

RECEPÇÃO E DISTRIBUIÇÃO REMOTA EM BANDA LARGA DE SINAIS RADAR MULTICANAL EM REDES DE FIBRA ÓPTICA

Remote transmission and distribution of multichannel broadband radar signals in fiber optic networks

Felipe Araújo Marins¹ , André Paim Gonçalves² , Marcos Chi Lim Siu³ 

Resumo: Este artigo aborda uma proposta de substituição de cabos coaxiais de rádio frequência (RF) em mastro de navios e submarinos, visando à recepção e distribuição em banda larga de sinais de radar em fibras ópticas. O tamanho do enlace pode variar de algumas dezenas de metros a dezenas de quilômetros. Usualmente, uma Unidade de Antenas (UA) típica de um receptor de Medidas de Apoio a Guerra Eletrônica (MAGE) é composta por um arranjo de 4 a 8 antenas. A proposta consiste em interligar cada uma dessas antenas à Unidade de Recepção e Processamento (URP), a uma distância superior a 30 m e com uma banda de 2 a 18 GHz. Algumas figuras de mérito devem ser consideradas para demonstrar que o enlace em fibra óptica se apresenta como uma solução mais viável do que o enlace que emprega cabos coaxiais. Dessa forma, foram selecionadas as seguintes métricas: ganho de potência do sinal de rádio frequência (G_{RF}), distorção e faixa dinâmica. Neste estudo, o enlace é apresentado por meio de breves abordagens teórica e experimental, com considerações a respeito da influência da não linearidade e da dispersão cromática. Essa modelagem permite verificar o efeito da dispersão da fibra óptica no sinal de RF, bem como avaliar o comportamento do G_{RF} . A implementação desse enlace em bancada permitiu confirmar tal comportamento espectral do sinal radar, a estabilidade do ganho e seu potencial emprego futuro para recepção em banda larga de sinais radar.

Palavras-chave: MAGE. Enlace analógico à fibra óptica. Sinais radar.

Abstract: This article addresses a proposal to replace radio frequency (RF) coaxial cables on ship and submarine masts for the reception and distribution of broadband radar signals over optical fibers. The link length can vary from a few tens of meters to tens of kilometers. A typical Antenna Unit (AU) of an Electronic Warfare Support Measures (EWS) receiver consists of an array of four to eight antennas. The proposal is to interconnect each of these antennas to the Receiving and Processing Unit (RPU) at a distance greater than 30 m and with a bandwidth of 2 to 18 GHz. Some figures of merit must be considered to demonstrate that the fiber-optic link is a more viable solution than a link using coaxial cable. The metrics chosen were radio frequency power gain (GRF), distortion, and dynamic range. This link is presented through a brief theoretical and experimental approach. To this end, this study considered the influence of nonlinearity and chromatic dispersion. This modeling allows verification of the effect of fiber-optic dispersion on the RF signal, as well as the behavior of the GRF. Implementing this link on the bench allowed confirmation of the spectral behavior of the radar signal, the gain stability, and its potential future use in broadband radars.

Keywords: EWS. Analog fiber-optic link. Radar signals.

1. Capitão de Corveta. Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense. Assistente do Grupo de Guerra Eletrônica do Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: felipe.marins@marinha.mil.br

2. Capitão de Mar e Guerra (RMI). Doutor em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Pesquisador da Divisão de Eletromagnetismo Aplicado, Grupo de Guerra Eletrônica, Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: andregg43@gmail.com

3. Capitão de Fragata (EN). Mestre em Engenharia Elétrica pela Escola de Pós-Graduação da Marinha. Encarregado do Grupo de Guerra Eletrônica do Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: marcos.siu@marinha.mil.br

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, observa-se uma busca por formas de transmissão de sinais de rádio frequência (RF) que apresentem capacidade de transmissão com grande largura de banda, dimensões e peso reduzidos, e baixa perda de energia na propagação. Em razão dessas características, um ramo da RF Fotônica conhecido como *Antenna Remoting* vem contribuindo no desenvolvimento dessas novas tecnologias (SERAFINO *et al.*, 2020). Enlaces que empregam fibra óptica são significativamente mais leves do que os tradicionais de RF; além disso, não sofrem interferência eletromagnética e são imunes a pulso eletromagnético. O fato de a fibra óptica não ser condutora e, portanto, não gerar arco voltagem ou faíscas torna-a uma opção interessante para barramentos que passam próximos ou através de tanques de combustível, sem risco de incêndio ou explosão (CAPMANY; NOVAK, 2007).

