

Compensação da Não-linearidade do Modulador de Mach-Zehnder *Dual-Drive* em Enlaces a Fibra Óptica por meio da Dispersão Cromática

Luiz Carlos dos Santos Barbosa^{1,2}, José Edimar Barbosa Oliveira²

¹Departamento de Ciência e Tecnologia - Exército Brasileiro, Brasília/DF – Brasil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo — Apresentou-se uma análise mostrando os efeitos da não-linearidade do modulador de Mach-Zehnder *dual-drive* para índices de modulação baixos e elevados. Foi abordado como compensar os efeitos não-lineares do modulador por intermédio da dispersão cromática, utilizando um modulador em quadratura e configurado para gerar sinais modulados em banda lateral dupla. Por fim, foi demonstrado a compensação da não-linearidade do modulador com a dispersão cromática, utilizando uma transmissão numa constelação digital de amplitude em quadratura.

Palavras-chave — Não-linearidade do MZM, Dispersão cromática, Índice de modulação elevado.

I. INTRODUÇÃO

As demandas atuais de consumo de dados, seja por pessoas seja por máquinas conectadas, estão impondo desafios para o crescimento das comunicações ópticas. Isso tem se tornado em um incentivo para que, em todo o mundo, pesquisadores busquem novas soluções que visem superar os atuais obstáculos impostos por esse tipo de tecnologia de forma a proporcionar um aumento da capacidade das redes ópticas existentes [1]. Como exemplos desses obstáculos, pode-se citar a não-linearidade do modulador de Mach-Zehnder *dual-drive* (DD-MZM) e a dispersão cromática causada pela fibra óptica. O DD-MZM é um dispositivo amplamente utilizado em *links* ópticos com modulação externa devido à sua largura de banda de modulação mais ampla quando comparado aos *links* com modulação direta [2]. No entanto, quando é alimentado com um sinal largo, há um aumento da não-linearidade inerente do DD-MZM em resposta ao aumento do sinal de entrada. Já a dispersão cromática é um efeito imposto pela fibra, causando um alargamento temporal do sinal de radiofrequência (RF) [3].

Adicionalmente, várias pesquisas enfatizam a crescente utilização de enlaces à fibra óptica para transmitir e processar sinais com ampla gama de formas de ondas notadamente em segmentos de interesse da defesa [4], além de significantes investimentos na área de Fotônica como um todo [5], cita-se como exemplo, as redes de fibras ópticas existentes pelo Brasil que são responsáveis pelo tráfego dos dados da Rede Corporativa de Dados do Exército Brasileiro (EBnet) e dos dados do Sistema de Monitoramento de Fronteiras (SISFRON), conforme ilustra a Fig. 1.

Nesta publicação, apresentou-se um modelo analítico mostrando como a não-linearidade do DD-MZM pode ser compensada pelo intermédio da dispersão cromática.

Luiz Carlos dos Santos Barbosa, luizcarlos.barbosa@eb.mil.br; José Edimar Barbosa Oliveira, edimar@ita.br.



Fig. 1. Representação das redes e serviços que fazem parte da Rede Corporativa de Dados do Exército Brasileiro (EBnet) [6].

II. ABORDAGEM ANALÍTICA

A) Modelo do enlace

Um modulador de Mach-Zehnder *dual-drive*, como parte de um enlace a fibra óptica, é representado pela Fig. 2, onde o funcionamento de tal tipo de dispositivo baseia-se na interferência entre dois modos ópticos guiados cuja constante de propagação é controlada por um campo elétrico do sinal de RF convenientemente distribuído dentro do substrato eletro-óptico. O campo elétrico do sinal modulante (sinal de RF), que é espacialmente determinado pelos eletrodos, comporta-se como uma onda quase-TEM. Tal comportamento depende dos coeficientes de reflexão de RF ao final dos eletrodos dos descasamentos de velocidades entre os sinais óptico e de RF. O diagrama de campo é proveniente de uma combinação das fontes DC e RF, que são responsáveis por fornecer a tensão de polarização e o sinal modulante, respectivamente.

Neste artigo e para o modelo representado pela Fig. 2, é postulado que as impedâncias da fonte, linha e carga estão casadas, assim como as velocidades de propagação do sinal de RF e óptico. Apesar de as técnicas empregas nesta publicação serem aplicáveis também a sinais de RF de múltiplas frequências (*multitone*), salienta-se que o sinal de RF aqui considerado possui apenas uma frequência (*single tone*), portanto o deslocamento de fase induzido pelo sinal de RF visto pela portadora óptica para a configuração em parâmetros concentrados (*lumped*) é dado por:

$$\Delta\varphi(t) = \frac{\Delta\beta_0 l}{2} \cos(\omega_m t) \quad (1)$$

onde $\Delta\beta_0 = \pi V_m/V_\pi$, é um parâmetro que decorre do efeito *Pockels*, o qual depende da tensão de meia-onda do modulador (V_π) e das tensões do sinal de RF aplicadas ao mesmo (V_m); l é

comprimento de interação entre os campos elétrico e óptico e ω_m é a frequência angular do campo elétrico.

Consoante com as condições já especificadas, as entradas de RF do DD-MZM mostrado na Fig. 2 são especificadas por:

$$v_1(t) = V_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \theta_1^{RF}) \quad (2)$$

$$v_2(t) = V_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \theta_2^{RF}) \quad (3)$$

onde V_{RF} é a tensão máxima da fonte de RF, ω_{RF} é a frequência angular da fonte de RF e θ_1^{RF} e θ_2^{RF} são os deslocamentos de fase impostos ao sinal de RF pela híbrida de RF, conforme ilustrado na Fig. 2.

