

# Técnica de Aquisição Off-Line da Coerência em Onda Contínua de Lasers Semicondutores com Cálculo do Tempo de Atraso

Mareli Rodigheri <sup>1</sup>, Tiago Sutili <sup>2</sup> e Evandro Conforti <sup>1</sup>

1- Departamento de Comunicações (DECOM)  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
2- Fundação CPqD – Campinas

**Resumo** - Uma técnica de processamento digital de sinais *offline* está sendo desenvolvida para determinar sem ambiguidade o desvio de frequência em lasers de elevada coerência. Neste trabalho foram realizados os batimentos com detecção óptica heteródina de duas portadoras luminosas em modo de onda contínua. Uma das portadoras, sob teste, é separada opticamente com um *splitter*. Um destes sinais que foram separados sofre um atraso através de uma linha com 200 metros de fibra. Ambos sinais (o atrasado e o em tempo real) são misturados com duas portadoras ópticas idênticas (atuantes como osciladores locais), com batimentos independentes detectados por fotodetectores ultrarrápidos. Isso permite a análise *off-line* desses sinais no domínio elétrico. Neste trabalho introdutório, a análise *off-line* permite estimar com precisão o tempo de propagação da linha de atraso, realizado através da estatística de desvios na emissão eletromagnética do laser para o qual se deseja adquirir informações. Os resultados a serem alcançados na sequência deste trabalho permitirão também uma visualização dos processos de perda de coerência e deriva da frequência de emissão.

**Palavras-Chave**—*Laser semiconductor, alargamento espectral, ruído de fase, processamento digital de sinais.*

## I. INTRODUÇÃO

O ruído de fase de lasers é um importante fator de degradação na emissão da luz coerente, tanto em comunicações ópticas quanto em variados instrumentos nos campos da engenharia, biologia, física nuclear e outros. O ruído de fase está diretamente relacionado à largura de linha do laser [1-3]. Em comunicações coerentes, lasers de elevada coerência são utilizados tanto para a transmissão do sinal como para a sua recepção (como oscilador local), tanto por batimento heteródino como homódino. A emissão coerente de fótons é ligada aos processos dinâmicos entre portadores elétricos e ópticos na cavidade ativa de uma heterojunção semicondutora. Existem fenômenos quânticos e efeitos não lineares relacionados à emissão eletromagnética de luz coerente, os quais podem ser modelados como fontes de ruído [4]. As distorções na fase e na frequência da portadora óptica podem ocorrer em tempos

Esse trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – processos 2018/ 337-5, 2017/20121-8, 2014/18791-7, 2007/56024-4, 2015/50063-4 e 2015/24517-8) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – processos 301409/2017-0, 402923/2016-2).

Os autores podem ser contatados em conforti@ieec.org, mareli@decom.fee.unicamp.br, tiagosutili@gmail.com .

menores que o tempo de coerência do laser (ruído tipo  $1/f$ , ruídos de vibração e outros) e em tempo bem maiores que o tempo de coerência (deriva do laser).

Desde os primórdios da invenção do laser, a medição da largura de linha foi inicialmente feita por batimento direto em um fotodetector das emissões de dois lasers a gás construídos igualmente. Entretanto, o surgimento de lasers a diodos e as fibras ópticas monomodo exigiram o desenvolvimento de novos métodos de determinação da largura de linha. Basicamente, o sinal eletromagnético é dividido por dispositivos a fibra (*splitter*) para, então, um dos sinais ser descorrelacionado por um longo caminho ou sofrer uma translação em frequência, com posterior batimento e detecção homódina [5] ou heteródina [6], respectivamente. Esse longo caminho (em fibra óptica) precisa ser maior que o comprimento de coerência do laser. Já a translação em frequência pode ser realizada por um modulador óptico (tipo Mach-Zehnder, magneto-óptico, ou modulador de fase). Entretanto, antes de se abordar a tecnologia *off-line*, é interessante contextualizá-la historicamente.