Nesse contexto, surgiu, nos anos 70, o termo *Microwave Photonics*, ao qual este trabalho fará referência como “RF em fotônica”. A área em questão constitui um ramo do conhecimento humano que vem demonstrando rápido crescimento, sendo usada para alicerçar o processamento, a transmissão e a geração de sinais de RF por meio de sistemas ópticos (CAPMANY; NOVAK, 2007).

Valendo-se da RF em fotônica, foi proposto um enlace para recepção e distribuição de sinais de um radar com diversos canais para suas respectivas antenas, conforme a Figura 1. Tal enlace deveria ter pelo menos 30 m de comprimento, baixa

atenuação do sinal de RF e ganho de potência de RF estável, isto é, ganho uniforme em toda a banda de transmissão. Diante de tais requisitos, empregou-se um enlace analógico à fibra óptica sem amplificação do sinal óptico.

Este artigo pretende realizar uma análise teórica e experimental da recepção e distribuição remota de sinais de radar por intermédio de múltiplos canais em redes de fibra óptica.

O artigo foi organizado em quatro seções. Na seção II, abordou-se uma breve análise do enlace, que faz uso da tecnologia óptica, considerando as condições limitantes para seu emprego e o comportamento do ganho de potência do sinal de RF do sistema com base em um modelo matemático. Na seção III, os resultados experimentais obtidos foram apresentados e comentados. Na seção IV, foram apresentadas as considerações finais do artigo.

Conforme se observa na Figura 1, esse enlace é composto por um diodo laser, moduladores eletro-ópticos de fase, cabos de fibra óptica monomodo padrão (SMF-28), divisores/combinadores de potência e fotodetectores (FD) do tipo PIN.

1.1. OBJETIVO

O alto custo do cabo de RF de banda larga, a necessidade de melhoria no desempenho e as restrições de espaço na UA nortearam a pesquisa, visando apontar alternativas para a solução desses desafios. Enlaces à fibra óptica vem se apresentando como possibilidades factíveis. Dessa forma, este artigo teve como objetivo investigar o funcionamento desse enlace por intermédio de um circuito óptico em fibra óptica.

1.2. METODOLOGIA

O trabalho pautou-se na compreensão do problema e em como a arquitetura poderia atender à sua solução. Diante disso, o tema foi abordado de forma conceitual, com modelagem matemática do funcionamento do enlace, visando identificar comportamentos e valores de métricas em função de parâmetros. A partir da compreensão do problema e de sua quantificação, procedeu-se à validação do modelo e à medição das métricas do enlace, com vistas à consolidação da solução do problema proposto.

2. ANÁLISE DO ENLACE ANALÓGICO À FIBRA ÓPTICA

A topologia proposta visa reduzir ao máximo a quantidade de componentes eletrônicos e fotônicos, devido à falta

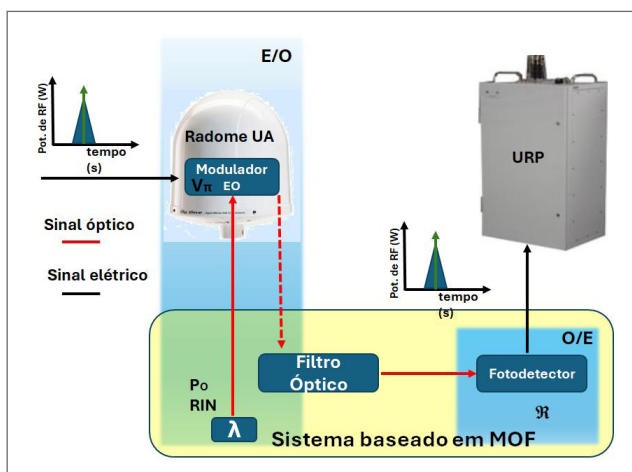


Figura 1. Representação conceitual do enlace de múltiplos canais de sinais de RF recebidos em cada antena da Unidade da Antena (UA) e transmitidos à Unidade Recepção e Processamento (URP) de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE), distante 30 m.

de espaço interno no radome que protege a UA. Quando o problema é pautado pela limitação de espaço, torna-se possível realizar uma abordagem que utilize somente conversores eletro-ópticos no interior da UA, visando deslocar o sinal de RF que chega a cada antena para a faixa óptica do sinal eletromagnético. Após a conversão de cada sinal para a faixa óptica, estes são enviados via fibra óptica, por 30 m, até a URP, onde são empregados conversores óptico-elétricos. Esses conversores deslocam o sinal óptico para a faixa de RF, recuperando-o com as características originais de frequência, fase e forma de onda. A função de conversão eletro-óptica é implementada por moduladores de eletro-óptico de fase, nos quais o sinal de RF que chega à antena modula a fase do sinal óptico.

