

Estudo do Ruído de Fase na Heterodinagem de Sinais Ópticos Visando Radar Fotônico

Pedro Eduardo de Sousa Dias, José Edimar Barbosa Oliveira

Resumo — A crescente demanda por novos sistemas que exigem cada vez maior disponibilidade de banda, altas taxas de transmissão, interoperabilidade e alto grau de adaptabilidade aos cenários atuais motiva o estudo de técnicas fotônicas de geração de sinais de radiofrequência a partir da heterodinagem de sinais ópticos em função de suas vantagens em relação aos sistemas eletrônicos convencionais. Este artigo faz uma breve análise do ruído de fase presente no sinal do laser empregando a técnica da autocorrelação para determinar a influência na largura de linha e na qualidade do sinal de micro-ondas gerado.

Palavras-Chave — Fotônica, geração de micro-ondas, heterodinagem, largura de linha, ruído de fase.

I. INTRODUÇÃO

Recentemente, Bogoni [1] demonstrou em testes de campo a possibilidade da geração de sinais de micro-ondas estáveis, para radares, empregando o batimento de sinais provenientes de um *Mode Locked Laser* – MLL. O excepcional baixo ruído de fase e a alta coerência entre os modos do MLL, quando comparado às tradicionais tecnologias de micro-ondas a base de eletrônica convencional, possibilita a geração de sinais de formas de ondas arbitrários acima das ondas milimétricas.

A interação entre micro-ondas e fotônica é uma área conhecida como micro-ondas em fotônica, e tem aplicações em comunicações, rede de sensores, instrumentação, sistemas bélicos e radares [1], entre outros. Esta área possui técnicas capazes de gerar sinais elétricos desde poucos kHz a dezenas de THz com baixo ruído de fase, uma vez aplicados os devidos processos de controle.

O estudo objetiva a análise da influência do ruído de fase do laser na geração de micro-ondas. Inicialmente, apresenta-se a modelagem do sinal do laser, caracterizando a largura de linha e a forma de sua envoltória, destacando o comportamento estocástico inerente ao campo do laser, descrevendo sumariamente o processo de batimento fotônico de sinais ópticos, que conforme descrito por Henry [2], produz uma largura de linha 30 vezes maior que os resultados publicados anteriormente a sua contribuição.

Por fim, busca-se contribuir com a apresentação de um exemplo ilustrativo do alargamento da largura de linha em função da variação de fase, reforçando a necessidade da seleção criteriosa da fonte laser e as implicações desta escolha na geração de micro-ondas.

II. MODELAGEM DA FONTE ÓPTICA COM RUÍDO DE FASE

O sinal do campo elétrico de um laser é descrito comumente em função de sua amplitude (E_0), frequência (ω_0) e fase (ϕ), onde as emissões espontâneas intrínsecas ao comportamento quântico da matéria devem ser observadas.

Neste estudo, postula-se um campo óptico emitido muito acima do limiar de *threshold*, por um laser de frequência única, comumente modelado como sendo uma onda quase-monocromática, de amplitude constante e com relativa variação de fase dado por [3],

$$E(t) = E_0 e^{j[\omega_0 t + \phi(t)]}, \quad (1)$$

onde ω_0 é a média da frequência óptica e $\phi(t)$ é um processo estocástico que representa a ação de emissão espontânea do laser que produz flutuações aleatórias de fase, conduzindo ao alargamento da linha espectral.

A contribuição do ruído de amplitude para a composição do espectro pode ser desprezada para o foco deste estudo, pois sua contribuição na integração é muito menor do que o ruído de fase [4]. Ao postularmos uma fase aleatória, faz-se necessário recorrer a um tratamento estatístico que contenha uma formulação que permita obter o espectro do laser, e neste ponto é útil introduzir ao estudo a função de autocorrelação do campo óptico, que é definida como

$$R_E^{(1)}(\tau) = \langle E^*(t) \cdot E(t + \tau) \rangle. \quad (2)$$

A variação instantânea do espectro da frequência angular $S_{\phi(\omega)}$, obtida do processo de autocorrelação, pode ser assumida como plana, guiada pela variação média quadrática $\langle \Delta\phi^2(\tau) \rangle$ e crescendo linearmente com o tempo de retardo, conforme descrito por [5]

$$\langle \Delta\phi^2(\tau) \rangle = |\tau| S_{\phi}(\omega) = 2\gamma|\tau|, \quad (3)$$

onde 2γ é a medida angular da largura de linha a meia altura – FWHM da densidade espectral do laser $S_E(\omega)$ obtido através da transformada de Fourier da função de autocorrelação,

$$S_E(\omega) = E_0^2 \frac{\gamma/\pi}{\gamma^2 + (\omega - \omega_0)^2}. \quad (4)$$

