

Geração de Pentes Ópticos de Frequências Amplos e Ultra Planos por Moduladores Eletro-ópticos Cascadeados

Leonid A. Huancachoque e Aldário C. Bordonalli

Resumo — Propõe-se um gerador de pente óptico de frequências com um amplo número de linhas equalizadas por meio da modulação eficiente de uma cascata de moduladores eletro-ópticos. A modelagem do arranjo permitiu uma análise teórica de desempenho e a obtenção de condições de acionamento para os testes empíricos dos moduladores. Em um arranjo com um modulador de fase seguido três moduladores de Mach-Zehnder de duplo controle, a análise teórica produziu pentes de até 65 linhas espectrais equalizadas. Em um teste experimental com um modulador de cada tipo e mesma ordenação, um pente de 25 linhas equalizadas foi obtido, em concordância com a teoria.

Palavras-Chave — Modulação eletro-óptica, pentes ópticos de frequência, fontes ópticas, supercanais ópticos.

Abstract — An optical comb frequency generator with a large number of equalized lines by the efficient modulation of a cascade of electro-optic modulators is proposed. Modeling of the array allowed theoretical analysis of the performance and determination of the driving conditions for empirical testing of the modulators. In an array with one phase modulator followed by three dual-control Mach-Zehnder modulators, the theoretical analysis produced combs with up to 65 equalized spectral lines. In an experimental test with one modulator of each type and the same arrangement, a comb of 25 equalized lines was obtained, which is consistent with theory.

Keywords — Electro-optic modulation, optical frequency comb, optical source, optical superchannels.

I. INTRODUÇÃO

A demanda atual e futura por serviços de telecomunicações que precisam de altas taxas de dados exige o desenvolvimento de sistemas com capacidades cada vez maiores para os núcleos da rede. Um dos indicadores do crescimento dessa demanda é o fato de que, segundo um relatório da Cisco de 2018, estima-se que quase dois terços da população mundial terá acesso à Internet até 2023, ante a 51% em 2018 [1]. Com a pandemia de covid-19, a conectividade foi acelerada em diferentes áreas e já atingiu 62,5% da população mundial no início de 2022 [2]. Para atender a essa demanda, devem-se desenvolver e implantar sistemas que suportem taxas de transmissão cada vez mais altas. Uma das alternativas para atender a estes requisitos em curto prazo é empregar supercanais ópticos, pois esta técnica reduz problemas do gargalo eletrônico por meio do paralelismo óptico e melhor utilização espectral [3]. Nesse contexto, os geradores de pentes ópticos de frequências (OFCG – *optical frequency comb generation*) desempenham um papel fundamental como fontes para estes sistemas.

A geração do pente óptico de frequências (OFC – *optical frequency comb*) tem sido intensamente pesquisada nos últimos anos, pois possui aplicações em diversos campos. Além de comunicações ópticas de alta capacidade, eles podem ser usados na geração de formas de onda arbitrárias, espectroscopia e metrologia óptica de precisão, entre outros [4-6]. Para o uso de OFCs como fontes de comunicação óptica com supercanais, a planicidade, estabilidade e a presença de linhas espectrais (SL – *spectral line*) de larguras de linha estreitas são características essenciais [7-9]. Dentre os vários métodos para a geração de OFCs, como os que usam lasers de modos travados, efeitos não lineares em materiais e cavidades micro ressonantes [10, 11], os que empregam moduladores eletro-ópticos (EOM – *electro-optic modulator*) são os mais versáteis para as comunicações ópticas, pois são sintonizáveis em termos de comprimento de onda de operação e espaçamento entre SLs [11, 12]. O OFCG possui uma estrutura relativamente simples, composta de, basicamente, um laser, um gerador de sinais de RF (RF – *radio frequency*) para a modulação e fontes de tensão de corrente contínua (DC – *direct current*) para a polarização de um ou mais EOMs do arranjo. Portanto, diferentes tipos de EOMs podem ser usados independentemente, conectados em série (cascata), em paralelo ou em uma combinação de ambos, modulados, na maioria dos casos, por sinais harmônicos e, em alguns casos, permitindo o controle da polarização [11, 13]. No entanto, muitos destes arranjos não oferecem bons resultados em termos do número de SLs e/ou da planicidade do pente gerado.

