

13º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2022

Simulação do comportamento dinâmico de interferômetros homódinos passivos de dois feixes

RAFAELA M. MARTIN¹, JOÃO PAULO C. MENEZES², ANDRYOS S. LEMES³

¹Graduando Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIC/CNPq, IFSP-PEP, rafaela.martin@aluno.ifsp.edu.br.

²Docente, IFSP-BRI, joao.menezes@ifsp.edu.br.

³Docente, IFSP-PEP, andryos.lemes@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.06.01-3 Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas

RESUMO: A interferometria óptica é uma técnica com elevada sensibilidade aplicada à medições de diversas grandezas físicas em escalas microscópicas, como aferição de deslocamentos e vibrações mecânicas. Vários métodos de demodulação de sinais interferométricos têm sido publicados na literatura no decorrer dos anos, mostrando ser uma área ainda em aberto e passível de contribuição. Contudo, a montagem em laboratório de um interferômetro óptico despende de uma grande quantidade de recursos financeiros, uma vez que seu aparato exige diversos componentes ópticos além de um ambiente controlado contra perturbações externas, o que pode ser um impeditivo para alguns pesquisadores que tenham interesse nesta área. Deste modo, este trabalho dedicou-se a criar em ambiente *Simulink* o comportamento dinâmico de um interferômetro homódino passivo de dois feixes. Por meio do estudo da função de transferência do interferômetro, levantaram-se e implementaram-se as características do sinal interferométrico de saída para diversas condições de modulação de fase óptica. Desta forma, espera-se contribuir para que os pesquisadores interessados possam utilizar o sistema dinâmico desenvolvido para emular todas as características do interferômetro e assim poderem testar as técnicas de demodulação de fase óptica sem a necessidade de um arranjo experimental.

PALAVRAS-CHAVE: interferômetro óptico; simulação dinâmica; ambiente gráfico computacional.

Simulation of the dynamic behavior of a two-beam passive homodyne interferometer

ABSTRACT: Optical interferometry is a highly sensitive technique applied to several physical magnitudes measurements on microscopic scales, such as displacements and mechanical vibrations. Many methods of interferometric signals demodulation have been published over the Years, demonstrating to be a still opened area eligible for contribution. However, an optical interferometer assembly in the laboratory requires a large financial resource, once its equipments demands several optical components in addition to a controlled environment for external disturbances, which can be an obstacle for researchers who are interested in this area. Thus, this work was dedicated to create, in a Simulink environmet, the dynamic behavior of a two-beam passive homodyne interferometer. Through the study of the interferometer transfer function, it was obtained and implemented the output interferometric signal characteristics for different optical phase modulation conditions. This way, its expected

to contribute so that other researchers can be able to use the developed dynamic system to emulate all the interferometer characteristics and thus be able to test the optical phase demodulation techniques without the need of an experimental setup.

KEYWORDS: optical interferometer; dynamic simulation; computer graphic environment.

INTRODUÇÃO

Os atuadores e manipuladores acionados por cerâmicas piezoelétricas tornaram-se os elementos chaves em atuadores da indústria moderna de micro e nano tecnologias (WU; MIZUNO; NAKAMURA, 2020). Porém, junto à restrição de tamanho, surgem dificuldades alusivas à medição de grandezas físicas como vibração, deslocamento e deformação. Desta forma, a interferometria óptica de dois feixes é uma solução amplamente empregada nos laboratórios de metrologia, pois permite medições de pequenos deslocamentos com elevada sensibilidade (KHAN; Le Calvé; NEWPORT, 2020). Entretanto, a montagem em laboratório de um interferômetro é de elevado custo. Desta forma é de interesse a implementação de um ambiente de simulação para emular o comportamento dinâmico de um interferômetro para que os pares da área possam testar as técnicas de demodulação de fase óptica sem a necessidade de um interferômetro físico.