## II. RUÍDO DE FASE EM LASERS

No início da década de 1980 ocorreu uma progressiva ocupação das bandas de passagem das fibras ópticas que estavam encravadas em dutos subterrâneos nas grandes metrópoles. Nessa época, esse iminente congestionamento ensejou a oportunidade do aperfeiçoamento dos sistemas ópticos baseados na modulação em intensidade da potência do laser (IM - *intensity modulation*). Um aprimoramento semelhante já havia ocorrido para os sistemas de radiodifusão anteriores à Segunda Grande Guerra, com a introdução dos esquemas de modulação em frequência (FM - *frequency modulation*). De fato, os sistemas FM são melhores e mais eficientes que os sistemas de modulação em amplitude (AM - *amplitude modulation*) que vinham sendo utilizados desde a época dos rádios de Marconi. Entretanto, para se modular um laser em fase, era necessário conhecer mais profundamente os ruídos de fase dos lasers (LPN - *laser phase noise*). Consequentemente, vários trabalhos teóricos foram desenvolvidos para se esclarecer o LPN [1, 7]. Em paralelo surgiram os estudos da possível degradação gerada pelo LPN em sistemas ópticos coerentes [2, 8]. Posteriormente, o fenômeno do alargamento da largura de linha nos lasers a

diodo foi esclarecido [9]. De fato, esse alargamento espectral era bem maior que nos lasers a gás. Para reduzir o impacto desse problema, a redução da largura de linha dos lasers a diodo foi conseguida com o desenvolvimento dos lasers a cavidade externa (ECL - *external cavity laser*) [10], com redução da largura de linha para centenas de quilohertz. Entretanto, o ECL apresentava rápidas flutuações espectrais (*jitter*) [10, 11], assim como pequenos lóbulos laterais no seu espectro [12, 13]. Um importante estudo teórico e experimental verificou a existência de um ruído tipo  $1/f_v$ , o qual variava com a potência ou a corrente de polarização dos diodos a laser semiconductor [14]. Logo após, foram estudados os fenômenos espaciais na cavidade ativa relacionados à distribuição modal [15 - 17]. Nessa época os estudos dos efeitos não lineares de ganho cruzado (XGM - *cross gain modulation*) foram introduzidos [18]. Entretanto, todos estes trabalhos foram abandonados devido ao surgimento dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio (EDFA - *erbium doped fiber amplifier*). Estes amplificadores tinham enorme banda de passagem, permitindo amplificação simultânea de todos os canais modulados de um sistema óptico com a multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM - *wavelength division multiplexing*). Além disso, os problemas anteriormente citados [1 - 18] não puderam ser resolvidos com a tecnologia da época. De fato, os sistemas coerentes precisaram esperar quase duas décadas (de 1990 a 2009) para voltarem ao centro das pesquisas. Nesta nova fase, o crescimento vertiginoso da Internet saturou os sistemas WDM+EDFA existentes e as soluções propiciadas pelas comunicações coerentes foram novamente investigadas [19, 20]. Com isso, os estudos sobre as técnicas de medição da largura de linha de lasers foram retomados [21, 22], assim como as pesquisas dos efeitos da largura de linha na recepção óptica coerente [23]. Novos lasers semicondutores monolíticos com largura de linha estreita, com sintonia do comprimento de onda baseadas em cavidades externas integradas foram desenvolvidos [24], assim como novas técnicas para a medição da largura de linha [25, 26] e estudos numéricos correlatos [27].

De uma forma ou de outra, as técnicas convencionais de determinação experimental da largura de linha baseiam-se no batimento da portadora óptica a ser caracterizada com este próprio sinal atrasado no tempo, seguidos do batimento e fotodetecção, para posterior análise no domínio elétrico por um analisador de espectros. O processo de quebra da coerência de fase da portadora óptica é obtido através do atraso temporal de uma parcela do sinal, através de sua propagação por carretéis de fibra com comprimento suficiente ou por translação de frequência [5, 6]. Entretanto, o desenvolvimento de conversores analógico para digital (ADC - *Analog-to-Digital Converter*), juntamente com o aperfeiçoamento da recepção coerente através das híbridas ópticas, permitiu que as distorções de fase e frequência da portadora óptica fossem convertidas para o domínio elétrico e armazenadas em memórias de altíssima velocidade para análise posterior nas chamadas técnicas *off-line* [23, 28]. Com isso, tornou-se possível a introdução de algoritmos para se corrigir as várias distorções introduzidas no sinal óptico coerente, incluindo problemas relacionados aos

