Desenho de personagem de desenhos animados com texto preto sobre fundo branco

Descrição gerada automaticamente com confiança média

Universidade Federal do Ceará

Centro de Tecnologia

Departamento de Engenharia de Teleinformática

Disciplina de Guias e Ondas

Semestre 2023.1

**TRABALHO 03 - GUIAS DE ONDA**

Aluno: Francisco Lucas Ferreira Martins

Matrícula: 472495

2023

**SUMÁRIO**

**INTRODUÇÃO2**

**CONCEITOS INICIAIS2**

Ondas Eletromagnéticas2

Equações de Maxwell3

Princípio da Superposição4

Reflexão e Refração4

Impedância Característica5

**GUIAS DE ONDAS6**

**SOLUÇÕES GERAIS PARA OS MODOS DE PROPAGAÇÃO9**

*TEM*9

*TE*10

*TM*10

**GUIA DE ONDA RETANGULAR10**

ONDA *TE*11

ONDA *TM*13

**PROJETO DE FILTRO MAIOR BANDA PASSANTE EM GUIA RETANGULAR13**

CÓDIGO14

EXEMPLO15

**GUIA DE ONDA CIRCULAR16**

ONDA *TE*17

ONDA *TM*18

**PROJETO DE FILTRO MAIOR BANDA PASSANTE EM GUIA CIRCULAR19**

CÓDIGO19

EXEMPLO20

**COMPARAÇÃO ENTRE GUIAS RETANGULARES E CIRCULARES20**

**REFERÊNCIAS21**

**INTRODUÇÃO**

Guias de ondas é um ramo da física que estuda a propagação de ondas eletromagnéticas em estruturas confinadas. Essas estruturas são amplamente utilizadas em diversos dispositivos e sistemas. A partir dos estudos é possível realizar análises teóricas, simulações computacionais e projetar guias de ondas para diversos propósitos, como telecomunicações, micro-ondas, óptica e muito mais.

**CONCEITOS INICIAIS**

Para entender a teoria de guias de ondas, é fundamental ter conhecimento dos conceitos do eletromagnetismo. Alguns dos principais são citados abaixo:

Ondas Eletromagnéticas: As ondas eletromagnéticas são oscilações de campos elétricos e magnéticos que se propagam no espaço. Elas são descritas pela equação de onda eletromagnética, que relaciona a velocidade de propagação, a frequência e o comprimento de onda.

A equação da onda eletromagnética, que descreve a propagação dessas ondas no vácuo ou em meios dielétricos e condutores lineares, é dada por:

representa o vetor campo elétrico;

representa o vetor campo magnético;

representa a permeabilidade magnética do meio;

representa a permissividade elétrica do meio;

é o laplaciano e é possível ver uma derivada de segunda ordem nas equações também.

Essas equações descrevem como os campos elétricos e magnéticos se propagam no espaço, obedecendo às leis da conservação da carga elétrica e da conservação do fluxo magnético. A solução dessas equações resulta em ondas que se propagam com uma velocidade determinada pela relação entre a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica do meio.

Equações de Maxwell: As equações de Maxwell descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos em presença de cargas elétricas e correntes. Essas equações são essenciais para entender a propagação e interação das ondas eletromagnéticas.

As Equações de Maxwell podem ser dadas na forma diferencial da seguinte forma:

Lei de Gauss para o campo elétrico:

Essa equação relaciona o divergente do campo elétrico () com densidade de carga elétrica () e à permissividade elétrica do meio ();

Lei de Gauss para o campo magnético:

Essa equação afirma que o fluxo magnético total através de qualquer superfície fechada é zero;

Lei de Faraday:

Essa equação descreve a indução eletromagnética, onde a circulação do campo elétrico () é proporcional à taxa de variação do campo magnético, que fica do lado direito da igualdade;

Lei de Ampere – Maxwell:

Essa equação relaciona a circulação do campo magnético () com a densidade de corrente elétrica () e às variações do campo elétrico, representados pela derivada, levando em consideração a permissividade elétrica (ε₀) e a permeabilidade magnética do meio (μ₀).