Neste trabalho, apresenta-se uma proposta de OFCG com EOMs que satisfaz estas duas características importantes e tem como base um estudo anterior de OFCG baseado em um modulador de Mach-Zehnder de duplo controle (MZM) [12]. Observou-se que, quando este tipo de MZM é usado uma ou mais vezes em uma cascata de EOMs, ele passa a atuar como um controle de equalização que pode ser distribuído de acordo com as condições de operação. Com o uso de um modulador de fase (PM) antes dos MZMs, há a migração de um sistema onde uma portadora óptica é aplicada por vez ao MZM para outro onde múltiplos comprimentos de onda são simultaneamente acoplados e modulados. Seguindo-se esta proposta, um OFCG baseado em um PM seguido de uma cascata de MZMs (PM-MZM) foi teoricamente analisado. Os resultados teóricos mostraram que pentes com até 65 SLs equalizadas podem ser gerados quando uma cascata de três MZMs foi avaliada. As condições disponíveis permitiram que o PM-MZM OFCG fosse testado experimentalmente com apenas um MZM, com o pente produzido apresentando 25 linhas equalizadas.

Os OFCs gerados por EOMs são formados quando uma ou mais portadoras ópticas distintas são moduladas por moduladores, alimentados por sinais harmônicos de grande amplitude e em uma dada frequência angular (ω_g). O OFC resultante, portanto, irá depender da frequência angular da

L. A. Huancachoque e A. C. Bordonalli, DECOM/FEEC/UNICAMP, leohming@decom.fee.unicamp.br e aldario@unicamp.br. Este trabalho foi realizado com apoio da Fundação para o Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processos 2015/24517-8 e 2021/06569-1), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, e processo 001.88882.329469/2019-01, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo 402923/2016-2) e da FAEPEX/UNICAMP.

portadora ou portadoras ópticas e das propriedades dos sinais harmônicos [12-14]. A geração de OFCs será avaliada a seguir considerando-se a modulação eletro-óptica de uma portadora óptica por um PM ou um MZM e estendida depois para o PM-MZM, onde se considera a modulação de múltiplas portadoras ópticas igualmente espaçadas no domínio espectral.

A. Modulação EO de portadora óptica única

A Fig. 1 mostra a resposta esperada à modulação de uma única portadora óptica por um PM e por um MZM, quando sinais harmônicos são acoplados às entradas de RF do PM (RF1) e do MZM (RF1-a e RF1-b). Nas entradas dos EOMs, um laser semente gera uma portadora óptica de linha única, como indicado por -1- na Fig. 1. O PM da Fig. 1 (a) pode produzir um certo número de SLs, como ilustrado por -2-, que aumenta com o nível de potência de RF aplicada.

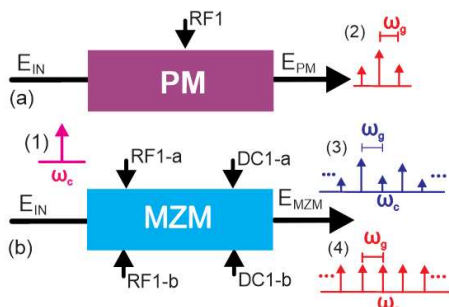


Fig. 1. Diagrama esquemático de geração de OFCs por (a) um PM e (b) um MZM.

Já o MZM da Fig. 1 (b) gera mais SLs que um PM sob a mesma potência de RF, como indica o espectro -3-, pois possui dois pares de entradas DC e de RF independentes, exercendo maior controle sobre a modulação da portadora. Se o conjunto de tensões DC e de RF aplicadas ao MZM for adequado, o pente de saída pode ser equalizado, como aparece em -4- da Fig. 1. Da modelagem da resposta dos moduladores à aplicação de tensões de RF e/ou DC na geração de OFCs, o campo elétrico na saída do PM pode ser escrito como [15]:

$$E_{PM}(t) = E_{IN}(t) e^{j\Delta\phi_{PM}(t)} = E_c e^{j\omega_c t} e^{j\pi v_{PM}(t)/V_{\pi PM}} \quad (1)$$

onde $E_{IN}(t)$ é o campo elétrico na entrada dos EOMs, com E_c a sua amplitude e ω_c a sua frequência angular, $V_{\pi PM}$ é a tensão de meia onda do PM e $v_{PM}(t) = V_{pm} \sin(\omega_g t + \alpha_{pm})$ é a tensão acoplada à porta RF1 do PM, de amplitude V_{pm} , deslocamento de fase α_{pm} e frequência angular de modulação ω_g . Já o campo elétrico na saída do MZM é dado por [15]:

$$E_{MZM}(t) = E_{IN}(t) \left[e^{j\Delta\phi_a(t)} + e^{j\Delta\phi_b(t)} \right] / 2 \quad (2)$$

onde os atrasos de fase $\Delta\phi_x$ gerados pela modulação nos braços a e b do MZM ($x = a, b$) são dados por [12]:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_a(t) &= \pi \left[v_a(t) + U_a \right] / V_{\pi MZM} \\ \Delta\phi_b(t) &= \pi \left[v_b(t) + U_b \right] / V_{\pi MZM} \end{aligned} \quad (3)$$

onde $v_x(t) = V_x \sin(\omega_g t + \alpha_x)$ representa as tensões de RF acopladas às portas RF1-a e RF1-b, V_x é a amplitude da tensão em cada porta, α_x indica os deslocamentos de fase para as tensões que chegam a cada braço e U_x designa a tensão de polarização DC de cada braço.

