

Sistemas Geradores de Subportadoras Ópticas Baseados em MZI com Modulador de Fase

Luis Paulo de Sousa Costa e João Batista Rosa Silva

Resumo—Neste trabalho são propostos dois sistemas para geração de subportadoras ópticas baseados em MZI com realimentação óptica e modulação de fase capazes de gerar 47 e 61 raias com espaçamento de 10 GHz. O primeiro Sistema possui *flatness* menor que 7 dB e OSNR de 20 dB, enquanto o segundo possui *flatness* de aproximadamente 12 dB e OSNR de 30 dB.

Palavras-Chave—Geração de subportadoras, modulador de fase, interferômetro de Mach-Zehnder, amplificador óptico.

Abstract—In this work two systems for the generation of optical subcarriers based on MZI with optical feedback and phase modulation capable of generating 47 and 61 lines with 10 GHz spacing are proposed. The first system has *flatness* less than 7 dB and OSNR of 20 dB while the second has approximately 12 dB *flatness* and 30 dB OSNR.

Keywords—Subcarrier generation, phase modulator, Mach-Zehnder interferometer, optical amplifier.

I. INTRODUÇÃO

A demanda por largura de banda vem crescendo tanto em ambientes domésticos quanto em corporativos. O aumento do número de *smartphones* e *tablets* aliado ao consumo de serviços de multimídia tem sobrecarregado as redes de comunicações ópticas. Uma das soluções propostas para esse problema é melhorar o uso da banda disponível. As redes WDM (*wavelength division multiplexing*) possuem alocação fixa que não permite o uso da banda não ocupada. Redes ópticas elásticas (EON - *elastic optical network*) permitem um melhor aproveitamento do espectro fazendo uso de *slots* que possibilitam a alocação praticamente contínua, separada apenas por uma banda de guarda [1].

Dentro das EONs há vários subsistemas, um deles é um *transponder* flexível que, dentre outras funções, deve permitir alterar seu número de subportadoras para atender a diferentes capacidades. As subportadoras podem ser geradas por um conjunto de lasers independentes, porém, essa solução sofre com espaçamento de frequência variável [2]. Outra solução é o uso de pentes de frequência óptica (OFC - *optical frequency combs*) para geração das subportadoras [2], [3].

Um OFC pode ser caracterizado como um conjunto regular de raias ópticas, com mesmo espaçamento, que mantém conformidade espectral em toda largura de banda do sinal. A maior parte das técnicas utilizadas para gerar um OFC utiliza moduladores eletro-ópticos. Tipicamente, o sinal gerado por um laser operando em regime contínuo é modulado por um, ou mais moduladores, em amplitude, fase, polarização ou uma

combinação destas. Alguns sistemas também utilizam laços ópticos com moduladores para aumentar o número de raias geradas [2].

Moduladores de fase cascadeados com moduladores em intensidade podem ser utilizados para geração de subportadoras. Em Metcalf *et al.* [4] três moduladores de fase e um de intensidade, cascadeados, foram utilizados para gerar 65 raias com *flatness* de 10 dB e espaçamento entre raias de 10 GHz.

A geração de subportadoras pode ser alcançada pelo uso de moduladores Mach-Zehnder (MZM - *Mach-Zehnder modulator*). Em Hmood *et al.* [5] dois MZM são cascadeados para gerar 51 raias, sendo que desdas 27 possuem flutuação de potência menor que 1 dB.

Moduladores de fase (PM - *phase modulator*) também podem ser usados para produção de subportadoras, como vantagem, possuem tamanho reduzido e não necessitam de controle de polarização. Em Yamamoto *et al.* [6] um PM é utilizado para gerar 29 raias, espaçadas de 10 GHz com *flatness* de 5 dB. Em Yamamoto *et al.* [7] uma Grade de Bragg é usada como meio dispersivo entre dois PMs para gerar 61 raias, espaçados de 25 GHz e com flutuação de 8 dB. Em Zhang *et al.* [8] três PMs são cascadeados para gerar 53 raias, espaçados de 12,5 GHz e com *flatness* de 10 dB.