A escolha do tipo de modulador eletro-óptico considerou a limitação de espaço interno do radome como critério principal. O tipo mais comum de moduladores eletro-ópticos (EO) é aquele baseado em interferômetro de Mach-Zehnder; entretanto, esse dispositivo apresenta deriva do ponto de operação em função de variações de temperatura. Diante do fenômeno de deriva do ponto de operação, o uso de um circuito compensador faz-se necessário, visando manter o modulador no ponto correto de funcionamento. O fato de haver a necessidade de um circuito de controle para cada modulador a ser utilizado em cada antena do arranjo da UA o torna inviável; sendo assim, a escolha natural recai sobre o modulador de fase (MF) (JEMISON; PAOLELLA, 2018).

2.1. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

O princípio de operação do enlace à fibra óptica é apresentado na Figura 2. O sinal óptico utilizado para a transmissão

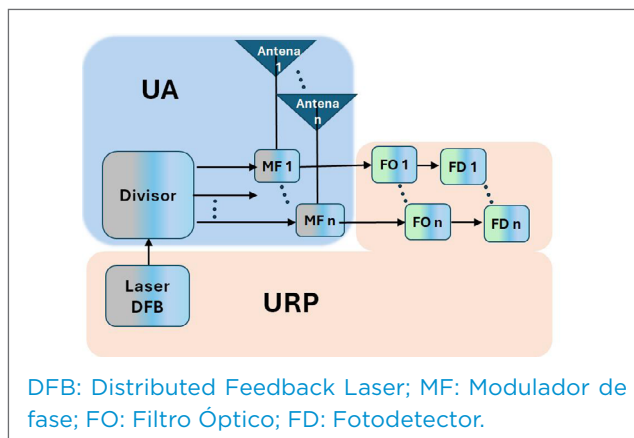


Figura 2. Diagrama esquemático do circuito óptico.

do sinal de RF é proveniente de um único laser de realimentação distribuída (*Distributed-Feedback* — DFB), localizado na URP. Por intermédio de um divisor de potência de sinal óptico, o sinal gerado pelo laser DFB alimenta a porta óptica de cada um dos moduladores de fase (MF), que estão conectados a cada antena do arranjo da UA por meio de sua porta de RF. O sinal óptico que passa pelo MF sofre modulação de fase pelo sinal de RF de interesse que chega pelas antenas. A porta de saída do MF é acoplada a um cabo de fibra óptica que possui, em sua outra extremidade, um filtro óptico (FO) que elimina uma das bandas laterais do sinal óptico modulado. Esse processo permitirá que um FD do tipo PIN, ligado à saída do FO, converta o sinal para a faixa de RF; isto é, converta a modulação e a detecção de fase em intensidade, permitindo a recuperação do sinal de RF original. A conversão do sinal ocorre devido ao fato de o FD ser quadrático e realizar o batimento da banda lateral remanescente com a portadora óptica proveniente do FO. O FO em consideração é uma grade de Bragg em fibra óptica (*Fiber Bragg Grating* — FBG) uniforme, com faixa de rejeição (*stopband*) próxima de uma função degrau, e um circulador para separar o sinal refletido do transmitido. O sinal refletido é aquele que será fotodetectado.

Há dois fenômenos importantes a serem considerados no funcionamento correto deste enlace. O primeiro é a sintonia do FO de RF composto pelo laser DFB, MF e pela grade de Bragg, na qual a frequência do sinal de ressonância da FBG, na qual a frequência do sinal de RF somado à frequência do sinal óptico deve ser diferente da faixa de frequência de rejeição da grade. O segundo fenômeno de interesse é o emprego da lei quadrática do FD para realizar o batimento das componentes espectrais, no qual ocorre a conversão do tipo de modulação do sinal, de fase para intensidade. Esse processo é amplamente descrito na literatura. A Figura 3 ilustra como essa sintonia é realizada.

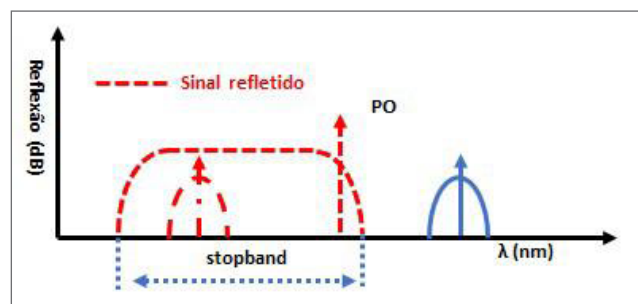


Figura 3. Diagrama esquemático da sintonia da portadora óptica na grade de Bragg com o comportamento de filtro óptico ideal.