lasers e às fibras ópticas. Isso foi feito com a aplicação de técnicas de processamento digital de sinais (DSP - *Digital Signal Processing*), inicialmente desenvolvidas para outras áreas, mas que foram sendo progressivamente adaptadas para comunicações ópticas coerentes. Em resumo, a tecnologia *off-line* permitiu caracterizar mais profundamente tais distorções, sendo possível analisarem-se fenômenos quânticos ou mesmo efeitos não lineares intrínsecos ao ruído de fase e ao alargamento espectral dos lasers. Estas tecnologias *off-line*, quando aplicadas especificamente aos estudos da largura de linha de vários tipos de lasers foram desenvolvidas pelos autores deste trabalho [3, 29, 30]. Entretanto, estes trabalhos necessitam um oscilador local muito mais coerente que o laser cuja largura de linha está sendo determinada. Este trabalho propõe uma forma para se resolver esse problema. Entretanto, devem ser citadas novas tecnologias alternativas para determinação da largura de linha, incluindo-se trabalhos em redução da largura de linha [31-34].

### III. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DO SINAL

O uso de conversão analógico-digital, seguida de memorização e análise DSP aqui propostas, já haviam sido empregadas pelo pioneiro das comunicações coerentes, K. Kikuchi, em 2012 [23], com a determinação da largura de linha de lasers empregando um receptor de diversidade de fase [35]. A técnica *off-line* [3, 29], objeto deste trabalho, não necessita de híbridas ópticas ou receptores em diversidade de fase. Isso torna mais simples o processo de medição, podendo-se acessar larguras de linhas menores, fator este importante para sistemas modernos com constelações densas (ex. com modulações tipo 64 QAM), como mostrado em outros trabalhos [36, 37].

Por outro lado, os limitantes de desempenho das redes ópticas abarcam efeitos não lineares, sendo importante o desenvolvimento de técnicas para sua caracterização precisa e em baixo custo. Esses efeitos provocam flutuações na frequência da luz amplificada, assim como na fase do sinal óptico. O resultado final é um efeito não linear conhecido como gorjeio (*chirp*) que é definido como uma variação instantânea na frequência da portadora óptica. Além do SOA, o laser também apresenta gorjeio quando modulado diretamente, e sua caracterização possui interesse para modernas aplicações especialmente em sistemas com taxas de transmissão acima de 1Tbit/s [38, 39].

Em resumo, a determinação da largura de linha em lasers semicondutores operando em modo de onda contínua, incluindo a avaliação do seu ruído de fase e determinação de eventos de quebra de coerência da portadora luminosa [10, 11], assim como efeitos de gorjeio são objetivos mais gerais deste trabalho.

### IV. MONTAGEM EXPERIMENTAL E RESULTADOS

A avaliação precisa do ruído de fase e determinação de eventos de quebra de coerência da portadora óptica constitui-se em um dos principais parâmetros para o projeto e avaliação da qualidade de enlaces ópticos [9-27, 39, 40], especialmente aqueles baseados em modulações de fase. Estes casos englobam a modulação de fase em quadratura (QPSK - *quadrature phase-*

*shift keying*) e a modulação de amplitude em quadratura (QAM - *quadrature amplitude modulation*), as quais são a base para a implementação de sistemas ópticos modernos com taxas de transmissão superiores à 400 Gbit/s [39].

Entretanto, essa técnica, desenvolvida anteriormente pelos autores [3, 29], possui o inconveniente de precisar de um laser muito mais coerente do que o laser a ser caracterizado. Isso pode dificultar a avaliação experimental em alguns casos. Tendo isso em vista, propõe-se uma evolução introduzindo-se um novo procedimento, de forma a retirar o erro introduzido pelo oscilador local, conforme mostrado na Fig. 1, após processamento DSP adequado. Para tanto, ambas as entradas do osciloscópio de tempo real são utilizadas para a recepção do sinal de batimento entre as portadoras ópticas. Entretanto, a novidade, aqui apresentada, é a introdução de um atraso (*delay*) conveniente, após se separar o sinal do laser a ser caracterizado em dois caminhos por fibras. Concomitantemente, o oscilador local também é separado em dois, mas sem qualquer atraso. Ambos os sinais passam, logo após a saída dos lasers, por isoladores ópticos (OI). Em seguida, é feita a combinação dos sinais, seguido pela fotodetecção do sinal misturado entre o oscilador local e o laser, assim como a outra fotodetecção do sinal atrasado com o do oscilador local. Estes dois sinais misturados são enviados às duas entradas do osciloscópio. Através da avaliação da correlação entre ambos, é possível avaliar-se o atraso de propagação, utilizando-se aqui um algoritmo de análise das formas de onda memorizadas pelo osciloscópio.