As equações são fundamentais para a compreensão da propagação das ondas eletromagnéticas em guias de ondas. Ao analisar a propagação de uma onda em um guia de ondas, as equações podem ser usadas para determinar os modos de propagação, calcular a distribuição dos campos elétricos e magnéticos, considerar a interação com as fronteiras do guia de ondas e analisar a transferência de energia.

Princípio da Superposição: O princípio da superposição afirma que, em um meio linear, a resposta a um conjunto de fontes de ondas é a soma das respostas individuais a cada fonte. As equações de superposição específicas para guias de ondas dependem da natureza do guia e dos modos de propagação.

No caso de guias de ondas lineares e invariantes no tempo, as equações de superposição podem ser escritas de forma geral como:

e representam os campos elétricos e magnéticos totais na guia de ondas, respectivamente, e e representam as contribuições individuais de cada fonte de onda.

O princípio da superposição permite que as ondas se propaguem independentemente umas das outras e se combinem dentro da estrutura do guia. Isso significa que, se tivermos múltiplas fontes gerando ondas dentro do guia de ondas, a onda resultante será a soma das contribuições de cada fonte. As equações de superposição permitem calcular os campos resultantes no guia de ondas a partir das contribuições individuais, o que é especialmente útil quando há múltiplas fontes de ondas ou quando se deseja analisar a interação entre diferentes modos de propagação.

Reflexão e Refração: Quando uma onda eletromagnética incide em uma interface entre dois meios diferentes, parte da energia é refletida e parte é transmitida, sofrendo uma mudança de direção. O estudo da reflexão e refração é importante para compreender a propagação das ondas em guias de ondas.

Reflexão: A reflexão ocorre quando uma onda encontra uma interface entre dois meios com propriedades diferentes, resultando em uma mudança de direção da onda. A lei da reflexão estabelece que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão em relação à normal à superfície de interface:

onde é o ângulo de incidência e é o ângulo de reflexão.

Refração: A refração ocorre quando uma onda atravessa uma interface entre dois meios com diferentes índices de refração. A lei da refração, também conhecida como , estabelece a relação entre os ângulos de incidência () e refração () e os índices de refração () dos meios envolvidos:

onde e são os índices de refração dos meios de incidência e de transmissão, respectivamente.

As equações são usadas para determinar as direções e as amplitudes das ondas refletidas e refratadas em interfaces dentro do guia. A análise desses fenômenos é essencial para projetar guias de ondas eficientes e garantir o controle adequado da propagação das ondas dentro da estrutura.

Impedância Característica: A impedância característica é uma propriedade das guias de ondas que descreve a relação entre as componentes elétrica e magnética das ondas. Ela é importante para garantir a transferência eficiente de energia nas interfaces das guias de ondas. Ela é denotada por e é expressa em ohms ().

A impedância característica determina a forma como as ondas se propagam na guia de ondas e interagem com as interfaces e terminações. Ela pode ser calculada usando as propriedades do guia de ondas, já citadas anteriormente, além disso as dimensões geométricas da guia também são importantes. No caso de uma guia de ondas retangular, a impedância característica é dada pela seguinte equação:

onde é a permeabilidade magnética do meio do guia, é a permissividade elétrica do meio do guia, é a largura do guia de ondas e é a altura do guia de ondas.

A impedância característica também está relacionada à Relação de Onda Estacionária () ou coeficiente de reflexão (). A é uma medida da quantidade de energia refletida em uma interface e é calculada pela razão entre a diferença das impedâncias e a soma das impedâncias. Ela pode ser expressa como:

onde é a impedância de carga conectada ao guia de ondas.

**GUIAS DE ONDAS**

**Uma imagem contendo Diagrama

Descrição gerada automaticamente**

Figura 1.0 – Guias de ondas.

As guias de ondas são estruturas projetadas para confinar e direcionar a propagação de ondas eletromagnéticas, como já dito anteriormente. Existem diferentes tipos de guias de ondas, cada um com características específicas e adequada para diferentes faixas de frequência e modos de propagação. Os principais são listados abaixo:

Fibras Ópticas: As fibras ópticas são guias de ondas que usam o princípio da reflexão total interna para propagar a luz ao longo de um núcleo de vidro ou plástico. Elas são amplamente utilizadas em telecomunicações para transmitir dados em alta velocidade e com baixa perda de sinal.