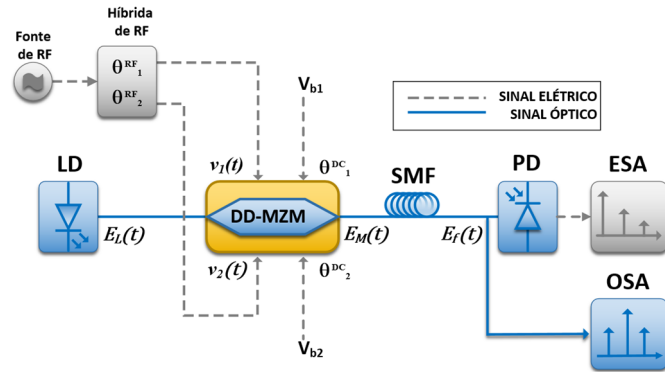


Fig. 2. Representação esquemática de um enlace a fibra óptica baseado em modulação por intensidade e detecção-direta (IM-DD) composto por: diodo laser (LD), modulador Mach-Zehnder *dual-drive* (DD-MZM), fibra óptica monomodo (SMF), fotodetector (PD), analisador de espectro óptico (OSA) e analisador de espectro elétrico (ESA).

Em relação a portadora óptica mostrada na Fig. 2, é postulado que ela emerge de um diodo laser DFB (LD) com largura de linha nula e sem ruídos de fase e intensidade, além de fornecer uma potência óptica P_0 , correspondente amplitude de campo elétrico E_0 e frequência angular ω_0 .

Postulando uma divisão de 3 dB e perda de inserção nula no modulador, é possível mostrar que o campo elétrico óptico na saída do DD-MZM é da forma:

$$E_M(t) = E_0 A_{IM}(t) e^{j\omega_0 t} e^{j\varphi_{PM}(t)} \quad (4)$$

onde,

$$A_{IM}(t) = \cos \left[m \sin \left(\omega_{RF} t + \frac{\theta_1^{RF} + \theta_2^{RF}}{2} \right) \sin \left(\frac{\theta_1^{RF} - \theta_2^{RF}}{2} \right) - \left(\frac{\theta_1^{DC} - \theta_2^{DC}}{2} \right) \right] \quad (5)$$

$$\varphi_{PM}(t) = m \cos \left(\omega_{RF} t + \frac{\theta_1^{RF} + \theta_2^{RF}}{2} \right) \cos \left(\frac{\theta_1^{RF} - \theta_2^{RF}}{2} \right) + \left(\frac{\theta_1^{DC} + \theta_2^{DC}}{2} \right) \quad (6)$$

$$m = \frac{\pi V_{RF}}{V_{\pi}^{RF}} \quad \theta_1^{DC} = \frac{\pi V_{b1}}{V_{\pi}^{DC}} \quad \theta_2^{DC} = \frac{\pi V_{b2}}{V_{\pi}^{DC}} \quad (7)$$

sendo m o índice de modulação; V_{π}^{RF} e V_{π}^{DC} as tensões de meia-onda para os sinais RF e DC, respectivamente; e V_{b1} e V_{b2} as tensões DC de polarização.

Analisando (4), (5) e (6), verifica-se que, em geral, o DD-MZM realiza simultaneamente uma combinação de modulações de intensidade (IM) e fase (PM). A conveniência da representação adotada reflete-se na avaliação de desempenho do enlace, bem como em um *insight* com relação a presença de modulação PM e IM na saída do modulador, conforme previsto pelo parâmetro *chirp* [7]. A presente publicação adota a condição em que não há *chirp*, de forma que o DD-MZM se comporta exclusivamente como um modulador puramente de intensidade.

Retornando ao campo elétrico na saída do modulador e aplicando a expansão de Jacobi-Anger [8] em (4), o referido campo elétrico pode ser representado na seguinte forma:

$$E_M(t) = \frac{E_0}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{j(\omega_0 + n\omega_{RF})t} \quad (8)$$

sendo,

$$a_n = e^{j\frac{n\pi}{2}} \left[e^{j(n\theta_1^{RF} + \theta_1^{DC})} + e^{j(n\theta_2^{RF} + \theta_2^{DC})} \right] J_n(m) \quad (9)$$

onde $J_n(m)$ é a n -ésima função de Bessel de primeira ordem.

É possível observar que (8) representa o campo elétrico do sinal óptico na saída do DD-MZM como uma série infinita de componentes espectrais composta pela portadora óptica ω_0 e infinitas bandas laterais de frequência $\omega = \omega_0 \pm n\omega_{RF}$ e amplitude a_n , sendo que esta forma será útil mais à frente nesta publicação.

Por outro lado, é possível obter a potência óptica na saída do DD-MZM a partir de (5), na seguinte forma:

$$P_M(t) = P_0 \cos^2 \left[m \sin \left(\omega_{RF} t + \frac{\theta_1^{RF} + \theta_2^{RF}}{2} \right) \sin \left(\frac{\theta_1^{RF} - \theta_2^{RF}}{2} \right) - \left(\frac{\theta_1^{DC} - \theta_2^{DC}}{2} \right) \right] \quad (10)$$

Deve ser observado que o campo elétrico óptico $E_M(t)$, presente na Fig. 2, reproduz a potência elétrica representada por (10) numa situação em que não há *chirp* e em uma condição conhecida como *back-to-back* (BTB).