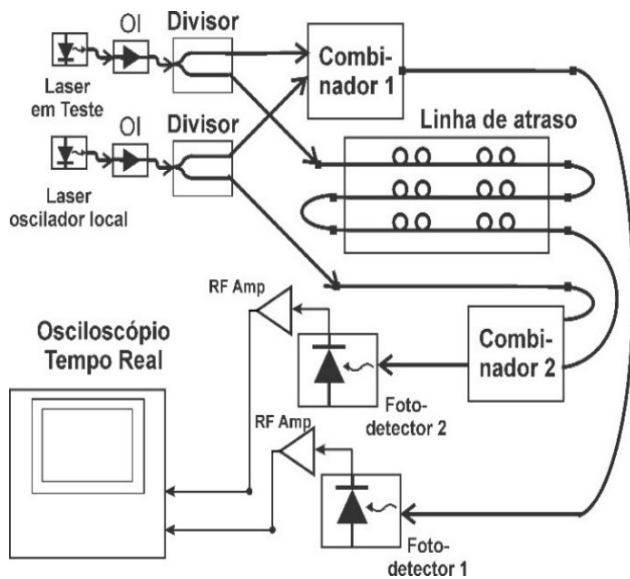


Fig. 1. Montagem utilizada para adquirir os dois sinais dos batimentos dos lasers, sendo um com atraso de 200 metros.

No processamento *off-line*, os sinais foram convertidos para o domínio elétrico (fotodetectores com tempo de resposta analógico de 8 pico segundos) e analisados simultaneamente nos dois canais do osciloscópio de tempo real, com 120 giga amostras por segundo cada um, digitalizados com 8 bits por

amostra, adquiridos em memória rápida (1,04 picossegundos por bit), gerando-se 41 milhões de pontos em cada arquivo gráfico memorizado. Um exemplo típico é mostrado na Fig. 2. A frequência do sinal de batimento foi igual a 11,62 GHz.

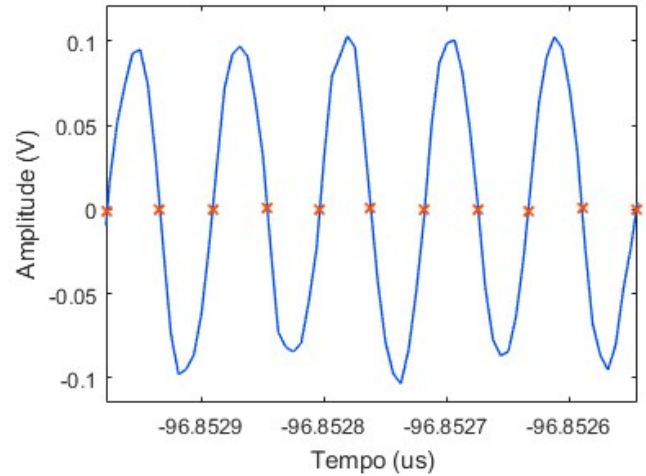


Fig. 2. Sinal resultante do batimento entre laser oscilador local e sinal do laser sob teste, adquirido pelo osciloscópio em tempo real.

Como os fotodetectores não possuem mesmo ganho e a linha de atraso possui perdas, o algoritmo utilizado realizou a compensação das amplitudes. Sendo assim, os sinais aparecem como se mostra na Fig. 3. Um parâmetro importante a ser analisado é a passagem pelo zero dos sinais adquiridos, ilustrados na Fig. 3. As passagens pelo zero na escala das ordenadas são mostradas, em escala aumentada (*zoom*), na Fig. 4. Esse exemplo evidencia que, em alguns semiciclos, uma das portadoras ópticas está com sua fase “adiantada” (ou “atrasada”) em comparação à outra portadora, devido ao ruído de fase e a outros fenômenos.