Para avaliar os espectros de saída dos moduladores (OFCs), os campos elétricos resultantes podem ser convertidos para o domínio da frequência via transformada de Fourier. O resultado deste processo é equivalente aos espectros dos OFCs quando observados em um analisador de espectro óptico (OSA – *optical spectrum analyzer*). O OSA mostra as SLs resultantes da varredura espectral do filtro do aparelho, ajustada para uma determinada largura de banda de resolução (RBW – *resolution bandwidth*). Com isto, as amplitudes das linhas do pente são proporcionais ao valor absoluto ao quadrado do campo elétrico após esta filtragem. Os indicadores -2- a -4- na Fig. 1 ilustram espectros esperados para os OFC. Os dois primeiros mostram pentes onde as amplitudes das linhas são irregulares. Já o espectro -4 mostra um resultado onde as SLs aparecem equalizadas. De fato, como mencionado anteriormente, isto é possível para condições específicas de operação do MZM. A primeira requer que $U_a - U_b = V_{\pi MZM}/2$ [12, 14]. Aplicando-se a identidade de Jacobi-Anger à (2) após substituição dos termos definidos em (3), aplicando a transformada de Fourier ao resultado e impondo-se a condição de operação, o valor escalar da amplitude da m -ésima SL gerada pelo MZM em torno da portadora de frequência angular ω_c é dado por:

$$I_{MZM}(\omega_c \pm m\omega_g) = \left[J_m^2(A_a) + J_m^2(A_b) \right] I_{IN} / 4 \quad (4)$$

onde $m \in \mathbb{Z}$ é a ordem da função de Bessel de primeira espécie, $A_x = \pi V_x / V_{\pi MZM}$ e I_{IN} é a intensidade do sinal óptico de entrada. De (4), é possível se obter um conjunto de valores para A_a e A_b que resultam em um OFC equalizado após o MZM. A condição de planicidade é obtida determinando-se o mínimo desvio padrão de um conjunto de SLs ao se variar A_a e A_b em uma faixa de valores de potência acoplados ao modulador. A Fig. 2 ilustra resultados de simulação para possíveis combinações de valores de A_a e A_b para um MZM com $V_{\pi MZM} = 2,4$ V com a escala colorida à direita indicando os respectivos valores dos desvios padrão associados às cores do gráfico. Neste caso, $A_x \in [0, 14]$, o que equivale a $V_x \in [0, 10,7]$ V.

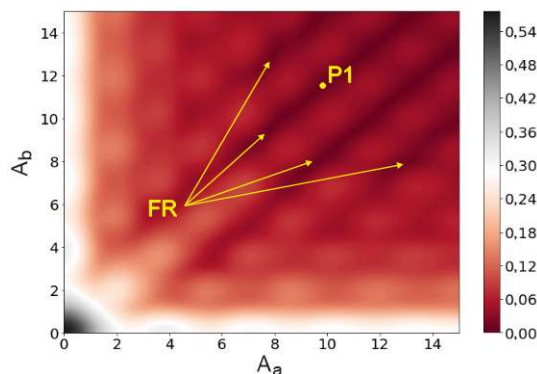


Fig. 2. Regiões de planicidade para a operação de um MZM de $V_{\pi MZM} = 2,4$ V, considerando-se amplitudes normalizadas de tensão A_x entre 0 e 14.

Na Fig. 2, podem-se observar regiões mais escuras de formato aproximadamente linear, onde os valores de desvio padrão são os menores possíveis para diferentes pares $[A_a; A_b]$. Estas regiões foram chamadas de faixas de planicidade (FR – *flat range*) e estão indicadas na Fig. 2. Portanto, se os valores das tensões normalizadas de controle A_a e A_b forem definidos nestas regiões, o OFC gerado será plano. Além disso, quanto maior os valores de A_a e A_b , maior o número de linhas para o pente. Utilizando-se o ponto P1 da Fig. 2, para o qual $[A_a; A_b] = [9,78; 11,35]$, obteve-se o espectro do OFC baseado em um

MZM da Fig. 3. A Fig. 3 também mostra o espectro do pente produzido pelo OFC baseado em um PM, quando $V_{\pi PM} = 3$ V e $A_{pm} = \pi V_{pm}/V_{\pi PM} = 1,9$. Como esperado, o pente referente ao MZM apresenta planicidade na região central e um número maior de SLs que as geradas pelo PM. A intensidade na saída de um ou outro EOM (I_{EOM}) foi normalizada em relação a I_{IN} .