Este trabalho apresenta dois sistemas para geração de subportadoras ópticas baseado no interferômetro de Mach-Zehnder (MZI - *Mach-Zehnder interferometer*) com realimentação óptica e modulação de fase. Este artigo foi estruturado em quatro seções. Na Seção II é descrita a arquitetura utilizada para geração de subportadoras. Na Seção III serão apresentados os resultados obtidos e, posteriormente, as conclusões na Seção IV.

II. SISTEMAS ÓPTICOS

Os sistemas propostos neste trabalho utilizam como base MZI assimétrico. O primeiro Sistema proposto (Sistema 1), mostrado na Fig. 1(a), tem duas portas do MZI interconectadas por um amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA - *erbium doped fiber amplifier*), formando um laço óptico de realimentação, e no braço inferior do MZI é colocado um PM. O sinal gerado por um diodo laser (LD - *laser diode*) é dividido em dois no divisor de feixe 1 (BS₁ - *beam splitter*), o sinal que segue no braço inferior é modulado pelo PM com um sinal de rádio de frequência (RF) senoidal de 10 GHz, e ambos sinais são recombinados e divididos no BS₂. Parte do sinal em BS₂ é medido por um analisador de espectro óptico (OSA - *optical spectrum analyzer*) e a outra parte é reintroduzida no sistema pelo laço óptico amplificado.

Já o segundo Sistema proposto (Sistema 2) mostrado na Fig. 1(b), possui um BS e um filtro gaussiano invertido (FT) a mais que o Sistema 1. O BS₃ superpõe o sinal vindo do braço superior de BS₁ e BS₂, e provê saída para o OSA e BS₂. Neste sistema o sinal que sai do braço inferior de BS₂ é modulado e amplificado antes de ser acoplado em BS₁. Um FT é utilizado antes do OSA para atenuar a portadora e com isso melhorar a flutuação de potência.

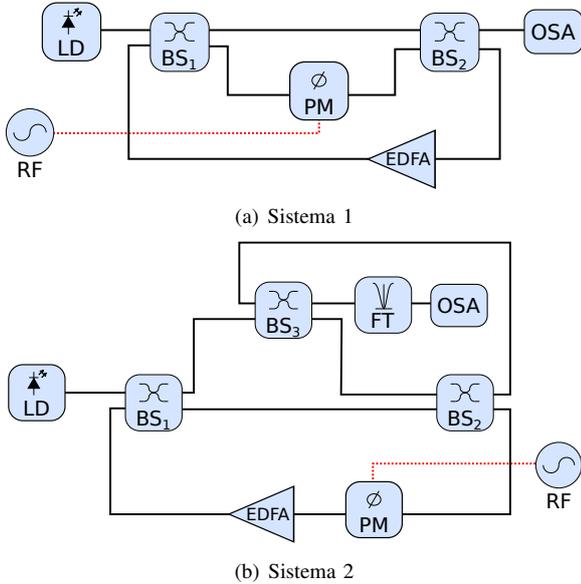


Fig. 1. Esquemas propostos para geração de subportadoras (LD: laser, BS: divisor de feixe, PM: modulador de fase, EDFA: amplificador de fibra dopada com érbio, OSA: analisador de espectro óptico, RF: gerador de rádio de frequência).

A Tabela I exibe os parâmetros utilizados na simulação. No Sistema 1 todos os componentes são interligados com fibras de 3 mm de comprimento, enquanto no Sistema 2 são interligados com fibras de 4,5 mm.

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO.

Componente	Parâmetro
Laser	Potência óptica: 0 dBm
	Frequência: 193,1 THz
Modulador de fase	Frequência: 10 GHz
Divisor de feixe	Coefficiente de acop.: 0,5
EDFA	ganho: 20 dB

O campo elétrico das raias geradas pela modulação de fase pode ser descrito segundo a expansão de Jacobi-Anger [8], dada por:

$$E_{out} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\pi R) \exp[j2\pi(f_c + n f_s)]. \quad (1)$$

Onde $J_n(\pi R)$ é uma função de Bessel de ordem n , f_c é a frequência da portadora e f_s é a frequência do gerador de RF. Observa-se em (1) que o sinal gerado possui raias com frequência $f_c + n f_s$, com $n = \pm 1, \pm 2, \dots$. Devido a limitação de potência, a medida que as raias se afastam da frequência da portadora a potência diminui.