Verifica-se que, nas condições impostas, o espectro do campo emitido pelo laser possui um formato de uma curva tipicamente Lorentziana, cujo valor da largura de linha 2γ , definido por Henry [2], inclui um fator de alargamento extra para explicar os valores obtidos experimentalmente por [6]. Assim, tem-se que

$$2\gamma = \frac{v_g^2 h\nu g n_{sp} \alpha_m}{4P_0} (1 + \alpha^2). \quad (5)$$

Em (5) descreve-se a contribuição da variação da fase para a frequência gerada pelo laser na suposição de que o ganho do laser não é pronunciadamente saturado.

A caracterização da largura de linha de um laser pode ser realizada por meio do método da auto-heterodinagem, que é um procedimento para medição em alta resolução do espectro de saída do laser, eliminando a necessidade de um oscilador local. O diagrama esquemático da Fig. 1 mostra uma configuração adaptada da proposta de Alencar [7].

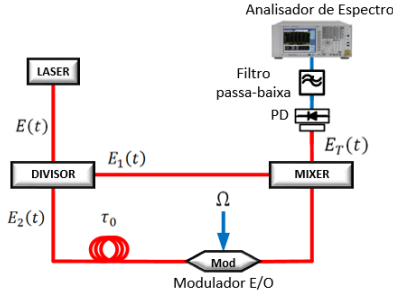


Fig. 1- Esquema de montagem para um interferômetro óptico auto-heterodino, adaptado de [7].

Tal que a densidade espectral da fotocorrente produzida por meio da detecção coerente de dois campos é dada por [4]:

$$\frac{S_I(\omega)}{\sigma^2 E_0^4} = (1 + \alpha_r^2)^2 \delta(\omega) + \alpha_r^2 e^{-2\gamma\tau_0} \delta(\omega - \Omega) + \alpha_r^2 e^{-2\gamma\tau_0} \frac{1/\pi}{1 + (\omega - \Omega)^2} \cdot \left[e^{(-2\gamma\tau_0)} - \frac{\text{sen}(\omega - \Omega)(2\gamma\tau_0)}{(\omega - \Omega)} - \text{cos}(\omega - \Omega)(2\gamma\tau_0) \right]. \quad (6)$$

De acordo com a eq. (6) e a proposta de Alencar [7] é possível avaliar o espectro resultante de uma fonte óptica.

Para o caso ilustrado na Fig. 2 observam-se três situações possíveis causadas pelo retardo de tempo presente no sistema, onde $\Delta\tau = |\tau_p + \tau_0|$ representa a soma dos retardos devido a desbalanceamentos dos percursos de propagação no sistema e à dispersão cromática causada pela fibra, dado pela eq. (8),

$$S(f) = \delta(f) e^{(-2\pi \Delta\nu \Delta\tau)} + \frac{\Delta\nu}{\pi\{(\Delta\nu)^2 + (f)^2\}} \left\{ \frac{1 - e^{(-2\pi \Delta\nu \Delta\tau)}}{\cos(2\pi f \Delta\tau) + \frac{\Delta\nu}{f} \text{sen}(2\pi f \Delta\tau)} \right\}. \quad (8)$$

O diagrama esquemático descrito por U. Gliese [10], ressalta os efeitos dispersivos na detecção heteródina remota.

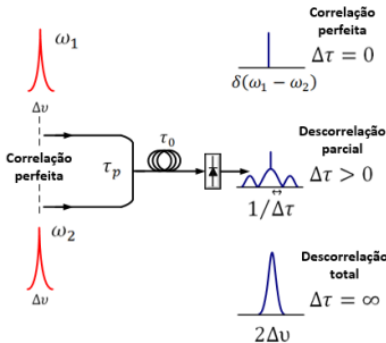


Fig. 2 – Representação do efeito da variação temporal no nível de correlação do sinal resultante do batimento entre dois sinais ópticos, adaptado de [10].