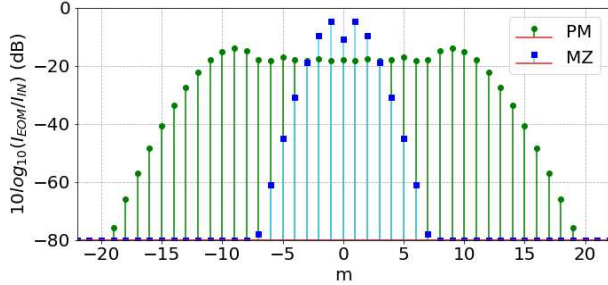


Fig. 3. Espectros de OFCs gerados por um (a) PM e um (b) MZM (MZ) ajustado para produzir SLs equalizadas.

Com o intuito de ampliar o número de linhas dos OFCs gerados e manter a planicidade observada, arranjos com os dois tipos de moduladores estudados foram propostos. Neste caso, a análise irá considerar a iteração de um PM de entrada com um ou mais MZMs dispostos em série ou cascata (PM-MZM). Com isto, as SLs geradas pelo PM podem ser vistas como um sinal de múltiplos comprimentos de onda do ponto de vista da entrada do MZM seguinte. Assim, é como se cada linha deste sinal fosse individualmente modulada pelo MZM e gerasse seu próprio OFC. Na saída, ter-se-á a sobreposição dos campos destes pentes nas frequências das linhas existentes na entrada se as frequências de modulação dos EOMs forem as mesmas.

B. Modulação EO de portadora óptica múltipla

Uma vez que o sinal do laser é modulado por um PM, ele gera um conjunto de SLs espaçadas de ω_g , que podem ser visualizadas em um OSA de forma semelhante à apresentada na Fig. 3. Para o arranjo PM-MZM, este sinal multiportadora, ao passar pelo MZM também modulado com ω_g , deverá ter o seu número de linhas. Seguindo-se o que foi proposto em (1) e (2), o campo elétrico na saída do PM-MZM pode ser escrito como:

$$E_{PM-MZM}(t) = E_{IN}(t) e^{j\Delta\phi_{PM}(t)} \left[e^{j\Delta\phi_a(t)} + e^{j\Delta\phi_b(t)} \right] / 2. \quad (5)$$

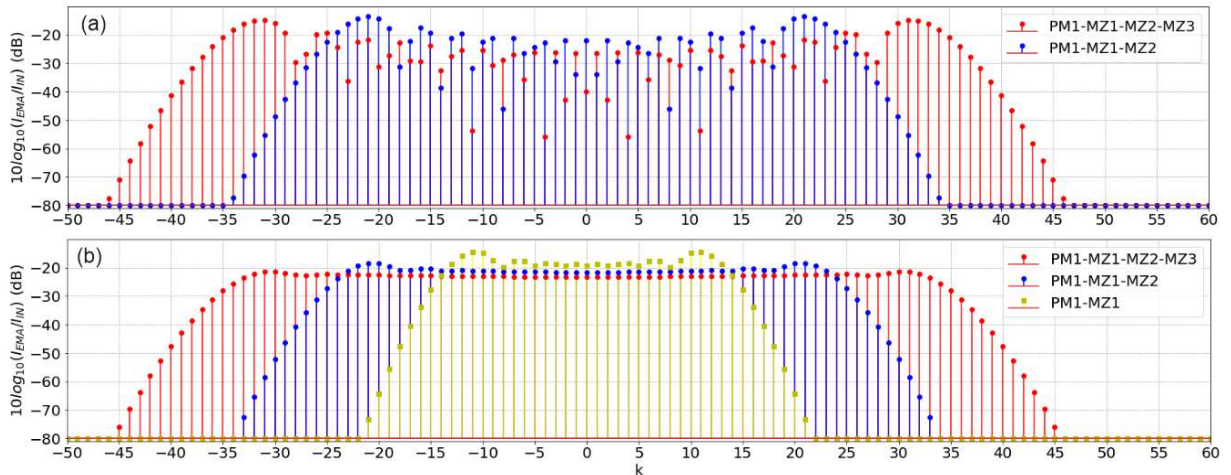


Fig. 4. Espectros resultantes da simulação de EOMs em cascata (a) sem emprego de condições de equalização, para os arranjos PM1-MZ1-MZ2 e PM1-MZ1-MZ2-MZ2 e (b) com condições de equalização, para os sistemas PM1-MZ1, PM1-MZ1-MZ2 e PM1-MZ1-MZ2-MZ3.