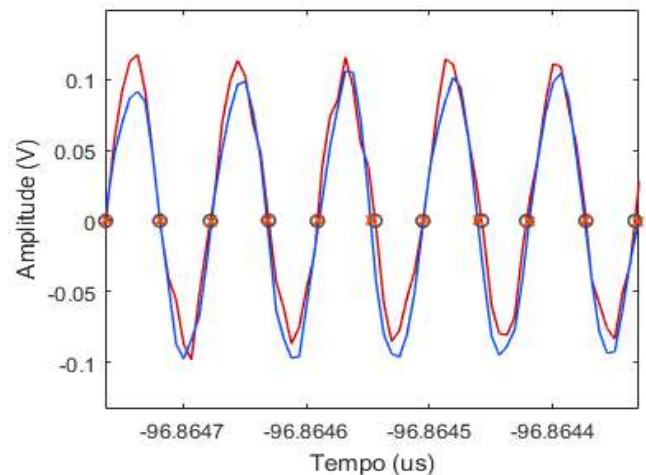


Fig. 3. Sinais adquiridos nos dois canais do osciloscópio em tempo real com a determinação de suas passagens por zero. Em azul o sinal é resultante do batimento entre laser oscilador local e laser sob teste. Em vermelho o sinal é resultante do batimento entre laser oscilador local e sinal atrasado do laser sob teste.

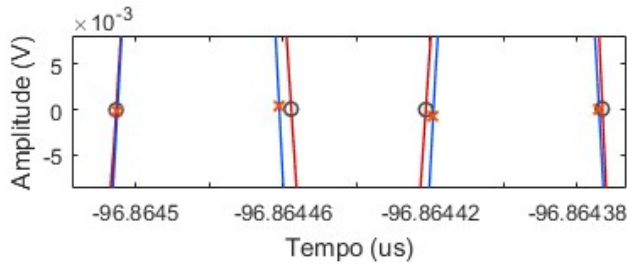


Fig. 4. Sinais adquiridos nos dois canais do osciloscópio em tempo real, mas em escala aumentada para mostrar que o sinal 1 (azul) está adiantado do sinal 2 (vermelho) na segunda passagem pelo zero e adiantado na terceira passagem.

Entretanto, é necessário um conhecimento inicial sobre o sinal do laser em teste. Para tanto, a Fig. 5 apresenta o desvio de frequência do laser sob teste (considerando-se o oscilador local como ideal) em função do intervalo entre o sinal inicial e o sinal do mesmo laser após tempos crescentes. Caso o laser sob teste fosse perfeito, o desvio médio de frequência seria sempre nulo. Entretanto, pode-se notar na Fig. 5 que há um desvio na frequência de emissão do laser. É importante salientar que esse desvio da frequência é uma média calculada em um certo número de períodos. Dessa forma esse desvio da frequência média depende do número de períodos (equivalente a um intervalo de tempo) em que a emissão é calculada.

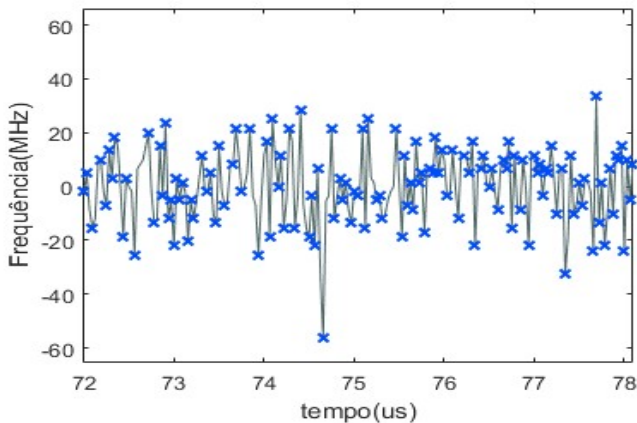


Fig. 5. Desvio médio de frequência do laser sob teste em relação a amostras distanciadas no tempo.