Cabos Coaxiais: Os cabos coaxiais consistem em um condutor central cercado por um condutor externo separados por um material dielétrico. Eles são usados em sistemas de transmissão de sinais de rádio frequência () e micro-ondas.

*Waveguides*: Os *waveguides* são estruturas metálicas ou dielétricas que permitem a propagação de ondas eletromagnéticas. Eles são usados em sistemas de micro-ondas e antenas, permitindo o controle preciso da propagação das ondas.

Guia de Ondas Ópticas Planares: São guias de ondas baseados em uma estrutura plana, como silício ou materiais poliméricos. Eles são utilizados em dispositivos ópticos integrados, como circuitos fotônicos em chips, moduladores e acopladores.

Os guias de ondas permitem que as ondas eletromagnéticas se propaguem de maneira controlada, evitando a dispersão e a perda de energia. Eles possuem propriedades específicas, como a capacidade de suportar modos de propagação distintos, como os modos *TE* (transversal elétrico) e *TM* (transversal magnético), dependendo da configuração da estrutura.

O foco desse trabalho é estudar as *waveguides* do tipo retangular e circular e fazer uma comparação entre as duas, mas antes é preciso entender como os modos propagantes afetam e ajudam no entendimento do funcionamento de uma *waveguide*, por isso, a seguir está uma explanação de forma geral sobre os modos propagantes das *waveguides*.

As guias de ondas podem possuir diferentes modos de propagação, que de forma resumida são configurações espaciais de como as ondas ficam dentro das guias. Os modos mais comuns são o *TEM* (*Transverse Electro-Magnetic*), *TE* (*Transverse Electric*) e *TM* (*Transverse Magnetic*), que já foram citados anteriormente. Para *waveguides* retangulares e circulares existem características especificas e matemáticas própria, porém, uma solução geral para cada uma é encontrada a partir das Leis de Maxwell:

Assumindo que temos campos harmônicos no tempo com de dependência e uma propagação ao longo do eixo z, podemos definir os campos elétricos e magnéticos, respectivamente, como:

em que e representam as componentes dos campos elétricos e magnéticos transversais e e representam as componentes longitudinais dos campos elétricos e magnéticos.

Assumindo agora que as *waveguides* estão livres de fontes, podemos escrever as equações de Maxwell na seguinte forma:

Observando a dependência em , podemos reduzir as componentes das equações anteriores por outras equações:

Com essas seis equações é possível encontrar os quatro componentes transversais do campo para e , dessa forma, temos:

**SOLUÇÕES GERAIS PARA OS MODOS DE PROPAGAÇÃO**

As quatro equações apresentadas são a forma geral da solução de problemas com *waveguides*, a seguir serão apresentadas as soluções específicas que podem ser encontradas a partir delas:

*TEM*:  
As ondas eletromagnéticas transversais (*TEM*) são caracterizadas por , isso significa que os campos transversais são nulos. Além disso, é preciso também que . Ondas do tipo *TEM* existem para quando dois ou mais condutores estão presentes. Um exemplo de *TEM* são as ondas planas pois elas não possuem componentes de campo na direção de propagação. As equações de *Helmholtz* são uma forma especial das equações de onda que descrevem a propagação de ondas em um meio, para uma *TEM* temos que as equações são:

A impedância de onda *TEM* pode ser encontrada como a razão entre os campos elétrico e magnético transversais:

Podemos combinar as duas equações para encontrar a expressão geral para campos transversais:

*TE:*

As ondas transversais elétricas (*TE*), são caracterizadas por e , isso significa que os campos elétricos são transversais em relação à direção da propagação, enquanto os campos magnéticos possuem componentes transversais e longitudinais. As equações de *Helmholtz*, se reduzem para:

E a impedância pode ser dada por:

pode se observar que a impedância depende da frequência para esse caso.

As ondas *TE* são normalmente usadas em guias retangulares e possuem características diferentes de ondas *TM*.