2.2. MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DO RECEPTOR TOTALMENTE FOTÔNICO DE ENVOLTÓRIA

Um sinal óptico gerado por um diodo *laser*, com campo elétrico igual a Equação 1:

$$\vec{E}(t)_O = E_O e^{j(\omega_O t + \varphi_i)} \hat{x} \quad (1)$$

a amplitude do campo elétrico do sinal proveniente do diodo laser é E_O , sua frequência angular é ω_O , o tempo é t e a fase é φ_i , incidindo em um MF. Visando facilitar a análise do campo $\vec{E}(t)_O$, considera-se a fase $\varphi_i = 0$ e sua orientação coincidente com a do cristal de LiNO_3 do MF.

Considerando um sinal elétrico de RF incidindo na entrada de RF de um MF, sua tensão é definida como Equação 2:

$$\vec{V}(t)_{RF} = V \cos(\omega_{RF} t) \hat{x} \quad (2)$$

A amplitude da tensão de RF incidente é V , sua frequência angular é ω_{RF} e o tempo é t . O campo elétrico é considerado orientado no eixo x, coincidente com a orientação do cristal de LiNO_3 do MF.

No MF, o sinal óptico sofre uma alteração de fase na forma (Equação 3):

$$\vec{E}(t)_O = [E_O e^{j(\omega_O t + j m \cos(\omega_{RF} t))}] \hat{x} \quad (3)$$

O índice de modulação m é definido como Equação 4:

$$m = \frac{V}{V_\pi} \pi \quad (4)$$

Onde:

V_π : a tensão de meia-onda do MF.

Considerando uma condição especial de operação do modulador, denominada regime de operação de pequenos sinais, em que $m \ll 1$, a Equação 3 pode ser matematicamente reescrita de forma simplificada em função das séries de Bessel (HALEMANE; KOROTKY, 1990). Dessa forma, o sinal de saída do modulador no regime de operação de pequenos sinais, pode ser expresso por Equação 5:

$$\vec{E}(t)_M \cong \left[E_O J_0(m) e^{j(\omega_O t)} + E_O J_1(m) e^{j[(\omega_O + \omega_{RF})t + \frac{\pi}{2}]} + E_O J_1(m) e^{j[(\omega_O - \omega_{RF})t - \frac{\pi}{2}]} \right] \hat{x} \quad (5)$$

As funções de Bessel de primeira espécie e ordem 0 e 1 são, respectivamente, $J_0(m)$ e $J_1(m)$.

O sinal óptico na saída do MF apresenta bandas laterais iguais em amplitude e simétricas em fase, o que ocasiona um sinal *Direct Current* (DC) na saída do FD caso as componentes espectrais não sofram mudanças de fase ou amplitude. Esse sinal de saída do MF é então acoplado a uma FBG, conforme ilustrado na Figura 2, e sintonizado no ponto de operação da grade indicado na Figura 3, após passar pelo divisor de potência óptica.

O conjunto laser DFB, MF e FBG empregada no ponto de operação da Figura 3 comporta-se como um FO de RF com uma rampa de refletividade que parte da transmissão total e termina no início da região de reflexão máxima do sinal óptico (IVO *et al.*, 2017). Essa rampa não é desejável para essa aplicação; idealmente, a resposta da grade deveria apresentar o comportamento de uma função degrau ideal. Contudo, a operação nessa região ainda permite um desbalanceamento em amplitude e fase das bandas laterais do sinal proveniente do MF, originando a conversão da modulação em fase em intensidade.

Quando o sinal óptico se propaga na FBG, a portadora e uma de suas parcelas transmitidas, quando posicionadas no ponto de inflexão da curva de refletividade da grade de Bragg conforme a Figura 3, enquanto a outra parcela é refletida. A parcela transmitida pela FBG é acoplada ao FD. É importante observar que a FBG é projetada para possuir um alto coeficiente de refletividade óptica, praticamente constante para frequências de RF na região de rejeição, conhecida como *stopband*.

