23] CAULFIELD, H. J.; MUELLER P. et al (1983). Continuous tone holograms by halftoning. In: PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 437.
- [24] PINHASI, Y.; PERI, D.(1993). “A generalized analysis of binary half-tone representation of images”.*Optics Communications*, vol. 101(3-4), pp. 277-285.

- [25] PIZOLATO JUNIOR, J. C.; et al.(2007). Zeroth-order phase-contrast technique, *Applied Optics*, vol. 10. No prelo.
- [26] MERZLYAKOV, N. S.; MOZEROV, M. G. (1998). “Computer-generated True-color Rainbow Holograms”.*Optics and Lasers in Engineering*, vol. 29, pp.369-376.
- [27] SANDO, Y.; ITOH, M.; YATAGAI, T.(2004). “Color computer-generated hologram from projection images”. *Optical Society of America*, vol. 12(11), pp.2487-2493.
- [28]GONÇALVES, C.; et al. White light computer-generated element based on halftoning. In: XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2007, São Lourenço.
- [29] GONÇALVES, C. et al. White light computer-generated element based on halftoning. In: OSA Topical meetings, 2007, Vancouver, Canadá.
- [30] VELDKAMP, W. B.; MCHUGH, T. J. (1992).“*Binary Optics*”, Scientific American, maio, pp.92-97.
- [31] Consulte artigos em “*Applied Optics – Diffractive Optics*”. vol. 34, nº14.
- [32]GOODMAN, J.W. Foundations of Scalar Diffraction Theory. In: “*Introduction to Fourier Optics*”. McGraw-Hill Publishing Company, 1988.
- [33] HECHT, E. “*Optics*”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc,1984.
- [34] LI, M.; et al.(1996). “Optical Waveguide Fan out Elements Using Dislocated Gratings for Both Outcoupling and Phase Shifting”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, n ° 9.
- [35]VELDKAMP, W. B. “*Wireless Focal Planes: On the Road to Amacronic Sensors*”, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.29, nº. 2, February 1993, p.801-813.
- [36] AGRAWAL, G. P. “*Fiber-Optics Communication Systems*”, John Wiley & Sons, Inc, 1992, p.282.
- [37] SHENG.,Y; ROBERGE, D., NETO,L.G; L. SHEN e PAUL-HUS G, “*Programmable phase-mostly holograms and correlation filters*”, Laser and Opt. Tech., vol. 28, nº.2, pp.129-143, 1996

-
- [38] SHENG.,Y et al. (1996). “Optoelectronic Devices and Systems for Processing”,A. Critical Reviews Series, *SPIE Optical Engineering Press*, pp.103-127.
- [39] BULLA, D.A.P; et al. (2002)“*Design and Fabrication of SiO₂/Si₃N₄ Integrated-Optics Waveguides with Application to Free-Space Optical Interconnects*”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques - Special Issue on Selected Papers of the International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC’99.
- [40] VAN RENESSE, R.L. In: “Optical document security”, 2nd Edition, Artech House Optoelectronics Library,1997.
- [41] BRYNGDAHL, O.; WYROWSKI, F.(1990). Digital Holography - Computer-Generated Holograms. E. Wolf, *Progress in Optics XXVIII, Elsevier Science Publishers B.V.*
- [42] ROBERTO, L. B. Algoritmos para o Cálculo de Hologramas Gerados por Computador. [Dissertação], Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
- [43] BORN, M.; WOLF, E. “*Principles of Optis-Eletromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light*”, Editora Pergamon, 1980.
- [44] GONZALEZ, R. C ; WOODS, R. E. In:“Digital Image Processing”, 2nd Edition, Prentice Hall, 2002.
- [45] BRACEWELL, R. N. In: “The Fourier Transform & Its Applications”, 3rd Edition, McGraw-Hill Science/Engineering/Math ,1999.

Apêndice A

A-Transformada de Fourier

$$F\{g\} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \int g(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy$$

Onde f_x e f_y são as frequências relativas às coordenadas do plano xy .

B-Equação de Helmholtz

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, z\right) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \int U(x, y, z) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] dx dy$$

Onde A é o espectro angular de uma perturbação U , e $\alpha = \lambda f_x$; $\beta = \lambda f_y$.