Adicionalmente, (10) mostra que o DD-MZM possui uma curva característica não-linear a qual depende dos parâmetros elétricos de configuração que são retratados na Fig. 2 como frequência do sinal de RF (ω_{RF}), deslocamentos de fase do sinal de RF (θ_1^{RF} e θ_2^{RF}) e tensões de polarização (θ_1^{DC} e θ_2^{DC}) além, é claro, do índice de modulação (m).

Além disso, existem pontos estáticos de operação do DD-MZM destacados na literatura, os quais são conhecidos pelos valores escolhidos pelas diferenças das tensões de polarização ($\Delta\theta^{DC}$): *Maximum Transmission Bias Point* - MATB (0), *Quadrature Bias Point* - QB ($\pi/2$) e *Minimum Transmission Bias Point* - MITB (π); os quais estão representados na Fig. 3.

Acrescenta-se que, quando ambos os deslocamentos de fase em RF (θ_1^{RF} e θ_2^{RF}) são convenientemente escolhidos, é possível gerar diferentes formatos de modulação como o OSSB (*optical single sideband*), fazendo $\Delta\theta^{RF} = \pi$ e o ODSB (*optical double sideband*), fazendo $\Delta\theta^{RF} = \pi/2$ [4].

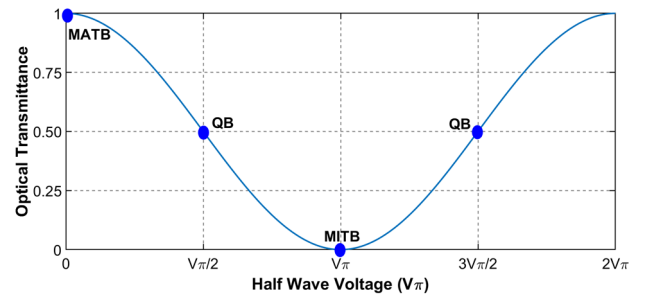


Fig. 3. Curva característica estática do DD-MZM: *Maximum Transmission Bias Point* - MATB, *Quadrature Bias Point* - QB e *Minimum Transmission Bias Point* - MITB.

A partir desse ponto, é necessário que seja contabilizado o efeito da dispersão provocado pela fibra óptica tendo em vista que, durante a propagação, todas as componentes espectrais do sinal óptico se deslocarão com diferentes velocidades, além de sofrerem uma alteração de fase provocada pela dispersão cromática. Objetivando o cálculo do parâmetro de dispersão (β_2), expande-se a constante de propagação $\beta(\omega)$ em uma série de Taylor em torno da portadora óptica (ω_0) [3]:

$$\beta(\omega) = \beta_0(\omega_0) + \beta_1(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}\beta_3(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (11)$$

Em relação a (11), os termos de maior ordem não foram considerados, os primeiros quatro termos do lado direito mostram a dependência em relação a um desvio de frequência, o primeiro termo é constante e (β_0) significa velocidade de fase

da portadora óptica, o segundo varia linearmente e $\beta_1(\omega_0)$ define a velocidade de grupo, o terceiro possui uma dependência quadrática e está relacionado à derivada da velocidade de grupo em relação à frequência e $\beta_2(\omega_0)$ está relacionado ao parâmetro de dispersão cromática $D(\lambda)$, ao comprimento de onda da portadora óptica (λ_0) e à velocidade da luz no vácuo (c) [4].

Adicionalmente, verifica-se que a resposta em fase para cada componente espectral após a propagação por uma fibra de comprimento L é [9]:

$$\phi(\omega_0 + n\omega_{RF}) = \frac{1}{2}(n\omega_{RF})^2\beta_2(\omega_0)L \quad (12)$$

Dessa forma, a partir de (8) e (12), combinados com as equações de Maxwell e [10], o campo elétrico óptico no domínio do tempo na saída do enlace, considerando o efeito da dispersão cromática provocado por uma fibra monomodo (*Single Mode Fiber - SMF*) é definido por:

$$E_f(t) = 10^{-\frac{\alpha_{dB}L}{20}} \frac{E_0}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{j[(\omega_0+n\omega_{RF})t+\phi(\omega_0+n\omega_{RF})]} \quad (13)$$

Considerando o valor médio do vetor de Poynting e postulando que a potência óptica está uniformemente distribuída sobre a seção transversal do PD, a corrente de RF em função do tempo obtida na saída do fotodetector a partir de (13) é:

$$i_{PD}(t) = \frac{R[E_f(t)][E_f(t)]^*}{2Z_0} \quad (14)$$

onde, R é a responsividade do fotodetector (em ampère por Watt), Z_0 é uma constante (em ohm por metro quadrado) que depende da seção reta do acoplamento entre o DD-MZM e o PD e da impedância da onda óptica e, o símbolo * significa o complexo conjugado.