Através de algoritmo DSP conveniente, será possível avaliarem-se o tremor (*jitter*), o gorjeio (*chirp*), o ruído de fase e a largura de linha do laser sob teste. Aqui, o procedimento implementado foi somente para a determinação do tempo de propagação na linha de atraso. Para tanto, foram calculados os desvios médios quadráticos (MSD – *mean squared deviation*) dos atrasos para cada passagem pelo zero, como as mostradas no exemplo da Fig. 4.

Em seguida, o algoritmo desloca o sinal do canal com atraso (sinal vermelho na Fig. 3) em um ciclo de senoide. Logo após, calcula-se o novo MSD. E assim sucessivamente. O MSD mínimo deverá indicar o tempo de atraso. Cada período do sinal mostrado na Fig. 3 é de 86,057 picossegundos. O número de deslocamentos para o MSD mínimo multiplicado pelo período

dará o tempo de atraso da linha. Esse resultado está mostrado na Fig. 6.

Nesse caso, foram calculados o MSD para 14 períodos, em um instante de tempo determinado. Notar na Fig. 6 que o MSD mínimo foi alcançado para 11.223 deslocamentos. Como o período é de 86,057 picossegundos, o tempo de atraso será de 965 nanossegundos. Esse tempo é próximo do esperado para um atraso dos aproximadamente 200 metros de fibra óptica utilizada (ou seja, 1 microssegundo, para velocidade da luz na fibra de  $2 \times 10^8$  m/s).

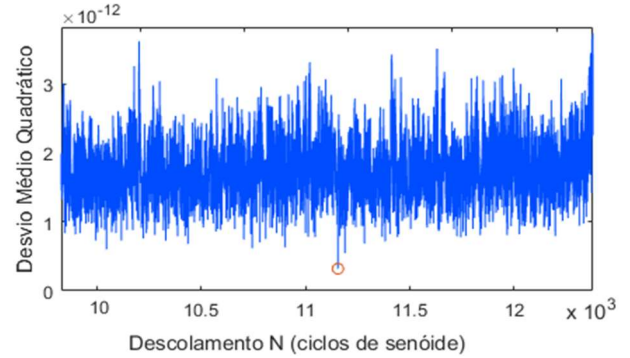


Fig. 6. Desvio médio quadrático, MSD, (escala arbitrária) versus número de deslocamentos do período entre os sinais de batimento da Fig. 3. O desvio mínimo ocorreu para 11.223 pontos de deslocamento dos períodos, com cálculo do atraso da linha de 200 m em fibra óptica igual a 965 nanossegundos.

Outro aspecto importante da coerência do laser está relacionado à deriva de frequência. Tipicamente, para um laser a diodo com heterojunção a flutuação típica da frequência é da ordem de dezenas de MHz, considerando-se uma frequência óptica de 200 THz. Para o laser em análise, existe uma cavidade externa integrada que deve reduzir esta flutuação. A Fig. 5 apresenta o desvio da frequência relativa do laser em teste em relação ao laser oscilador local. O desvio de frequência foi calculado para o sinal de batimento (11,62 GHz) considerando-se uma média de 10 períodos e um espaçamento entre as amostras consideradas de 31,22 nanossegundos. Notar que a flutuação de frequência é da ordem de mais ou menos 20 MHz. Entretanto, notar que na abscissa de 74,66 microssegundos, o desvio de frequência está bem acima da média. Nesse ponto, provavelmente o laser perdeu a coerência. A análise detalhada desse fenômeno também será objeto da continuação deste trabalho.

## V. CONCLUSÕES

Tradicionalmente, a caracterização da pureza espectral de laser semicondutores exige métodos indiretos ou o complexo pós-processamento do sinal espectral. A técnica proposta [3, 29, 30]) permite a determinação direta do tremor (*jitter*), do gorjeio (*chirp*), do ruído de fase e da largura de linha do laser sob teste. Os resultados foram apresentados para o cálculo do tempo de atraso para uma linha em fibra óptica utilizando a tecnologia *off-line*, com processamento digital dos sinais adquiridos em dois canais do osciloscópio de tempo real. Um dos sinais passou por