Apêndice B

Resposta impulsional, função transferência, e sistemas lineares invariantes

Muitos fenômenos físicos apresentam uma resposta a vários estímulos como sendo identicamente iguais à soma de suas várias respostas contabilizadas individualmente. Quando isto ocorre, o sistema é chamado linear. Exemplos destes são redes elétricas compostas de resistores, capacitores e resistores, que são lineares para várias entradas. Analogamente, a equação de onda descrita pela propagação da luz ao longo de muitos meios permite a análise de operações de imagem como um mapeamento linear de distribuições luminosas de um objeto em distribuições luminosas de uma imagem.

Analisar a formação de imagens utilizando-se a propriedade de linearidade é uma vasta simplificação matemática, a qual recorre-se à teoria de sistemas lineares. A vantagem de se utilizar esta teoria é a habilidade de expressar a resposta (seja corrente, tensão, amplitude da luz ou intensidade luminosa) em termos de respostas a estímulos elementares. Quando um estímulo é decomposto em uma combinação linear de pequenos estímulos, cada um destes produz uma resposta, e a resposta total é calculada como a soma de todas as respostas aos estímulos elementares.

Se a iluminação utilizada em um sistema óptico apresenta coerência espacial local, a luz pode ser descrita como um campo de valores complexos de amplitude, e é interessante descrevê-la como uma distribuição de valores reais de intensidade. Para sistemas lineares invariantes no tempo, como o caso de um sistema óptico com iluminação parcialmente coerente, a análise de

Fourier é uma ferramenta útil para simplificar os cálculos de funções de saída do sistema, no caso, as imagens reproduzidas.

A transformada de *Fourier* de uma função $g(x,y)$ é representada por $F\{g\}$ e é definida por:

$$F\{g\} \equiv \iint_{-\infty}^{\infty} g(x,y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (1)$$

onde $g(x,y)$ é a função de entrada, f_x e f_y são freqüências no plano de coordenadas.

Da mesma forma, a transformada de *Fourier* inversa é definida por:

$$F\{G\} \equiv \iint_{-\infty}^{\infty} G(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (2)$$

Considerando que a fonte luminosa esteja a uma distância considerável, de forma que seja vista como puntual, esta fonte pode ser representada por uma função delta de Dirac, definida por:

$$\delta(x,y) \equiv \lim_{N \rightarrow \infty} N^2 \exp\left[-N^2 \pi(x^2 + y^2)\right] \quad (3)$$

onde N é um valor arbitrário. A transformada de *Fourier* para a função δ é então:

$$F\{\delta(x,y)\} \equiv \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ \exp\left[-\frac{\pi(f_x^2 + f_y^2)}{N^2}\right] \right\} \equiv 1 \quad (4)$$

O espectro da função delta se estende ao longo do domínio das freqüências.

Segundo o teorema da convolução, sejam $F[g(x,y)] \equiv G(f_x, f_y)$ e $F[h(x,y)] \equiv H(f_x, f_y)$,

tem-se:

$$F\left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} g(x', y') h(x - x', y - y') dx' dy' \right\} \equiv G(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \quad (5)$$

onde x' e y' são coordenadas do plano xy .

Outra função de interesse em sistemas lineares invariantes, como um sistema óptico com iluminação parcialmente coerente, é a função transferência. No caso do holograma de *Fresnel*, sejam z a distância de um plano onde situa-se o holograma e o plano de reconstrução de sua

imagem e λ o comprimento de onda da fonte luminosa empregada no sistema óptico, a função transferência $H(f_x, f_y)$ é definida por:

$$H(f_x, f_y) = \left\{ \exp \left[j2\pi \frac{z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right], \text{ para } \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < \frac{1}{\lambda} \right. \quad (6)$$

O espectro de uma função de saída de um sistema, $G_2(f_x, f_y)$ está relacionado com o espectro de entrada $G_1(f_x, f_y)$ pela função transferência, de tal forma que:

$$G_2(f_x, f_y) \equiv H(f_x, f_y) G_1(f_x, f_y) \quad (7)$$

Para calcular a imagem de reconstrução, calcula-se a função transferência do sistema e, posteriormente, faz-se uma operação de convolução com a imagem de interesse, a fim de se obter a sua reconstrução.