Sendo assim, neste trabalho implementa-se em ambiente *Simulink* o comportamento dinâmico de interferômetros homódinos passivos de dois feixes. Como o *Simulink* possui reconhecida versatilidade e confiabilidade, esse ambiente é uma excelente opção para emular o comportamento dinâmico de um interferômetro. Em virtude de sua flexibilidade, o sistema desenvolvido poderá ser facilmente ajustado para operar com várias outras arquiteturas de interferômetros, podendo empregar técnicas temporais ou espectrais de demodulação de fase óptica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se na Figura 1 o interferômetro na configuração de Michelson, o qual é frequentemente empregado para medições de micro e nano vibrações (HARIHARAN, 2010). Nele, um feixe *laser* incide em um divisor de feixes (*BS*) com relação 50:50. Os dois feixes originados seguem caminhos distintos, denominados de Ramo referência e Ramo sensor, até refletirem nos espelhos de reflexão total *M1* (fixo) e *M2* (móvel), respectivamente. Em seguida os feixes retornam a *BS*, onde metade de suas potências ópticas é transmitida em direção ao fotodetector, para posterior processamento de sinal, enquanto a outra metade retorna à cavidade *laser*.

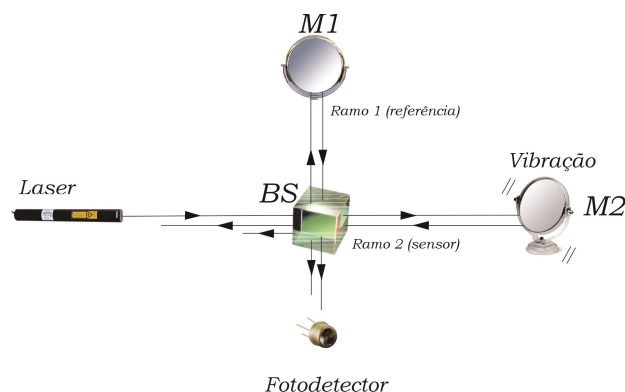


Figura 1: Esquema do interferômetro de Michelson.

Pode-se demonstrar que a intensidade óptica sobre o fotodetector é dada por (HARIHARAN, 2010):

$$I(t) = \frac{I_0}{2} [1 + V \cos(\Delta\phi(t) + \phi_0)] \quad (1)$$

sendo que $I(t)$ é intensidade óptica de saída sobre o fotodetector; I_0 é intensidade óptica do *laser*; V é visibilidade das franjas de interferência, o qual informa sobre as potências individuais e o grau de paralelismo entre os campos que se interferem; $\Delta\phi(t)$ é variação de fase correspondente à grandeza física a ser mensurada e ϕ_0 é diferença de fase, idealmente estática, entre os ramos do interferômetro.

Na sequência, modelou-se a equação (1), no sistema interativo *Matlab*, utilizando a plataforma *Simulink*, o qual é um ambiente gráfico de modelagem que permite realizar simulações de sistemas dinâmicos (KARRIS, 2006). Desta forma, apresenta-se na Figura 2 a modelagem em *Simulink* do comportamento dinâmico de um interferômetro homódino passivo de dois feixes. O sistema desenvolvido e apresentado se encontra disponível em (MARTIN, 2022).