III. RESULTADOS

Os sistemas propostos foram simulados numericamente utilizando o *Optisystem*. No *software* cada iteração representa um instante capturado pelos equipamentos de medição. Como os sistemas possuem laços de realimentação mais iterações devem ser realizadas para levar em conta o sinal de realimentação dos laços.

Em cada iteração o sinal óptico é capturado pelo OSA e amostrado em uma curva de potência óptica por comprimento de onda. Para se aproximar de sistemas reais, onde os equipamentos de medição fazem uma média dos valores instantâneos, foram geradas 400 iterações e a partir destas obteve-se a potência média por comprimento de onda. Os gráficos da potência óptica por comprimento de onda obtidas a partir dos Sistema 1 e são apresentados nas Fig. 2 e 3 respectivamente.

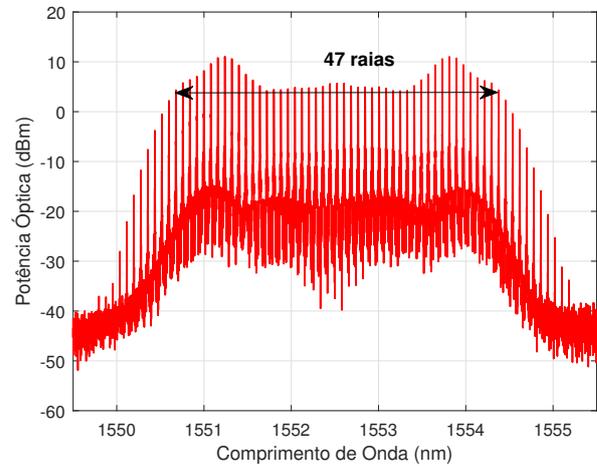


Fig. 2. Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 1.

A Fig. 2 mostra as 47 raias geradas pelo Sistema 1, com espaçamento de 10 GHz, obtendo uma largura de banda total de 460 GHz. A flutuação entre as potências das raias é de 7 dB e a relação sinal-ruído óptica (OSNR - *optical signal to noise ratio*) é de 20 dB.

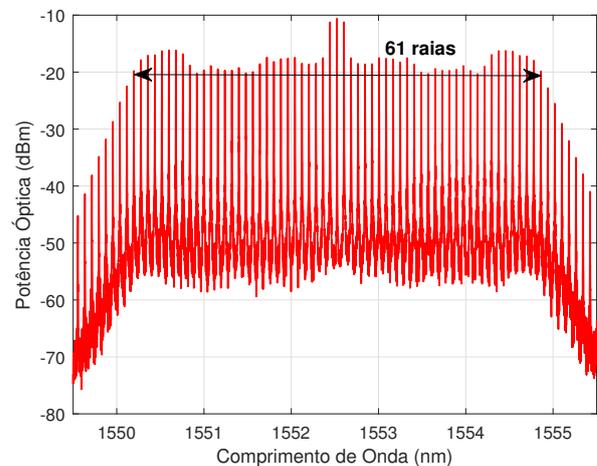


Fig. 3. Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 2.

A Fig. 3 exibe os raios gerados pelo Sistema 2 que possui um *flatness* de 12 dB, e OSNR de 30 dB, observa-se também que foram geradas 61 raias, com espaçamento entre raias de 10 GHz e largura de banda total do sinal de 600 GHz.

O Sistema 1 apresenta maior simplicidade e maior potência nas raias obtidas que o Sistema 2, contudo, gera menos raias e possui um OSNR inferior. Para gerar mais raias o Sistema 2 requer um BS e um FT a mais que o Sistema 1, com isso produz 61 raias com um OSNR de 30 dB. O Sistema 2 poderia utilizar apenas um BS a mais que o Sistema 1, no entanto, seu *flatness* seria comprometido e subiria para 22 dB. O Sistema 1 disponibiliza suas raias com uma potência óptica em torno de 5 dBm, enquanto o Sistema 2 tem suas raias acessíveis na faixa de -20 dBm.