Utilizando-se as definições dos termos exponenciais de (5), a equação resultante pode ser expandida utilizando-se a identidade de Jacobi-Anger, de maneira que:

$$E_{PM-MZM}(t) = \frac{E_c e^{j\omega_c t}}{2} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} F_i^{PM} F_{k-i}^{MZM} \quad (6)$$

onde

$$F_n^{PM} = J_n(A_{pm}) e^{jn(\omega_g t + \alpha_{pm})}$$

$$F_m^{MZM} = \left[J_m(A_a) e^{jm\alpha_a} e^{j\frac{\pi}{V_{\pi MZM}} U_a} + J_m(A_b) e^{jm\alpha_b} e^{j\frac{\pi}{V_{\pi MZM}} U_b} \right] e^{jm\omega_g t}$$

Aplicando-se a transformada de Fourier a (6), obtém-se o valor da intensidade da k -ésima SL gerada pelo PM-MZM:

$$I_{SL}^k = \frac{I_{IN}}{4} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [F_i^{PM} F_{k-i}^{MZM}] \sum_{j=-\infty}^{+\infty} [F_j^{PM} F_{k-j}^{MZM}]^* \quad (6)$$

Embora (6) tenha sido obtida a partir da modulação das SLs produzidas pelo PM por um MZM, o processo pode ser generalizado para qualquer fonte de múltiplos comprimentos de onda com espaçamento espectral de ω_g entre suas SLs. Por este princípio, a saída de um EOM anterior, seja ele um PM ou um MZM, serve como fonte de múltiplas portadoras para o EOM subsequente, gerando-se OFCs com SLs espaçadas de ω_g . Assim, pode-se ampliar o número de EOMs cascadeados para além de dois. Por exemplo, a saída do PM-MZM proposto pode servir de nova fonte para um próximo EOM e assim por diante. Para investigar esta proposta de forma estruturada devido ao grande número de variáveis, um algoritmo baseado em (6) e que permite a expansão do número de EOMs foi e codificado no Python.

II. RESULTADOS TEÓRICOS

Para exemplificar os resultados teóricos, a Fig. 4 mostra resultados de simulação para o OFCG baseado em EOMs cascadeados, que serão chamados de arranjo de moduladores eletro-ópticos (EMA – *electro-optic modulators arrangement*). Para simplificar, os MZMs serão indicados por MZs. Os gráficos da Fig. 4 (a) apresentam os espectros gerados pelos EMAs PM1-MZ1-MZ2 e PM1-MZ1-MZ2-MZ3. Nestes casos, as condições de equalização dos MZMs não foram atendidas.

Além disso, por simplicidade, os parâmetros usados para as defasagens dos braços dos diferentes MZMs, $\Delta\phi_{1,x}$, $\Delta\phi_{2,x}$ e $\Delta\phi_{3,x}$, $x = a, b$, foram as mesmas, de modo que $V_{\pi MZM1} = V_{\pi MZM2} = V_{\pi MZM3} = 2,4$ V, $A_{1,x} = A_{2,x} = A_{3,x} = [9,78; 11,35]$, $U_{1,x} = U_{2,x} = U_{3,x} = [0; 0]$ V e $\alpha_{1,x} = \alpha_{2,x} = \alpha_{3,x} = [0; 0]$ rad. Para o PM, assumiram-se $V_{\pi PM1} = 3$ V, $A_{1,pm} = 10$ V e $\alpha_{1,pm} = 0$ rad. Observa-se que os OFCs gerados não são planos, atingindo-se até 38 dB entre amplitudes de SLs centrais. Portanto, se as condições de acionamento dos MZMs não são atendidas, o OFCG fornece pentes que não são adequados para uso em sistemas ópticos.