A equação (14) também pode ser escrita no domínio da frequência utilizando o teorema da convolução [11], assim, desprezando-se a atenuação causada pela fibra cada componente harmônico obedece a forma [9]:

$$I(N\omega_{RF}) = \frac{1}{4} e^{jN\phi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{n+N} a_n^* e^{jn\phi} \quad (15)$$

onde ϕ é uma fase devido a dispersão da fibra, chamado desde então de parâmetro ϕ (*fading*):

$$\phi = N\beta_2\omega_{RF}^2L \quad (16)$$

Aplicando (9) em (15) conforme [9], obtém-se:

$$\begin{aligned} I(N\omega_{RF}) = & \frac{1}{4} \{ e^{jN\pi} (e^{jN\theta_1^{RF}} + e^{jN\theta_2^{RF}}) J_N \left[2m \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right] \right. \\ & + e^{-j\frac{N\Delta\theta^{RF}}{2}} e^{j\Delta\theta^{DC}} e^{N\theta_1^{RF}} e^{jN\pi} J_N \left[2m \cdot \sin\left(\frac{\phi+\Delta\theta^{RF}}{2}\right) \right] \\ & \left. + e^{j\frac{N\Delta\theta^{RF}}{2}} e^{-j\Delta\theta^{DC}} e^{N\theta_2^{RF}} e^{jN\pi} J_N \left[2m \cdot \sin\left(\frac{\phi-\Delta\theta^{RF}}{2}\right) \right] \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

onde $\Delta\theta^{RF} = \theta^{RF}_1 - \theta^{RF}_2$ e $\Delta\theta^{DC} = \theta^{DC}_1 - \theta^{DC}_2$.

É importante se observar que, apesar de (17) se mostrar diferente do que a literatura tradicional apresenta, por intermédio dela é possível obter as amplitudes das componentes espectrais na saída do DD-MZM, bastando-se para isso desconsiderar o *fading* ($\phi = 0$), bem como obter as componentes na saída do enlace ($\phi \neq 0$), ambas para harmônicos de ordem N . Também, a referida equação representa analiticamente a evolução das componentes espectrais do sinal de RF em função da posição no enlace, a qual é definida pelo parâmetro ϕ , permitindo-se examinar a

dispersão cromática em função do índice de modulação e assim obter uma compreensão quantitativa do problema examinado teoricamente e experimentalmente por [12], [13] a saber: período do *fading* diferente do obtido com a análise de pequenos sinais.

B) Não-linearidade do DD-MZM

Antes do estudo do comportamento do sinal ao longo do enlace, é importante que se realize uma análise do mesmo em função do índice de modulação e antes de ser injetado na fibra óptica, ou seja, como ele se comporta na saída do DD-MZM variando-se o índice de modulação do sinal de RF. Dessa forma, considerando que o escopo dessa publicação é a análise do comportamento do harmônico fundamental em uma transmissão ODSB em QB, faz-se então, $\phi = 0$ e $N=1$, $\Delta\theta^{RF} = \pi$ e $\Delta\theta^{DC} = \pi/2$ em (17), obtendo-se:

$$I(\omega_{RF}) = \frac{1}{2} e^{j\pi} J_1[2m] \quad (18)$$

Verifica-se que (18) mostra o comportamento do fundamental na saída do modulador, sendo que esse harmônico é regido pela função de Bessel de primeira ordem (J_1) e como o argumento da função de Bessel é constituído somente pelo índice de modulação, o sinal na saída do DD-MZM dependerá apenas deste índice, onde tal comportamento pode ser observado na Fig. 4. Adicionalmente, verifica-se que, para índices de modulação acima de 1,0, o fundamental começa a apresentar um desvanecimento (letra “A” na Fig. 4), passando a apresentar um ponto de nulo perto de 1,92 (letra “B” na Fig. 4), como detalhado em [14]. Esse desvanecimento, analisado apenas do ponto de vista da resposta não-linear do modulador, poderia representar um obstáculo à transmissão de constelações digitais QAM (*quadrature amplitude modulation*) ao se utilizar elevados índices de modulação (*large signal theory*), entretanto, será mostrado ainda nesta publicação que isso pode ser superado ao se adicionar o efeito da dispersão cromática. Portanto, à medida que esse harmônico se propaga no enlace, a posição desse *fading* passa a ser função também do parâmetro ϕ , conforme será apresentado em seguida.

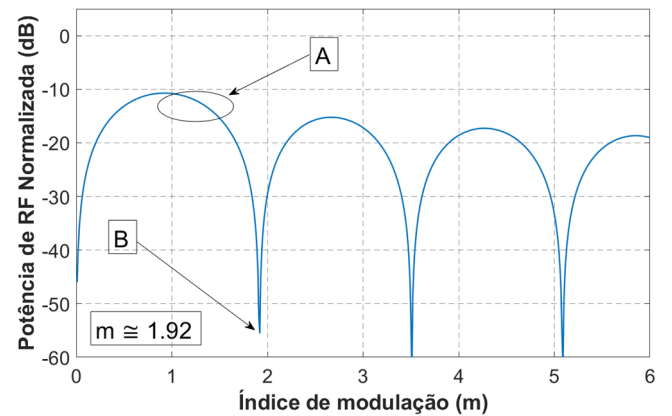


Fig. 4. Fundamental obtido na saída do DD-MZM (QB e ODSB) em função do índice de modulação.

C) Dispersão da fibra óptica

Agora, será realizada uma análise da evolução das componentes espectrais do sinal de RF até o final do enlace, isto é, incorporando os efeitos da dispersão cromática ao sinal entregue pelo modulador. Para isso, foram negligenciadas dispersões de ordem elevadas, dispersão do modo de polarização, perdas de propagação, não-linearidades da fibra assim como todos os ruídos ópticos e elétricos foram omitidos nos cálculos.