Apêndice C

Amostragem no plano de frequências

O processo de holografia, tanto analógico como digital, envolve invariavelmente a criação de um campo complexo no plano do holograma, um campo que deve ser regenerado com o processo de reconstrução da frente de onda. Para hologramas gerados por computador, este campo é calculado utilizando um computador, e deve ser amostrados e os valores complexos são computados em cada ponto de amostra. Para saber quantas amostras do campo devem ser computadas, deve-se considerar que o objetivo é criar um campo do holograma que seja a transformada de *Fourier* do campo do objeto que deseja-se reproduzir. Considerando o caso do holograma de *Fresnel*, a relação entre a largura de banda do campo do holograma e o tamanho do objeto pode ser aproximada por uma função. Um objeto no caso é visto como uma função $U_0(x, y)\exp\left[j\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right]$, onde U_0 é a amplitude da intensidade luminosa, x e y são coordenadas espaciais, λ é o comprimento de onda da iluminação e z é a distância entre o plano do holograma e o plano de reconstrução, como visto na Figura A1. A presença de uma distribuição de fase ao longo do objeto não afeta a distribuição de intensidade, que é a quantidade que deseja-se recriar através do campo do holograma. As larguras de banda do holograma podem ser obtidas, de acordo com Goodman[32] como :

$$2B_x = \frac{L_{x'} + L_x}{\lambda z} \quad (1)$$

$$2B_y = \frac{L_{y'} + L_y}{\lambda z} \quad (2)$$

onde $L_{x'}, L_x, L_{y'}, L_y$ são frequências espaciais locais e B_x e B_y são as larguras de banda nas direções dos eixos x e y respectivamente.

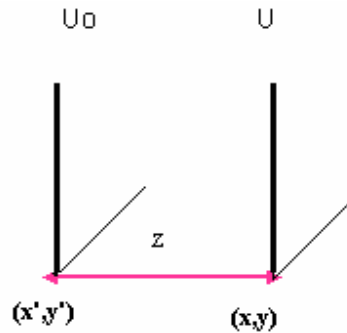


FIGURA A1-Ilustração do holograma de *Fresnel*; (x, y) são as coordenadas do plano do holograma e (x', y') as coordenadas do plano de reconstrução.

A largura de banda depende da extensão do campo de um objeto e do campo do holograma.

Os intervalos de amostragem nos eixos x e y neste caso são definidos como:

$$\Delta x = \frac{\lambda z}{L_{x'} + L_x} \quad (3)$$

$$\Delta y = \frac{\lambda z}{L_{y'} + L_y} \quad (4)$$

Sendo assim, o número total de amostras em x e y , necessárias para reconstruir o objeto através do holograma é:

$$N_x = \frac{L_x}{\Delta_x} \quad (5)$$

$$N_y = \frac{L_y}{\Delta_y} \quad (6)$$

De acordo com as equações 1 a 6, observa-se que para cada comprimento de onda há um determinado número de amostras requeridas e um intervalo de amostragem. Todas as contribuições provenientes da luz branca, ou seja, vários comprimentos de onda são somados a fim de se obter a imagem de reconstrução resultante, segundo o princípio da superposição. Estes valores podem ser alterados conforme o comprimento de onda da iluminação utilizada. Considerando que neste trabalho foi utilizada luz branca, cujo comprimento de onda médio $\bar{\lambda}$ é da ordem de 633 nm, a soma de várias contribuições relativas a vários comprimentos de onda vai gerar a imagem de reconstrução.

Anexo A*XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada / ID: 1185-1*

1

White light computer-generated element based on halftoningCristhiane Gonçalves, José Carlos Pizolato Júnior, Luiz Gonçalves Neto
*Universidade de São Paulo*Giuseppe Antônio Cirino
Grupo Holovision

White light holograms are used in several applications, such as security, to assure the authenticity of credit cards and other documents. These holograms usually uses the reflection of light and in some cases presents a undesirable effects like chromatic distortions called as Rainbow effect. They are produced using traditional holography techniques. Holograms or can be also generated by computer, like the CGHs (Computer generated holograms). There are many algorithms which are regularly used to generate holograms, like the IFTA (Iterative Fourier Transform Algorithm), introduced in digital holography digital by Gerchberg& Saxton. This work presents a method to generate white light phase elements using half toning techniques and binary optics. Some advantages are the low cost production and low chromatic aberration. No iterative algorithms are used for the calculation of the element. The phase devices were manufactured by employing well-established, low-cost integrated circuits fabrication steps. Optical verifications of the intensity distribution retrieved from the phase information encoded are shown.

Anexo B

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)