Já os gráficos da Fig. 4 (b) apresentam os pentes gerados pelos EMAs (i) PM1-MZM1, (ii) PM1-MZ1-MZ2 e (iii) PM1-MZ1-MZ2-MZ3. Diferentemente do caso anterior, todos os MZMs foram controlados por tensões de RF e DC que obedecem às condições de equalização para as SLs dos pentes. Dessa forma, para o PM1, $V_{\pi PM1} = 3$ V, $A_{1,pm} = 8,7$ V e $\alpha_{1,pm} = 0$ rad e, para os MZMs, e $V_{\pi MZM1} = V_{\pi MZM2} = V_{\pi MZM3} = 2,4$ V, $A_{1,x} = A_{2,x} = A_{3,x} = [9,78; 11,35]$, $U_{1,x} = U_{2,x} = U_{3,x} = [1,2; 0]$ V e $\alpha_{1,x} = \alpha_{2,x} = \alpha_{3,x} = [0; 0]$ rad. Nota-se que foram produzidos pentes consideravelmente planos, apresentando diferenças entre as quantidades e amplitudes das SLs. Assim, quanto maior o número de MZMs adicionados ao sistema, OFCs com maior quantidade de SLs são gerados. Para se observar com mais detalhes as linhas centrais dos pentes mostrados na Fig. 4 (b), a Fig. 5 apresenta uma ampliação da distribuição de amplitudes para estas linhas, definida com região plana do pente. Nesta região, as linhas dos pentes apresentam uma mínima variação. As Fig. 5 (a), (b) e (c) exibem as regiões planas dos pentes gerados pelos sistemas (i), (ii) e (iii), respectivamente. Devido à simetria observada nos espectros gerados, para se definirem as regiões de planicidade dos três sistemas, procurou-se pela máxima quantidade de SLs centrais cujas amplitudes se encontravam dentro de uma mínima faixa de variação. A faixa vertical de variação de amplitudes corresponde à variação entre o máximo e mínimo de amplitudes de diferentes SL dentro da banda central e será designado como critério de planicidade (FC – *flatness criterion*). Portanto, quando menor o valor de FC, maior o grau de planicidade para as SLs de um OFC. Para uma melhor análise, este parâmetro pode ser ajustado e minimizado ao desconsiderarem individual e progressivamente as SLs dos extremos laterais dos pentes. A partir da Fig. 5, podem-se calcular valores de FC. Para o caso (i), Fig. 5 (a), obtém-se uma região plana entre -19,71 e -14,4 dB, de modo que $FC = 5,3$ dB para um OFC com 27 SLs. Ao se desconsiderarem 8 SLs dos extremos laterais, 4 de cada lado, o FC cai para 2,2 dB e o pente considera, agora, 19 SLs. Para o caso (ii), Fig. 5 (b), a região plana apresenta variação entre -21,61 e -18,47 dB e $FC = 3,1$ dB resultando em um OFC com 47 SLs efetivas. Removendo-se 10 SLs dos extremos laterais, 5 de cada lado, o FC cai a 1,3 dB e o número de SLs passa a 37. Finalmente, para o caso (iii), Fig. 5 (c), a região plana fica entre -23,24 e -21,45 dB, definindo um $FC = 1,78$ dB e um OFC de 65 SLs. Ao se desconsiderar 8 SLs dos extremos laterais, 4 de cada lado, obtém-se um $FC = 1,0$ dB e 57 SLs empregáveis. Observa-se que, ao se acrescentar moduladores ao sistema em cascata, OFCs cada vez mais planos e com maior número de SLs são gerados. Descartando-se SLs laterais extremas, o FC do pente diminui. Por outro lado, na maioria dos casos, algumas das SLs descartadas para o cálculo do FC de SLs cada vez mais centrais apresentam uma amplitude maior que a média das SLs do pente. Neste caso, ao invés do descarte direto por filtragem, o uso de, por exemplo, uma chave seletora de comprimentos de onda (WSS – *wavelength selective*

switch) poderia realizar uma filtragem seletiva e com equalização extra para as linhas centrais. Assim, EOMs cascateados podem gerar OFCs planos quando múltiplas portadoras são simultaneamente moduladas por MZM(s) acionados sob condições de equalização.

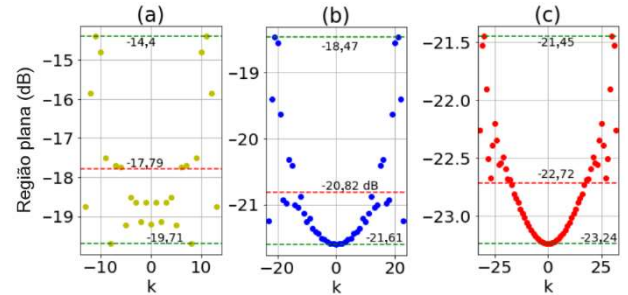


Fig. 5. Ampliões das regiões planas dos espectros dos OFCs mostrados na Fig. 4 (b), gerados pelos arranjos (a) PM1-MZ1, (b) PM1-MZ1-MZ2 e (c) PM1-MZ1-MZ2-MZ3.

I. RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O PM-MZM

A Fig. 2 mostra a configuração experimental usada para os testes experimentais do OFCG proposto. No lance óptico, a luz de um laser (ECL, cavidade externa, Santec MLS-2100) passa pelo PM1 (EOspace, PM-5SE-20-PFA-PFA-UV, $V_{\pi PM} = 3$ V) e é acoplada ao MZ1 (EOspace, AZ-DD-0SSP-20-PFA-SFA, $V_{\pi MZM1} = 2,4$ V). Controladores de polarização PC-1 e PC-2 ajustam a polarização na entrada dos EOMs. O sinal de saída do MZM1 é conectado diretamente a um OSA (Agilent 86146B) para a observação dos resultados. No caminho elétrico, um gerador de RF (GEN, Agilent E257D) fornece o sinal de modulação aos EOMs. Seu sinal é dividido por um acoplador de 3 dB (Agilent 87302C), com uma das saídas acopladas ao PM1 e a outra às portas do MZM1 após nova divisão por outro acoplador de 3 dB semelhante ao anterior. Os amplificadores de RF (AMP-1, AMP-2 e AMP-3, Mini-Circuits ZVE-3W-183+) antes das portas dos moduladores possuem ganho fixo, de modo que atenuadores de RF variáveis (ATT-1 e ATT-2, RF-Lambda RFVAT0218A50) foram usados para o ajuste das tensões de controle do PM1 e das portas RF1-a e RF1-b do MZ1. Fontes de tensão DC Minipa MPL-3303M) são acopladas às portas DC1-a e DC1-b para controle de polarização do MZ1. Durante os experimentos, a potência de saída do ECL foi de 5,5 dBm (3,55 mW), a frequência de modulação foi de 18 GHz, o PM1 operou com $A_{1,pm} = 1,9$ V e $\alpha_{1,pm} = 0$ rad e o MZM1 com $A_{1,x} = [9,78; 11,35]$, $U_{1,x} = [1,2; 0]$ V e $\alpha_{1,x} = 0$ rad.

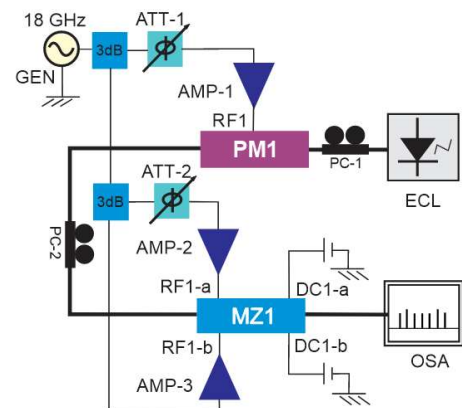


Fig. 6 Configuração experimental do OFCG composto por uma cascata de moduladores eletro-ópticos PM e MZM.

Essas configurações de operação também foram usadas para a simulação do EMA (i) PM1-MZ1 da seção anterior. Primeiramente, os espectros do PM1 e do MZ1 foram independentemente gerados e visualizados em um OSA, como mostrado na Fig. 7 (a). O PM gerou 13 SLs não equalizadas e o MZM, sob condições de equalização, gerou um pente de 15 SLs com FC de 5 dB. A Fig. 7 (b) mostra resultado teórico (em vermelho) e experimental (em amarelo) obtido pela disposição dos moduladores em cascata, mantendo-se as condições de operação dos EOMs. Pode-se observar que foi gerado um pente óptico plano com linhas espaçadas de 18 GHz, com 27 SLs centrais e um FC de 8,75 dB. Reduzindo o número de SLs para 25 e 17, o FC cai 5 e 2,45 dB, respectivamente. Ao se comparar a magnitude do FC entre os resultados teóricos e experimentais, verificou-se que estão em boa concordância, como pode ser observado na Fig. 7 (b). Teoricamente, a consideração de 27 e 19 SLs resultou em FCs de 5,3 e 2,2 dB, respectivamente. Assim, apesar dos valores de FCs referentes à simulação e ao experimento para os mesmos parâmetros de acionamento apresentarem valores muito próximos, o pente experimental produziu 2 SLs a menos que o teórico. Isto pode ser devido à atenuação dos sinais de RF e/ou fase eletrônica descontrolada, entre outros fatores. Ao se compararem as amplitudes dos OFCs, observou-se que o pente experimental apresenta amplitudes até 12 dB menores que as do teórico devido às perdas que o sinal óptico sofre ao longo do sistema. Por fim, a resolução do OSA impediu medições precisas da relação sinal-ruído óptica (OSNR) das SLs, que chegou a ser de 15 dB.