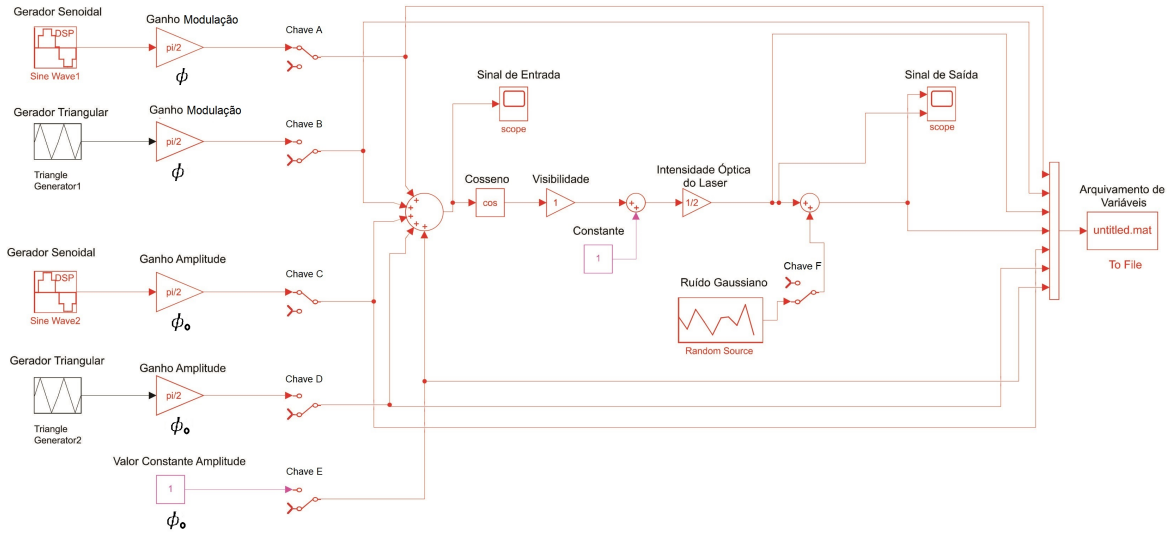


Figura 2: Modelagem em *Simulink* do comportamento dinâmico de um interferômetro homódino passivo de dois feixes.

Para dar maior diversidade nas condições de operação do interferômetro simulado, construiu-se o modelo de forma que o usuário pudesse por meio de chaves de seleção configurar parâmetros como a visibilidade V das franjas de interferência, o qual trata-se de um fator ligado diretamente com a qualidade do sinal interferométrico de saída, e as amplitudes, fases, frequências e formas de onda dos sinais de modulação $\Delta\phi(t)$ e do termo de fase ϕ_0 que está relacionado às derivas ambientais. Em adição, sabendo que na prática o sinal fotodetectado possui ruído elétrico oriundo do sistema de condicionamento de sinais, adicionou-se um bloco de ruído gaussiano que é somado ao sinal interferométrico de saída, o que permite ao usuário configurar as condições de ruído sob as quais suas técnicas de recuperação de fase óptica serão testadas. Por fim, foram adicionados blocos específicos para a visualização de sinais, sendo possível o operador acompanhar em uma tela o comportamento dinâmico dos sinais de entrada e saída do interferômetro. Além disso, as principais variáveis do estado interno do interferômetro, assim como os sinais de entrada e saída são armazenadas em um bloco de arquivamento, onde ficam salvas na área de trabalho do *Matlab*. Com isso, o usuário poderá utilizar essas variáveis para posterior análise e emprego de técnicas de demodulação de fase óptica.

Ressalta-se que a modelagem é dependente do tempo de amostragem da simulação. Sendo assim, para que não ocorra conflito entre os blocos, criou-se uma variável pela programação do *Simulink* (*Callbacks*), onde criado uma variável e atribuído a está um valor, os lugares que receberem esta

variável criada utilizarão aquele valor de referência para realizar a simulação.

Na sequência serão apresentados os resultados que se obtêm com o interferômetro modelado em *Simulink*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se na Figura 3 os resultados do interferômetro sob o regime de baixo índice de modulação e na presença de derivas ambientais que estão relacionadas à fase $\phi_0(t)$, sendo (a) e (b), respectivamente, a variação de fase no interferômetro, $\Phi(t) = \Delta_\phi(t) + \phi_0(t)$, e a intensidade óptica de saída normalizada, $I_n(t) = \frac{I(t)}{\max[I(t)]}$, com e sem adição de ruído, para sinais senoidais de $\Delta_\phi(t)$ e $\phi_0(t)$ com amplitudes e frequências de $\frac{\pi}{10}$ rad e 1 kHz, e $\frac{\pi}{2}$ rad e 10 Hz, respectivamente. Pode-se observar o fenômeno de desvanescimento do sinal de saída a medida que o valor instantâneo de $\phi_0(t)$ desloca-se em direção à 0 rad.