*TM:*

As ondas transversais magnéticas (*TM*) são diferentes das *TE* pois elas possuem campos magnéticos transversais em relação à direção de propagação e os campos elétricos possuem componentes transversais e longitudinais, ou seja, e . As equações de *Helmholtz* se reduzem apenas para os campos elétricos, sendo assim:

Sua impedância pode ser dada por:

que é dependente da frequência, assim como a anterior.

As ondas *TE* e *TM* podem ser suportadas em condutores fechados, assim como, entre mais de um condutor.

**GUIA DE ONDA RETANGULAR**

Os guias de ondas retangulares foram criados há muito tempo, elas são linhas de transmissão que transportam micro-ondas, além de serem usadas em outras aplicações. Elas ainda são muito usadas para sistemas de alta potência, sistemas de satélites, aplicações de ondas milimétricas, dentre outras coisas.

Forma

Descrição gerada automaticamente

Figura 1.1 – Guia de onda retangular.

Eles são um canal retangular de paredes condutoras paralelas, eles são atualmente muito usados na área de telecomunicações devido suas propriedades de propagação. Essa é a característica mais importante dos guias retangulares, pois eles suportam transportar diversos tipos de ondas eletromagnéticas. As principais são a *TE* e a *TM*, eles não transportam ondas *TEM* pois esses possuem apenas um condutor.

ONDA *TE:*

Como já dito anteriormente, para ondas transversais elétricas, a componente transversal do campo elétrico () é não nula, enquanto a componente transversal do campo magnético () é nula. Isso significa que a energia é transportada principalmente pelos campos elétricos transversais, isso pode ser representado pela equação:

A equação pode ser resolvida a partir do método de separação das variáveis:

A solução geral para a variável é dada por:

Substituindo e e , para e sendo constantes arbitrárias a partir do , é possível encontrar a forma final para :

onde é uma constante encontrada a partir de e ;

a constante de propagação é dada por:

A frequência de corte, , de cada modo de propagação é dada pela combinação das variáveis e , pode ser encontrada pela equação:

O modo dominante é aquele que possui menor frequência de corte, para , sendo assim o modo dominante para *TE* ocorre quando e :

Além disso, para , o número de onda de corte e a constante de propagação são:

O modo dominante, também conhecido como modo fundamental, podem ter características variáveis de acordo com as dimensões do guia de ondas, a frequência de operação e até mesmo as condições de contorno. Na prática, ele é importante pois concentra a maior parte da energia pelo guia de ondas.

ONDA *TM*:

Em ondas , a componente transversal do campo magnético () é não nula, e a componente transversal do campo elétrico () é nula. Eles são caracterizados pela presença de nós de campo magnético na direção transversal aos guias retangulares. A energia é transportada principalmente pelos campos magnéticos transversais:

É possível encontrar as equações e variáveis para da mesma forma que na onda anterior:

Essa é a solução geral para , substituindo e e , para e sendo constantes arbitrárias a partir do , temos a solução geral para :

onde é uma constante encontrada a partir de e ;

As equações para a frequência e constante de propagação são as mesmas da onda *TE*, sendo assim, ao projetar e analisar sistemas de ondas transversais magnéticas, assim como as elétricas, é preciso considerar as propriedades eletromagnéticas do meio, as dimensões e as condições de contorno aplicadas.

**PROJETO DE FILTRO MAIOR BANDA PASSANTE EM GUIA RETANGULAR**

No caso de um guia de ondas retangular, um filtro de banda passante pode ser projetado utilizando modos de propagação TE ou TM.

Para projetar um filtro de maior banda passante em um guia de ondas retangular, podemos utilizar uma combinação de diferentes modos de propagação para obter uma resposta de frequência ampla, os modos estudados foram *TE* e *TM.* Um filtro de banda passante é um dispositivo que permite a passagem de sinais em uma faixa específica de frequência, enquanto atenua ou bloqueia sinais fora dessa faixa. A ideia é aproveitar os modos de propagação que possuem frequências de corte diferentes, permitindo assim a passagem de um espectro mais amplo de frequências. O programa foi feito em *Matlab* e o código e a plotagem estão a seguir:

CÓDIGO:

|  |
| --- |
| %Projeto de filtro maior banda passante em guia retangular  %Parâmetros do filtro e do guia  f = 5e9; % Frequência em Hz  lb = 100e6; % Largura de banda em Hz  cg = 0.67; % Comprimento da guia em metros  lg = 0.12; % Largura da guia em metros  %Variáveis  eps = 8.854e-12;  mu = 4\*pi\*1e-7;  tt = 1e-9; % Tempo total em segundos  dx = 0.01; % Passo de discretização de x em metros  dy = 0.01; % Passo de discretização de y em metros  dt = 0.25\*dx/3e8; % Passo de discretização temporal em segundos  % Estruturação do guia de ondas  x = -cg/2:dx:cg/2;  y = -lg/2:dy:lg/2;  [X,Y] = meshgrid(x,y);  guia = zeros(size(X));  guia(abs(X) <= cg/2 & abs(Y) <= lg/2) = 1;  Ez = zeros(size(X));  Hy = zeros(size(X));  ts = round(tt/dt);  for n = 1:ts  % Atualização dos campos elétricos (Ez)  Ez(:,2:end) = Ez(:,2:end) + (dt/(eps\*dx))\*(Hy(:,2:end) - Hy(:,1:end-1));    % Atualização dos campos magnéticos (Hy)  Hy(:,1:end-1) = Hy(:,1:end-1) + (dt/(mu\*dx))\*(Ez(:,2:end) - Ez(:,1:end-1));    % Aplicação da fonte Gaussiana  Ez((size(X,1)-1)/2,(size(X,2))/2) =exp(-((n-30)^2)/(100));  end  subplot(2,1,1)  % Plotagem da guia retangular  imagesc(x, y, guia);  colormap("colorcube");  axis equal tight;  xlabel('x em metros');  ylabel('y em metros');  title('Guia de Ondas Retangular');  % Plotagem do Campo Elétrico Ez  subplot(2,1,2)  imagesc(x, y, Ez);  colormap("prism");  axis equal tight;  xlabel('x em metros');  ylabel('y em metros');  title('Campo Elétrico Ez na Guia Retangular'); |

**Uma imagem contendo Gráfico

Descrição gerada automaticamente**

Figura 1.2 – Plot guia de onda retangular.

EXEMPLO  
Considere um trecho de guia de ondas retangular preenchido com Teflon e feito de cobre, na faixa de frequência . As dimensões do guia de ondas são e . Encontre as frequências de corte dos primeiros cinco modos propagantes.

Solução:

Para o Teflon temos que e = 0,0004, substituindo esses valores na fórmula do corte de frequência encontramos os valores para os cinco primeiros modos propagantes:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Modos |  |  | Frequência () |
| *TE* |  |  |  |
| *TE* |  |  |  |
| *TE* |  |  |  |
| *TE, TM* |  |  |  |
| *TE, TM* |  |  |  |

**GUIA DE ONDA CIRCULAR**

Um guia de ondas circular é um tipo de estrutura utilizada para guiar e transmitir ondas eletromagnéticas em um meio circular. Ao contrário dos guias de ondas retangulares, que possuem seções retangulares, os guias de ondas circulares têm uma geometria circular. Eles oferecem várias vantagens, como melhor distribuição de campo e menor propagação de modos indesejados em comparação com guias de ondas retangulares. Além disso, eles são menos suscetíveis a perdas devido a curvaturas e têm a capacidade de transportar um maior número de modos de propagação.

Uma imagem contendo objeto, relógio, diferente, guarda-chuva

Descrição gerada automaticamente

Figura 1.3 – Guia de onda circular.

Os modos de propagação em um guia de ondas circular são categorizados como modos *TE* e *TM*, assim como nos guias de ondas retangulares. A distribuição espacial dos campos elétricos e magnéticos para cada modo é determinada pela ordem do modo e pelo número de zeros nas funções de Bessel modificadas.