Considerando apenas a detecção do fundamental com os mesmos parâmetros utilizados para obtenção de (18), exceto $\phi \neq 0$, (17) se transforma em:

$$I(\omega_{RF}) = \frac{1}{2} e^{j\pi} J_1 \left[2m \cdot \cos \left(\frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (19)$$

Dessa forma, numa análise ao longo do enlace e independentemente do índice de modulação, os nulos em (19) ocorrem em:

$$J_1 \left[2m \cdot \cos \left(\frac{\phi}{2} \right) \right] = 0 \rightarrow \phi = \pi \quad (20)$$

Como previsto em (20), as formulações fundamentadas na hipótese de baixo índice de modulação (*small signal approximation*), por exemplo [12], [15], [16] e [17], limitam-se a existência desse único ponto de *fading* para o harmônico fundamental (conhecido como *fading* convencional) e também para os demais harmônicos ímpares, o que pode ser observado para o primeiro harmônico na Fig. 5 para índices de modulação de 0,1, 0,5 e 1,0.

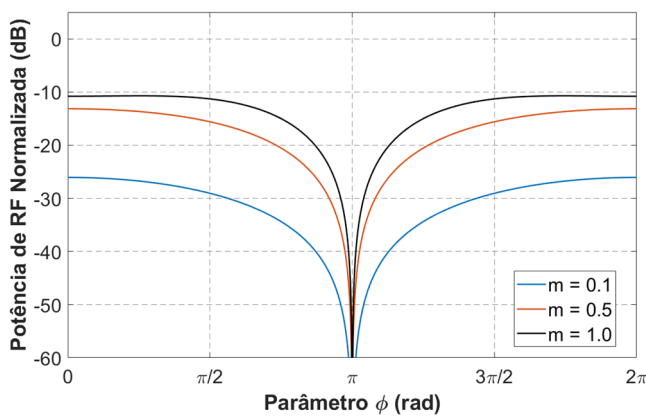


Fig. 5. Comportamento do fundamental devido a dispersão cromática para índices de modulação iguais a 0,1, 0,5 e 1,0.

Entretanto, quando o índice de modulação alcança valores a partir de 1,92, a não-linearidade do DD-MZM começa a incorporar novos pontos de *fading* ao sinal fundamental (letras “C” e “D” na Fig. 6) ao longo da propagação pela fibra óptica [14]. Além disso, verifica-se que a dispersão causada pela fibra altera o efeito da não-linearidade causada pelo modulador, de tal forma a compensá-lo.

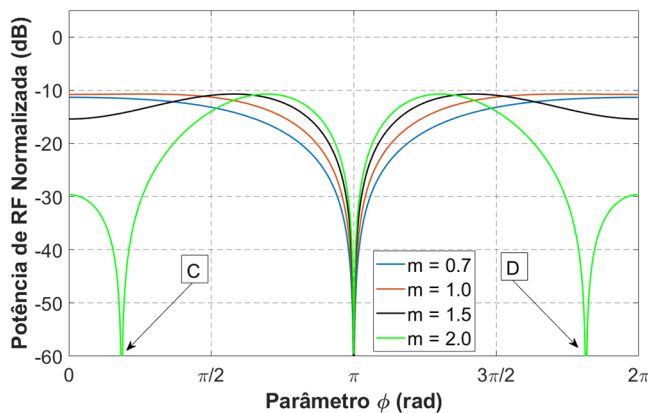


Fig. 6. Comportamento do fundamental devido a dispersão cromática para índices de modulação iguais a 0,7, 1,0, 1,5 e 2,0.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de exemplificar os resultados obtidos pela abordagem analítica dessa publicação e comparar com

resultados existentes na literatura [12], serão apresentados um caso para *small signal* (caso A) e outro caso para *large signal* (caso B). Para ambos, foram realizados cálculos numéricos com base em parâmetros reais tais como: constelação 16-QAM, portadora do sinal de RF em 10 GHz e fibra óptica com parâmetro de dispersão de velocidade de grupo (β_2) igual a $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$, tendo como base a equação (19) e utilização do *software* MATLAB R2020b® para realização dos cálculos do sinal de micro-ondas detectado.

A) Caso A: transmissão 16-QAM em “small signal”

Antes da apresentação dos efeitos da não-linearidade do DD-MZM e da dispersão cromática sobre a constelação QAM, é importante que se ilustre o comportamento do sinal fundamental desde a saída do modulador até o final do enlace óptico em questão. Diante disso, a Fig. 7 mostra a propagação do harmônico fundamental por uma fibra óptica modulado com índices de 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9. Durante a propagação pela fibra, observa-se que os sinais sofrem um desvanecimento, apresentando um ponto de nulo (*fading* convencional), conforme (19) e segundo sinaliza a letra “E” na Fig. 7. Além disso, verifica-se que os sinais não se entrelaçam, realizando uma “descompressão” (distanciam-se entre si) entre 20 e 30 km de propagação (vide letra “F” na Fig. 7) em relação às suas posições na saída do modulador, voltando a se “comprimir” até se anularem em 40 km de enlace no ponto de *fading* convencional. A referida “descompressão” é provocada pelo efeito da dispersão cromática imposta pelo canal óptico e se constitui num excelente benefício para minimizar o efeito da não-linearidade provocada pelo DD-MZM, o qual realiza uma distorção do sinal fundamental em sua saída à medida que se eleva o índice de modulação. Cabe ressaltar que o *fading* apresenta um comportamento periódico e, por isso, em outros pontos do enlace o sinal pode apresentar situação idêntica ao relatado entre 20 e 30 km, conforme mostra a letra “G” na Fig. 7. Adicionalmente, uma maior distância de propagação não significa necessariamente um maior efeito de dispersão cromática, tendo em vista a referida periodicidade, além disso, com objetivo de se representar apenas o efeito do *fading* e da não-linearidade do modulador, não foi considerado a atenuação da fibra óptica.