III. TÉCNICAS FOTÔNICAS DE GERAÇÃO DE MICRO-ONDAS

Desde os primeiros resultados obtidos, as técnicas de geração evoluíram com diversas abordagens [9], entre outras, buscando o maior grau de correlação possível entre os sinais ópticos para que seja transferido o menor nível de ruído de fase para o sinal de micro-ondas gerado.

Uma vez caracterizada a largura de linha, apresenta-se a influência da correlação entre dois sinais ópticos no espectro

gerado pela detecção quadrática, após o fotodetector

$$S_I(f) = (\mathcal{R}E_{01}E_{02})^2 \left(\frac{\Delta f_{mo}/2}{\pi(\Delta f_{mo}/2)^2 + f^2} \right), \quad (7)$$

onde f é a frequência de *offset* a partir do sinal de micro-ondas (f_{mo}) gerado e \mathcal{R} a responsividade do fotodetector. Em virtude de não haver correlação entre as suas respectivas fases, o ruído de fase medido varia com o tempo, o qual está relacionado à largura espectral de linha do sinal gerado [10].

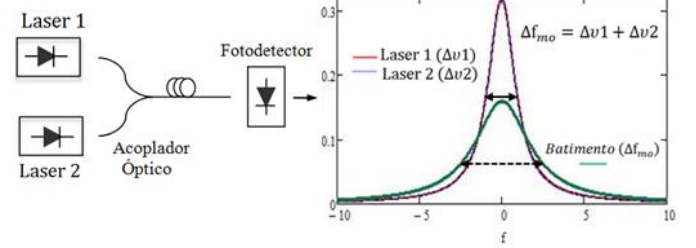


Fig. 3 – Espectro dos sinais dos lasers e do sinal de micro-ondas resultante do batimento após o fotodetector, apresentando o aumento da largura de linha em função da contribuição de fontes ópticas descorrelacionadas.

O efeito do alargamento da largura de linha do sinal de micro-ondas gerado, Δf_{mo} , está diretamente relacionado à largura de linha dos lasers, $\Delta\nu$, de acordo com a Fig 3.

IV. CONCLUSÃO

Neste artigo foram apresentados alguns fundamentos das técnicas fotônicas de geração de micro-ondas, sendo parte de um programa de mestrado que tem o interesse de empregar esse modelo. A compreensão do comportamento estatístico do laser e da heterodinagem de sinais ópticos mostra-se fundamental para a geração de sinais de micro-ondas, onde o ruído de fase é um dos parâmetros fundamentais a ser estudado. Buscou-se mostrar a importância da coerência entre as fases das fontes ópticas e os efeitos na largura de linha e da variação temporal no alargamento do espectro gerado. O estudo apresentou que a técnica de heterodinagem utilizando o MLL mostra-se promissora. Por fim, destacou-se a contribuição dos principais pesquisadores da área de micro-ondas em fotônica.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Scotti, A. Bogoni, et al. "In-Field Experiments of the First Photonics-Based Software-Defined Coherent Radar," vol. 32, no. 20, 2014.
- [2] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 18, no. 2, pp. 259–264, 1982.
- [3] P. Gallion e G. Debarge, "Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 343–349, 1984.
- [4] A. Yariv, "Optical Electronics in Modern Communications, 5th ed," New York Oxford Univ. Press, 1997.
- [5] H. E. Rowe, *Signal and Noise in Communication Systems*. NJ: Van Nostrand, 1965.
- [6] M. W. Fleming e A. Mooradian, "Fundamental line broadening of single-mode (GaAl)As diode lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, no. 7, pp. 511–513, 1981.
- [7] M. S. De Alencar, "Stochastic Analysis of the Laser Spectrum Considering the Phase Noise Effect," vol. 12, no. July, pp. 57–65, 2013.
- [8] U. Gliese, et al. "Chromatic Dispersion in Fiber-Optics Microwave and millimeter-Wave Links," *Trans. Microw. theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1716–1924, 1996.
- [9] J. Yao, "A Tutorial on Microwave Photonics," *Photonics Soc. Newsl.*, no. April, pp. 4–12, 2012.
- [10] W. E. Kassa, et al. "Electrical modeling of semiconductor laser diode for heterodyne ROF system simulation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 49, no. 10, pp. 894–900, 2013.