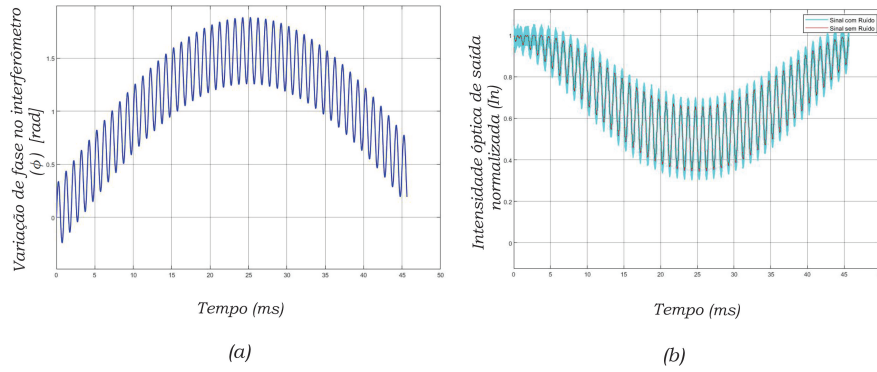


Figura 3: Simulação do interferômetro sob o regime de baixo índice de modulação. (a) $\Phi(t) = \Delta_\phi(t) + \phi_0(t)$, para sinais senoidais de $\Delta_\phi(t)$ e $\phi_0(t)$ com amplitudes e frequências de $\frac{\pi}{10}$ rad e 1 kHz, e $\frac{\pi}{2}$ rad e 10 Hz, respectivamente. (b) $I_n(t) = \frac{I(t)}{\max[I(t)]}$.

Na sequência, Figura 4, a simulação do comportamento do interferômetro operando no regime de alto índice de modulação, sendo que em (a) e (b), respectivamente, têm-se a variação de fase no interferômetro $\Phi(t)$ e a intensidade óptica de saída normalizada $I_n(t)$, com e sem adição de ruído, para $\Delta_\phi(t)$ senoidal, amplitude de 3π rad e frequência de 1 kHz, e $\phi_0(t)$ com valor constante, $\frac{\pi}{2}$ rad. Pode-se observar o regime de multi-franjas por meio das reentrâncias na forma de onda do sinal $I_n(t)$.

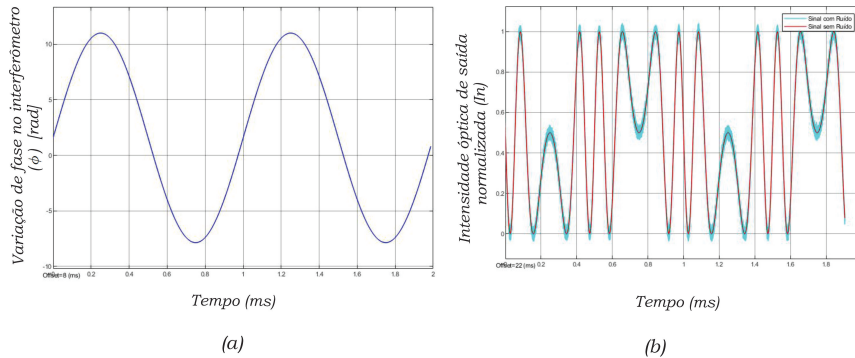


Figura 4: Simulação do interferômetro sob o regime de alto índice de modulação. (a) $\Phi(t) = \Delta_\phi(t) + \phi_0(t)$, para $\Delta_\phi(t)$ senoidal com amplitude de 3π rad e frequência de 1 kHz, e $\phi_0(t)$ com valor constante de $\frac{\pi}{2}$ rad. (b) $I_n(t) = \frac{I(t)}{\max[I(t)]}$.