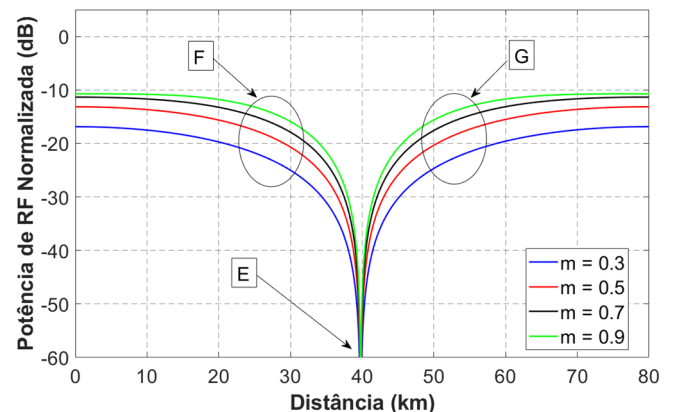


Fig. 7 Comportamento do fundamental em 10 GHz durante a propagação numa fibra óptica para índices de modulação iguais a 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9.

A Fig. 8 mostra os mapas de uma constelação 16-QAM na saída do modulador (a) e após uma propagação em 30 km de fibra óptica (b), onde os círculos azuis representam a constelação transmitida e as estrelas vermelhas representam a constelação recebida. Para execução da simulação, os símbolos mais externos da constelação, letra H na Fig. 8, foram modulados com um índice igual a 0,9, enquanto os símbolos interiores, letra I na Fig. 8, foram modulados com um índice

igual a 0,3. Com o intuito de ilustrar o efeito da distorção da constelação (“descompressão”) provocada pela dispersão cromática, realizou-se uma normalização em relação aos símbolos dos extremos da constelação, ou seja, os símbolos que foram modulados com índice igual a 0,9. Dessa forma, mostrou-se apenas o distanciamento relativo entre os símbolos, pois em condições normais de propagação, tanto os símbolos dos extremos quanto os símbolos internos da constelação sofreriam atenuação, conforme pode ser visto na Fig. 9, onde não houve normalização entre os símbolos e a qual ilustra as constelações após uma propagação por 15 km (a) e 30 km (b) de fibra óptica. Portanto, observa-se no gráfico (a) da Fig. 9 uma suave mudança de posição dos símbolos recebidos, enquanto no gráfico (b) da mesma figura, os símbolos apresentam uma mudança de posição mais pronunciada. Isto se deve ao efeito da dispersão cromática que se mostra mais evidente após a distância percorrida ilustrada no gráfico (b) e que pode ser ratificado na Fig. 7 que mostra o comportamento do sinal ao longo do enlace.

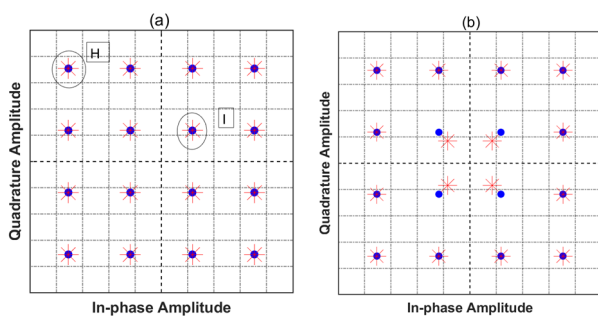


Fig. 8. Constelações transmitidas e recebidas: (a) na saída do modulador; e (b) após uma propagação em 30 km de SMF. Os círculos azuis são os símbolos transmitidos e as estrelas vermelhas são os símbolos recebidos (Frequência de RF em 10 GHz, símbolos externos modulados com índice igual a 0,9, símbolos interiores modulados com índice igual a 0,3 e normalização realizada em relação aos símbolos mais externos).

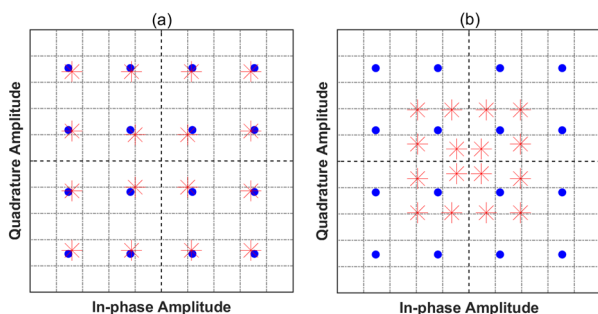


Fig. 9. Constelações transmitidas e recebidas: (a) após uma propagação em 15 km de SMF; e (b) após uma propagação em 30 km de SMF. Os círculos azuis são os símbolos transmitidos e as estrelas vermelhas são os símbolos recebidos (Frequência de RF em 10 GHz, símbolos mais externos modulados com índice igual a 0,9, símbolos interiores modulados com índice igual a 0,3, sendo que não houve normalização entre os símbolos).

B) Caso B: transmissão 16-QAM em “large signal”

Assim como foi feito para o caso anterior (*small signal*), antes da apresentação dos efeitos da não-linearidade do DD-MZM e da dispersão cromática sobre a constelação QAM, é necessário que se ilustre o comportamento do sinal fundamental desde a saída do modulador até o final do enlace óptico. Dessa forma, a Fig. 10 mostra a propagação do harmônico fundamental em 10 GHz por uma fibra óptica modulado com índices de 0,7, 1,0, 1,5 e 2,0. Durante a propagação pela fibra, observa-se que os sinais sofrem um desvanecimento, apresentando um ponto de nulo independente do índice de modulação, conforme (19), a exceção do sinal modulado com índice igual a 2,0, que apresenta um ponto de nulo pouco antes de 10 km de propagação (letra “J” da Fig. 10).