ONDA *TE:*

O método de resolução para uma onda circular é o mesmo que para uma onda retangular, então para , temos a partir da equação da onda:

Para coordenadas cilíndricas temos que:

Resolvendo por separação das variáveis, encontramos:

Após algumas manipulações algébricas é possível encontrar a equação:

E a solução geral fica:

é periódico e por isso pode ser substituído por um integrador , sendo assim ficamos com:

Podemos ainda reorganizar a equação diferencial de Bessel a partir das equações anteriores e assim obtemos:

Mesclando as duas equações principais, nós encontramos a forma geral para e considerando para encontramos a equação de para , respectivamente:

para quando .

As equações para a constante de propagação e da frequência de corte para uma onda *TE*, será:

onde são valores tabelados para o modo de onda propagante *TE* de um guia circular.

ONDA *TM:*

Assim como já explicado anteriormente, para o modo propagante transversal, a componente transversal elétrica é nula, para os guias circulares não será diferente, dessa forma para coordenadas cilíndricas, temos:

E a solução geral para o campo elétrico será a mesma que para o campo magnético:

A frequência de corte e a constante de propagação para *TM* serão:

os valores de também são tabelados para o modo de onda propagante *TM* de um guia circular.

**PROJETO DE FILTRO MAIOR BANDA PASSANTE EM GUIA CIRCULAR**

Podemos projetar um filtro de maior banda passante em um guia de ondas circular, utilizando uma técnica de criar várias camadas concêntricas de materiais com propriedades diferentes ao longo do guia de ondas. Essas camadas são projetadas para suportar diferentes modos de propagação, permitindo assim uma resposta de frequência ampla.

A simulação desse filtro pode ser realizada utilizando ferramentas de simulação eletromagnética, como o método de elementos finitos ou o método das diferenças finitas.

CÓDIGO

|  |
| --- |
| % Projeto de filtro maior banda passante em guia circular  % Parâmetros do filtro e do guia  f = 5e9; % Frequência em Hz  lb = 100e6; % Largura de banda em Hz  rg = 0.4; % Raio da guia circular em metros  pnts = 500; % Número de pontos da guia circular  % Estruturação do guia circular  th = linspace(0, 2\*pi, pnts);  x = rg\*cos(th);  y = rg\*sin(th);  % Resposta em frequência do filtro para guia circular  fq = linspace(f - lb/2, f + lb/2, 1000);  rps = abs(sinc((fq - f) / lb));  subplot(1,2,1)  % Plotagem do guia circular  plot(x, y, 'k', 'LineWidth', 2);  axis equal;  title('Guia de Ondas Circular');  xlabel('X em metros');  ylabel('Y em metros');  grid on;  subplot(1,2,2)  % Plotagem da resposta em frequência  plot(fq, rps, 'k', 'LineWidth', 2);  title('Resposta em Frequência');  xlabel('Frequência em Hz');  ylabel('Magnitude');  grid on |

Gráfico

Descrição gerada automaticamente

Figura 1.4 - Plotagem guia de onda circular.

EXEMPLO

Encontre as frequências de corte dos dois primeiros modos de propagação de um guia de ondas circular preenchido com Teflon com raio .

Sabemos que os primeiros modos propagantes para um guia de onda circular estão em e , sabendo disso, podemos calcular as frequências de corte utilizando as equações que foram apresentadas no trabalho e utilizando os valores tabelados de e , agora basta substituir esses valores nas equações:

**COMPARAÇÃO ENTRE OS GUIAS RETANGULARES E CIRCULARES**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Guia de onda retangular | Guia de onda circular |
| Vantagens | - Fácil de fabricar;  - Usado comumente em sistemas de micro-ondas. | - Menos suscetível a perdas por conta das curvaturas;  - Melhor distribuição de campo. |
| Desvantagens | - Limitado a frequências baixas;  - Suscetível a perdas por conta das curvaturas. | - Difícil de fabricar. |
| Modos de propagação | TM e TE | TM e TE |

**REFERÊNCIAS**

POZAR, David M. Microwave Engineering. 4ª ed. USA: Jonh Wiley & Sons, Inc, 2012;

ORFANIDIS, Sophocles J. Electromagnetic Waves and Antennas. 1ª Ed. USA: Editora Free;

ANTENOR, Sérgio. Notas Guias de Onda. Apresentação de Slides, Universidade Federal do Ceará, 2023;