uma linha de atraso, objetivando-se eliminar a duplicidade entre a largura de linha do oscilador local e a largura de linha do laser em teste. Sendo assim, será possível medir a largura de linha do laser sob teste, independentemente das exigências de largura de linha do laser utilizado como oscilador local. A medição do atraso por esta técnica permitiu estabelecer o valor de 965 nanosegundos para o atraso de 200 metros de fibra óptica utilizada para os testes.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 259–264, 1982, [doi:10.1109/JQE.1982.1071522].
- [2] K. Kikuchi, T. Okoshi, M. Nagamatsu e N. Henmi, "Degradation of bit-error rate in coherent optical communications due to spectral spread of the transmitter and the local oscillator," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 1024–1033, 1984.
- [3] T. Sutili, R. C. Figueiredo e E. Conforti, "Laser linewidth and phase noise evaluation using heterodyne offline signal processing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 21, pp. 4933–4940, Nov 2016.
- [4] G. Agrawal and N. Dutta, *Semiconductor Lasers*. Springer US, 2013.
- [5] H. Gerhardt, H. Welling e A. Guttner, "Measurements of the laser linewidth due to quantum phase and quantum amplitude noise above and below threshold," *Zeitschrift für Physik*, vol. 253, no. 2, pp. 113–126, Abr 1972.
- [6] T. Okoshi, K. Kikuchi e A. Nakayama, "Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum," *Electronics Letters*, vol. 16, no. 16, pp. 630–631, Jul 1980.
- [7] C. Henry, "Theory of the phase noise and power spectrum of a single mode injection laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 19, no. 9, pp. 1391–1397, Set 1983.
- [8] C. Henry, "Phase noise in semiconductor lasers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 298–311, Mar 1986.
- [9] M. Osinski e J. Buus, "Linewidth broadening factor in semiconductor lasers - an overview," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 23, pp. 9–29, 1987.
- [10] R. F. Kazarinov e C. H. Henry, "The relation of line narrowing and chirp reduction resulting from the coupling of a semiconductor laser to a passive resonator," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 23, no. 9, pp. 1401–1409, 1987.
- [11] G. P. Agrawal e R. Roy, "Effect of injection-current fluctuations on the spectral linewidth of semiconductor lasers," *Phys. Rev. A*, vol. 37, pp. 2495–2501, Abr 1988.
- [12] S. E. Miller, "The effect of side modes with linewidth and intensity fluctuations in semiconductor lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 750–757, Mai 1988.
- [13] U. Kruger e K. Petermann, "The semiconductor laser linewidth due to the presence of side modes," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 24, no. 12, pp. 2355–2358, Dez 1988.
- [14] K. Kikuchi, "Effect of 1/f-type FM noise on semiconductor-laser linewidth residual in high-power limit," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 25, no. 4, pp. 684–688, 1989.
- [15] G. P. Agrawal, "Dependence of the linewidth of a semiconductor laser on the mode distribution," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 2058–2064, 1990.
- [16] G. H. Duan, P. Gallion e G. Debarge, "Analysis of the phase-amplitude coupling factor and spectral linewidth of distributed feedback and composite-cavity semiconductor lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 26, no. 1, pp. 32–44, Jan 1990.
- [17] B. Tromborg, H. Olesen e X. Pan, "Theory of linewidth for multielectrode laser diodes with spatially distributed noise sources," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, no. 2, pp. 178–192, 1991.
- [18] G. R. Gray e G. P. Agrawal, "Effect of cross saturation on frequency fluctuations in a nearly single-mode semiconductor laser," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 204–206, Mar 1991.
- [19] M. G. Taylor, "Phase estimation methods for optical coherent detection using digital signal processing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 7, pp. 901–914, 2009.
- [20] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 4th ed. New Jersey: Wiley, 2010, [doi:10.1002/9780470918524].
- [21] T. Duthel, G. Clarici, C. R. S. Fludger, J. C. Geyer, C. Schulien e S. Wiese, "Laser linewidth estimation by means of coherent detection," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 20, pp. 1568–1570, 2009.