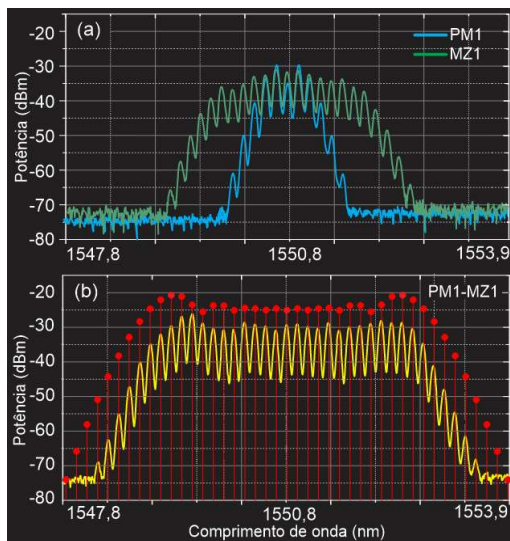


Fig. 7. Espectros medidos para (a) o PM e o MZM com ajuste de equalização de SLs e (b) o PM1-MZ1 com EOMs nas mesmas configurações de ajuste.

II. CONCLUSÕES

A geração de pentes ópticos ultra planos e de ampla banda (grande número de linhas) pelo uso vários EOMs em cascata foi analisada neste trabalho. Os pentes foram obtidos após o acionamento dos EOMs por formas de onda harmônicas de mesma frequência de RF e com amplitudes que obedecem a condição de planicidade para o(s) MZM(s). Demonstrou-se teoricamente que à medida que mais MZMs são adicionados à cascata, o grau de planicidade e o número de SLs equalizadas aumentam. Assim, se uma fonte de vários comprimentos de onda que formam um pente plano for modulado por um MZM conduzido nas condições de planicidade, será gerado um pente ainda mais plano ou com um FC menor que o anterior. Um

OFCG baseado na cascata de um PM e um MZM foi testado experimentalmente, fornecendo um pente com 25 linhas espectrais espaçadas de 18 GHz e formando um envelope plano, em concordância com os resultados previstos pela teoria. A técnica é simples e estável, e pode ser utilizada para diferentes aplicações, como, por exemplo, fontes para supercanais em comunicações ópticas e na geração de formas de onda ópticas arbitrárias, entre outras.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Fundação para o Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processos 2015/24517-8 e 2021/06569-1), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, e processo 88882.329469/2019-01, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo 402923/2016-2) e do FAEPEX/UNICAMP.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Systems, "Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper," Cisco Systems, 2020. [Online]. Disponível: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/index.html>
- [2] D. 2022, "Digital 2022 Global Digital Overview," [Online]. Disponível: <https://datareportal.com/reports/digital-2022-global-overview-report>
- [3] X. Liu, S. Chandrasekhar e P. J. Winzer, "Digital signal processing techniques enabling multi-Tb/s superchannel transmission: an overview of recent advances in DSP-enabled superchannels," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 2, pp. 16-24, 2014.
- [4] H. Hu et. Al., "Optical comb assisted OFDM RF receiver," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 1280-1287, 2019.
- [5] Z. Jiang, C.-B. Huang, D. E. Leaird, e A. M. Weiner, "Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines," *Nature Photonics*, vol. 1, no. 8, pp. 463-467, 2007.
- [6] T. Fortier e E. Baumann, "20 years of developments in optical frequency comb technology and applications," *Communications Physics*, vol. 2, no. 1, pp. 1-16, 2019.
- [7] J. N. Kemal et al., "Multi-wavelength coherent transmission using an optical frequency comb as a local oscillator," *Optics Express*, vol. 24, no. 22, pp. 25432-25445, 2016.
- [8] H. Hu e L. K. Oxenløwe, "Chip-based optical frequency combs for high-capacity optical communications," *Nanophotonics*, vol. 10, no. 5, pp. 1367-1385, 2021.
- [9] M. Beltrán et al., "38.2-Gb/s optical-wireless transmission in 75–110 GHz based on electrical OFDM with optical comb expansion," em *OFC/NFOEC*, pp. 1-3, 2012.
- [10] T. J. Kippenberg, R. Holzwarth e S. A. Diddams, "Microresonator-based optical frequency combs," *Science*, vol. 332, no. 6029, pp. 555-559, 2011.
- [11] V. Torres-Company e A. M. Weiner, "Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 8, no. 3, pp. 368-393, 2014.
- [12] L. A. Huancachoque e A. C. Bordonalli, "Amplitude equalization analysis of optical frequency combs generated by dual drive Mach-Zehnder modulator for high capacity optical transmissions," em *Frontier in Optics and Laser Science*, Optical Society of America, p. JW4A.61, 2017.
- [13] L. A. Huancachoque e A. C. Bordonalli, "Flattened optical frequency combs generated by algorithm-assisted parallel electro-optical phase modulators," em *Latin America Optics and Photonics Conference*, Optical Society of America, p. Tu2E.4, 2018.
- [14] T. Sakamoto, T. Kawanishi e M. Izutsu, "Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator," *Optics letters*, vol. 32, no. 11, pp. 1515-1517, 2007.
- [15] M. Seimetz, *High-order modulation for optical fiber transmission*. Springer, 2009.