Diferentemente do caso para baixos índices de modulação, verifica-se a existência de um entrelaçamento entre os sinais à medida que os mesmos se propagam pelo enlace. Tal efeito, é decorrente da não-linearidade do modulador e surge como consequência de sua resposta ao aumento do índice de modulação, conforme [14]. Também, observa-se que mesmo ocorrendo o entrelaçamento entre os sinais, o efeito da dispersão cromática permite que haja um rearranjo dos mesmos após uma propagação de cerca de 30 km pela fibra óptica, realizando uma separação entre eles de maneira a viabilizar um processo de recepção sem ISI (*intersymbol interference*), vide letra “K” na Fig. 10. Além disso, a dispersão cromática corrige o efeito da não-linearidade gerada pelo DD-MZM, o qual tinha provocado uma “mistura” nos sinais modulados, conforme pode ser visto na letra “L” na mesma figura.

Agora, para ilustrar esses efeitos na constelação, a Fig. 11 mostra os mapas em 16-QAM após uma propagação em 5 km (a) e 30 km (b) de fibra óptica, onde os círculos azuis representam a constelação transmitida e as estrelas vermelhas representam a constelação recebida. No gráfico (a) da Fig. 11, salienta-se que os símbolos mais externos da constelação foram modulados com índice igual a 0,7 (letra “M” da Fig. 11), enquanto os símbolos interiores foram modulados com índice igual a 2,0 (letra “N” da Fig. 11). Essa inversão ocorre pela resposta não-linear do modulador, a qual foi intensificada pela utilização de índices de modulação elevados, como pode se observar no gráfico da Fig. 10. Entretanto, após a propagação pela fibra, o efeito da dispersão cromática realiza um rearranjo dos sinais, permitindo a correção da posição dos símbolos da constelação como ilustrado pelo gráfico (b) da Fig. 11 e também na letra “K” na Fig. 10.

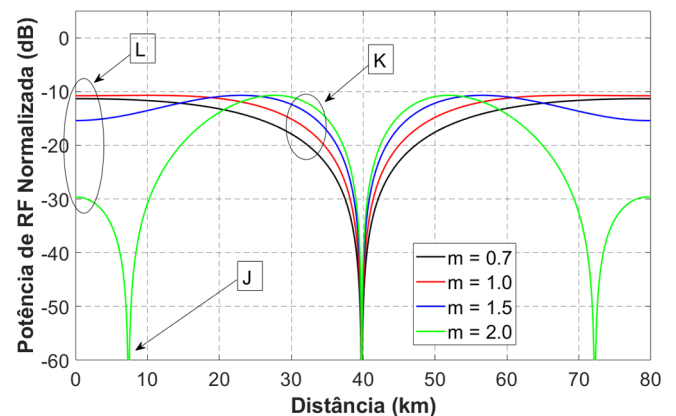


Fig. 10. Comportamento do fundamental devido a dispersão cromática para índices de modulação iguais a 0,1, 0,5 e 1,0; e frequência de RF em 10 GHz.

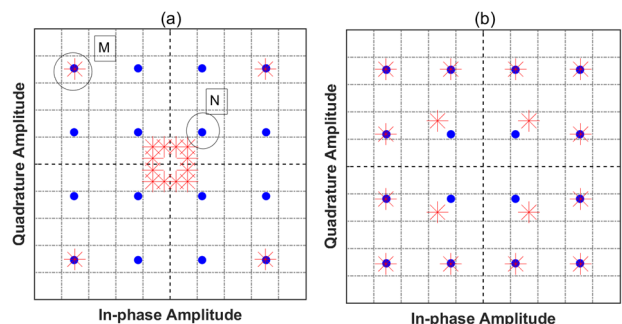


Fig. 11. Constelações transmitidas e recebidas: (a) após uma propagação em 5 km de SMF; e (b) após uma propagação em 30 km de SMF. Os círculos azuis são os símbolos transmitidos e as estrelas vermelhas são os símbolos recebidos (Frequência de RF em 10 GHz, no gráfico (a) os símbolos mais externos foram modulados com índice igual a 0,7, e os símbolos interiores foram modulados com índice igual a 2,0, enquanto no gráfico (b) os símbolos mais externos foram modulados com índice igual a 2,0, e os símbolos interiores foram modulados com índice igual a 0,7; e normalização realizada em relação aos símbolos mais externos).

Em relação a Fig. 11, com o intuito de ilustrar o efeito do rearranjo da constelação provocado pela dispersão cromática, realizou-se uma normalização em relação aos símbolos mais externos em cada gráfico, ou seja, no gráfico (a), os símbolos mais externos foram modulados com índice igual a 0,7 e no gráfico (b), os símbolos mais externos foram modulados com índice igual a 2,0, isto ocorreu devido a inversão de posição dos símbolos da constelação após a propagação de 30 km no enlace. Assim, verifica-se que, com o efeito da dispersão cromática, é possível corrigir os efeitos da não-linearidade do DD-MZM também para elevados índices de modulação. Adicionalmente, é importante salientar que os efeitos da não-linearidade do modulador se propagam de forma cíclica, fazendo com que a distorção da constelação se repita assim como o rearranjo da constelação ocorra em outros pontos do enlace.