- [22] R. Maher e B. Thomsen, "Dynamic linewidth measurement technique using digital intradyne coherent receivers," *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, pp. 1–3, 2011.
- [23] K. Kikuchi, "Characterization of semiconductor-laser phase noise and estimation of bit-error rate performance with low-speed offline digital coherent receivers," *Opt. Express*, vol. 20, no. 5, pp. 5291–5302, Feb 2012.
- [24] T. N. Huynh, F. Smyth, L. Nguyen e L. P. Barry, "Effects of phase noise of monolithic tunable laser on coherent communication systems," *Opt. Express*, vol. 20, no. 26, pp. B244–B249, 2012.
- [25] T. N. Huynh, L. Nguyen e L. P. Barry, "Delayed self-heterodyne phase noise measurements with coherent phase modulation detection," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 249–251, 2012.
- [26] T. N. Huynh, L. Nguyen e L. P. Barry, "Phase noise characterization of SGDBR lasers using phase modulation detection method with delayed self-heterodyne measurements," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 8, pp. 1300–1308, Abr 2013.
- [27] J. Zhao, H. Zhou, F. Liu e Y. Yu, "Numerical analysis of phase noise characteristics of SGDBR lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 223–231, Nov 2015.
- [28] P. J. Winzer, D. T. Neilson e A. R. Chraplyvy, "Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [Invited]," *Optics Express*, Vol. 26, N. 18, Sep. 2018, pp. 24190–24239.
- [29] E. Conforti e T. Sutili. Método para Caracterização de LASERs. *INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial)*, BR10201403306358, patente de invenção depositada em 8 de dezembro de 2014.
- [30] T. Sutili e E. Conforti, "Investigação do Alargamento Espectral e Perda de Coerência em Lasers Semicondutores", Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, Campina Grande - PB de 16 a 19 de Setembro de 2018, pp. 11–15.
- [31] W. Ma, B. Xiong, C. Sun, X. Ke, J. Wang, Z. Hao, L. Wang, Y. Han, H. Li, J. Yu e Y. Luo, "Linewidth Narrowing of Mutually Injection Locked Semiconductor Lasers with Short and Long Delay", *Applied Sciences*, 9 (7), 1436, pp. 1–16, 2019.
- [32] N. Ninomiya, H. Hoshino e M. Matsuura, "Optical Quantization Based on Intensity to Frequency Conversion Using Frequency Chirp in a QD-SOA," *OFC 2017 Digest*, paper Th1F.6.pdf, OSA 2017.
- [33] Y. Li, T. Song, M. Gurusamy, C. Yu e P. Y. Kam, "Enhanced adaptive DA-ML carrier phase estimator and its application to accurate laser linewidth and SNR estimation", *Optics Express*, vol. 26, n. 12, pp. 14817–14831, 2018.
- [34] Y. He, S. Hu, S. Liang e Y. Li, "High-precision narrow laser linewidth measurement based on coherent envelope demodulation", *Optical Fiber Technology*, vol. 50, pp. 200–205, 2019.
- [35] K. Kikuchi, T. Okoshi, M. Nagamatsu e N. Henmi, "Degradation of Bit-Error Rate in Coherent Optical Communications Due to Spectral Spread of the Transmitter and the Local Oscillator", *Journal of Lightwave Technology*, v. 2, n. 6, p. 1024–1033, 1984.
- [36] T. Pfau, S. Hoffmann e R. Noe, "Hardware-efficient coherent digital receiver concept with feedforward carrier recovery for m-QAM constellations", *Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 8, p. 989–999, Abr 2009.
- [37] I. Fatadin, D. Ives e S. J. Savory, "Blind equalization and carrier phase recovery in a 16-QAM optical coherent system", *Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 15, p. 3042–3049, Ago 2009.
- [38] E. Conforti e T. Sutili, Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020170158845, título: "Método de Medição de Gorjeio e Efeitos Não Lineares", Instituição de registro: *INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial*. Depósito: 25/07/2017.
- [39] Z. Jia, H. C. Chien, J. Zhang, Y. Cai e J. Yu, "Dual-carrier 400G solutions based on 8/16/32QAM modulation formats. In: *2015 IEEE Photonics Conference (IPC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 413–416.
- [40] T. Sutili, B. Taglietti, R. C. Figueiredo, C. M. Gallego e E. Conforti, "Guard time requirements for SOA-based electro-optical space switches and AM signals." In: *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. Águas de Lindóia, 2017.