Por fim, apresenta-se na Figura 5 o efeito do ajuste do parâmetro visibilidade V sobre a intensidade óptica de saída $I_n(t)$, sendo que em (a) e (b) tem-se $V = 1$ e $V = 0,5$, respectivamente. Os demais parâmetros são: $\Delta_\phi(t)$ senoidal com amplitude de π rad e frequência de 1 kHz, e $\phi_0(t)$ com

valor constante de $\frac{\pi}{2}$ rad. Pode-se observar que a diminuição do parâmetro visibilidade implica em uma diminuição da amplitude do sinal interferométrico de saída, o que pode tornar mais complexo o condicionamento do sinal fotodetectado. Nessas simulações não foram adicionados ruído no sinal de saída.

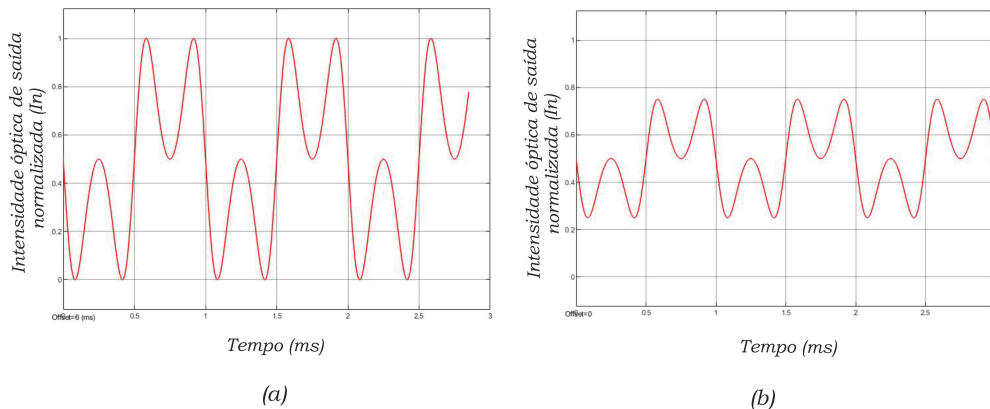


Figura 5: Efeito da visibilidade V sobre o sinal de saída do interferômetro simulado para $\Delta\phi(t)$ senoidal com amplitude de π rad e frequência de 1 kHz, e $\phi_0(t)$ com valor constante de $\frac{\pi}{2}$ rad. (a) $V = 1$. (b) $V = 0,5$.

CONCLUSÕES

Este trabalho dedicou-se a desenvolver em ambiente *Simulink* a simulação do comportamento dinâmico de um interferômetro homódino passivo de dois feixes.

Observou-se que o modelo construído foi capaz de emular o interferômetro operando nos regimes de baixo e alto índice de modulação, além da possibilidade do usuário configurar a qualidade desejada da visibilidade das franjas de interferência. Em adição, apresentou-se que é possível adicionar ruído ao sinal interferométrico de saída, o que fornece mais realismo à simulação.

Por fim, espera-se que esta pesquisa possa auxiliar os pesquisadores da área de modo que possam testar as técnicas de demodulação de fase óptica sem a necessidade de um interferômetro físico.

Para trabalhos futuros sugere-se adicionar saídas para visualizar o padrão de franjas de interferência e adicionar blocos relativos ao condicionamento de sinais, onde o usuário poderá inserir parâmetros como a taxa de amostragem e os erros de quantização do sistema de aquisição de dados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e ao IFSP pela infraestrutura e suporte fornecidos.

REFERÊNCIAS

- HARIHARAN, P. *Basics of interferometry*. [S.l.]: Elsevier, 2010.
- KARRIS, S. T. *Introduction to Simulink with engineering applications*. [S.l.]: Orchard Publications, 2006.
- KHAN, S.; Le Calvé, S.; NEWPORT, D. A review of optical interferometry techniques for voc detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 302, p. 111782, 2020. ISSN 0924-4247. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424719300652>>.
- MARTIN, R. M. Simulação - interferômetros homódino passivos de dois feixes. MATLAB Central File Exchange, 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/119543-simulacao-interferometros-homodino-passivos-de-dois-feixes>>.
- WU, J.; MIZUNO, Y.; NAKAMURA, K. Piezoelectric motor utilizing an alumina/pzt transducer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 67, n. 8, p. 6762–6772, 2020.