IV. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi apresentado uma análise de como compensar os efeitos da não-linearidade do DD-MZM por intermédio do efeito da dispersão cromática em enlaces IM/DD. A abordagem analítica apresentou isoladamente a resposta não-linear do modulador em função do índice de modulação, ilustrando a existência de pontos de nulo para índices de modulação a partir de 1,92 antes da propagação pelo canal óptico dispersivo. Após isso, foi adicionado o efeito da dispersão cromática o qual inseriu o ponto de *fading* convencional além de agir compensando o efeito da não-linearidade do modulador no que tange as transmissões que utilizam constelações QAM. Diante do comportamento periódico da dispersão cromática, observa-se que, por intermédio de uma criteriosa seleção de frequência para o sinal fundamental, é possível realizar a recepção dos símbolos de constelações QAM conforme os mesmos foram posicionados por ocasião da geração da constelação, ou seja, os símbolos gerados mais externamente serão recebidos como símbolos mais externos e os símbolos interiores serão recebidos como símbolos interiores.

Portanto, assim como as pesquisas teóricas e experimentais de [12] e [13] demonstraram que à medida que o índice de modulação cresce há distorção dos formatos de modulação, as mesmas considerações são adequadamente previstas pelo modelo apresentado. Assim, os resultados experimentais de [13] justificam a importância do estudo em questão.

REFERÊNCIAS

- [1] P. J. Winzer, "Optical Fiber Networks," Opt. Photonics News, no. March, pp. 465–469, 2015.
- [2] S. Duraikannan, S. B. B. A. Anas, B. M. Ali, Z. B. Zan, and V. Thiruchelvam, "Cascaded Dual Drive MZM and Dual Parallel MZM Architecture for Optical Linearization of MZM Nonlinearity," 2018 IEEE 7th Int. Conf. Photonics, ICP 2018, 2018, doi: 10.1109/ICP.2018.8533182.
- [3] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communications Systems, 3rd ed., vol. 6. Rochester, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [4] A. Alves et al., "Effect of Fiber Optic Chromatic Dispersion on the Performance of Analog Optical Link with External Modulation Aiming at Aerospace Applications," vol. 5, pp. 205–216, 2013, doi: 10.5028/jatm.v5i2.201.
- [5] R. W. Ridgway, C. L. Dohrman, and J. A. Conway, "Microwave photonics programs at DARPA," J. Light. Technol., vol. 32, no. 20, pp. 3428–3439, 2014, doi: 10.1109/JLT.2014.2326395.
- [6] "EBcloud, desafios e aprendizagem na construção da nuvem privada do Exército Brasileiro, 2015". Disponível em: <http://docplayer.com.br/3627264-Ebcloud-desafios-e-aprendizagem-na-construcao-da-nuvem-privada-do-exercito-brasileiro.html>. Acessado em: maio 2021.
- [7] J. F. Diehl and V. J. Urick, "Chromatic dispersion induced second-order distortion in long-haul photonic links," J. Light. Technol., vol. 34, no. 20, pp. 4646–4651, 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2552080.
- [8] M. Abramowitz and I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 10th ed: Wiley, 1972.
- [9] R. H. De Souza, O. L. Coutinho, J. E. B. Oliveira, A. A. Ferreira, and J. A. J. Ribeiro, "An analytical solution for fiber optic links with photonic-assisted millimeter wave upconversion due to MZM nonlinearities," J. Microwaves, Optoelectron. Electromagn. Appl., vol. 16, no. 1, pp. 237–258, 2017, doi: 10.1590/2179-10742017v16i1885.
- [10] A. Alves et al., "Effect of fiber optic chromatic dispersion on the performance of analog optical link with external modulation aiming at aerospace applications," vol. 5, pp. 205–216, 2013, doi: 10.5028/jatm.v5i2.201.
- [11] S. Haykin and M. Moher, Communication Systems, 5th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [12] J. Maeda, T. Katoh, and S. Ebisawa, "Effect of fiber dispersion on subcarrier QAM signal in radio-over-fiber transmission," J. Light. Technol., vol. 30, no. 16, pp. 2625–2632, 2012, doi: 10.1109/JLT.2012.2205218.
- [13] J. Maeda, K. Kimura, and S. Ebisawa, "Experimental study on variation of signal amplitude in radio-over-fiber transmission induced by harmonics of modulation sidebands through fiber dispersion," J. Light. Technol., vol. 32, no. 20, pp. 3536–3544, 2014, doi: 10.1109/JLT.2014.2330612.
- [14] L. C. S. Barbosa and J. E. B. Oliveira, "New analysis of power fading in IM/DD fiber optic link using standard dual drive Mach-Zehnder modulator," 2021, p. unpublished.
- [15] J. L. Corral, J. Marti, and J. M. Fuster, "General Expressions for IM / DD Dispersive Analog Optical Links With External Modulation or Optical Up-Conversion in a Mach – Zehnder Electrooptical Modulator," vol. 49, no. 10, pp. 1968–1976, 2001.
- [16] L. Cheng, S. Aditya, and A. Nirmalathas, "An exact analytical model for dispersive transmission in microwave fiber-optic links using Mach-Zehnder external modulator," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 17, no. 7, pp. 1525–1527, 2005, doi: 10.1109/LPT.2005.848563.
- [17] A. Hilt, N. M. Networks, E. Udvary, and T. Berceci, "Harmonic distortion in dispersive fiber-optical transmission of microwave signals," no. June 2014, 2003, doi: 10.1109/MWP.2003.1422850.