A Tabela II mostra um comparativo entre os valores obtidos pelos sistemas e algumas arquiteturas disponíveis na literatura. Os Sistemas 1, 2 e [6] utilizam apenas um PM, entretanto, os Sistema 1 e 2 apresentam maior número de raias. Já o sistema utilizado em [7] tem o mesmo desempenho quanto ao número de raias que o Sistema 2, contudo, apresenta maior complexidade pois utiliza dois PMs e um LD mais potente (9 dBm) do que utilizado nos sistemas propostos (0 dBm). O aparato óptico utilizado em [8] apresenta melhor OSNR que os sistemas propostos, toda via, possui maior complexidade pois usa três PMs e um LD de 14 dBm. Vale ressaltar que o espectro central do Sistema 1 possui 23 raias com *flatness* de apenas 1,5 dB.

TABELA II
COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS.

Sistema	No raias	Espaçamento	Flatness	OSNR
1	47	10 GHz	7 dB	20 dB
2	61	10 GHz	12 dB	30 dB
ref [6]	29	10 GHz	5 dB	-
ref [7]	61	25 GHz	8 dB	61 dB
ref [8]	53	12,5 GHz	10 dB	40 dB

Os sistemas propostos foram pensados para fotônica integrada, contudo, é possível utilizar fibras com tamanho de 30 e 45 cm para os Sistemas 1 e 2, para isso o ganho do EDFA deve ser ajustado para 17,5 dB. Dessa forma o primeiro sistema continua gerando a mesma quantidade de raias com um *flatness* de 13 dB, enquanto o segundo sistema passa a gerar 67 raias com o *flatness* de 9,5 dB.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram propostos dois sistemas que utilizam MZI com realimentação óptica e modulação de fase para geração subportadoras na faixa de 1550 nm. O primeiro sistema proposto gerou 47 raias com uma potência média de 5 dBm, enquanto o segundo sistema proposto gerou 61 raias com uma potência média de -20 dBm com um laser de 0 dBm e amplificador de 20 dB. O primeiro sistema possui melhor *flatness*, 7 dB contra 12 dB do segundo, enquanto o segundo possui melhor OSNR, 30 dB contra 20 dB do primeiro. O Sistema 1 apresentou destacou-se por apresentar 23 raias com flutuação de potência de apenas 1,5 dB. Vale ressaltar que

os sistemas foram pensados para fotônica integrada, porém, podem ser implementados utilizando componentes ópticos discretos com fibras de 30 e 45 cm para os Sistemas 1 e 2, respectivamente, com o Sistema 2 apresentando um número de raias superior em aproximadamente 10% em comparação a versão integrada. Ambos os sistemas tem sua vantagem e podem ser utilizados em redes WDM, EON, rádio sobre fibra (RoF).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelas agências brasileira CAPES e CNPq (via projeto No. 458867/2014-4).

REFERÊNCIAS

- [1] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE communications magazine*, vol. 47, no. 11, 2009.
- [2] M. Imran, P. M. Anandarajah, A. Kaszubowska-Anandarajah, N. Sambo, and L. Poti, "A survey of optical carrier generation techniques for terabit capacity elastic optical networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017.
- [3] I. Tomkos, S. Azodolmolky, J. Solé-Pareta, D. Careglio, and E. Palkopoulou, "A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 9, pp. 1317–1337, 2014.
- [4] A. J. Metcalf, V. Torres-Company, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, "High-power broadly tunable electrooptic frequency comb generator," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 6, pp. 231–236, 2013.
- [5] J. K. Hmood, S. D. Emami, K. A. Noordin, H. Ahmad, S. W. Harun, and H. M. Shalaby, "Optical frequency comb generation based on chirping of mach-zehnder modulators," *Optics Communications*, vol. 344, pp. 139–146, 2015.
- [6] M. Yamamoto, Y. Tanaka, T. Shioda, T. Kurokawa, and K. Higuma, "Optical frequency comb generation using dual frequency optical phase modulation," in *Integrated Photonics Research and Applications*, p. ITuF5, Optical Society of America, 2005.
- [7] T. Yamamoto, T. Komukai, K. Suzuki, and A. Takada, "Multicarrier light source with flattened spectrum using phase modulators and dispersion medium," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 19, pp. 4297–4305, 2009.
- [8] J. Zhang, J. Yu, L. Tao, Y. Fang, Y. Wang, Y. Shao, and N. Chi, "Generation of coherent and frequency-lock optical subcarriers by cascading phase modulators driven by sinusoidal sources," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 24, pp. 3911–3917, 2012.