A sintonia do FO formado pela FBG foi realizada com base no ajuste da temperatura da cavidade ressonante do diodo *laser* DFB, de modo que ω_O assumia valor suficiente para que, somado pelo sinal de RF, ω_{RF} , situe-se na faixa espectral de transmissão da grade, conforme ilustrado na Figura 3. Essa sintonia faz com que apenas a banda lateral superior e a portadora óptica do sinal incida no FD. O sinal expresso pela Equação (6) depende diretamente da resposta em frequência dos parâmetros de transmissividade, $T(\omega)$, e de fase, $\varphi(\omega)$, da FBG. O parâmetro $\sqrt{\alpha}$ representa o fator de proporcionalidade ocasionado pela divisão de potência óptica (Equação 6).

$$\vec{E}(t)_T \cong \left[\sqrt{\alpha} E_O \left(T(\omega_O) J_0(m) e^{j(\omega_O t + \varphi(\omega_O))} + T(\omega_O + \omega_{RF}) J_1(m) e^{j((\omega_O + \omega_{RF})t + \frac{\pi}{2} + \varphi(\omega_O + \omega_{RF}))} \right) \right] \hat{x} \quad (6)$$

Considerando a FBG como um filtro ideal com resposta equivalente a uma função degrau, os termos $T(\omega_o + \omega_{RF}) \cong T(\omega_o) \cong T$ e $\varphi(\omega_o) \cong \varphi(\omega_o + \omega_{RF}) \cong \varphi$. Como o FD é sensível à intensidade do sinal óptico incidente, torna-se necessário calcular o valor do vetor de *Poynting*, sabendo-se que o campo magnético é (Equação 7):

$$\vec{H}(t)_T \cong \frac{\left[\sqrt{\alpha T E_0} \left(J_0(m) e^{j(\omega_o t + \varphi)} + J_1(m) e^{j(\omega_o + \omega_{RF}) t + \frac{\pi}{2} + \varphi} \right) \right]}{\eta} \hat{y} \quad (7)$$

onde η é a impedância intrínseca do material. O vetor de *Poynting* é dado por Equação 8:

$$\vec{S}(t) = \vec{E}(t)_T \times \vec{H}(t)_T \quad (8)$$

Empregando Equações 6 e 7 em 8, obtém-se Equação 9:

$$\vec{S}(t) = \frac{\left[\alpha T^2 E_0^2 \left(J_0^2(m) + J_1^2(m) + J_0(m) J_1(m) \left(e^{-j(\omega_{RF} t + \frac{\pi}{2})} + e^{j(\omega_{RF} t + \frac{\pi}{2})} \right) \right) \right]}{\eta} \hat{z} \quad (9)$$

Sabendo-se que, em Equação 9, a soma de exponenciais corresponde à relação trigonométrica $2\cos(A) = e^{-j(A)} + e^{j(A)}$ e que $\cos\left(\omega_{RF} t + \frac{\pi}{2}\right) = \text{sen}(\omega_{RF} t)$ (Equação 10)

$$\vec{S}(t) = \frac{\alpha T^2 E_0^2 \left[\left(J_0^2(m) + J_1^2(m) \right) + 2J_0(m) J_1(m) \text{sen}(\omega_{RF} t) \right]}{\eta} \hat{z} \quad (10)$$

A corrente elétrica $i(t)$ na saída do FD, na frequência de banda base, é calculada pela multiplicação de (10) pela área do FD, A , e pela responsividade do FD, R (Equação 11)

$$i(t) = AR\alpha T^2 E_0^2 \frac{\left[\left(J_0^2(m) + J_1^2(m) \right) + 2J_0(m) J_1(m) \text{sen}(\omega_{RF} t) \right]}{\eta} \quad (11)$$

O ganho do enlace do sinal de RF é obtido pela divisão da potência de RF de saída pela potência de entrada (Equação 12):

$$G = \frac{i^2 R}{P_{RF}} = \frac{2R^2 \alpha^2 T^4 P_0^2 \pi^2 R^2}{V_\pi^2} \quad (12)$$

Onde:

P_0 : a potência média do sinal óptico, dada por $P_0 = A E_0^2 / 2\eta$;
 P_{RF} : a potência média do sinal RF na entrada do MF, dada por $P_{RF} = V^2 / R$, onde R representa a impedância de saída do FD.

Essa impedância é considerada casada, assumindo comportamento resistivo. Como o modulador foi proposto operando no regime de pequenos sinais, $J_0(\pi V / V_\pi) \cong 1$ e $J_1(\pi V / V_\pi) \cong \pi V / V_\pi$

Aplicando os dados contidos na Tabela 1 em Equação 12, é possível observar, na Figura 4, o comportamento do ganho do sinal de RF previsto com a distância variando de 0 a 50 m e, na Figura 5, o ganho variando em função da frequência do sinal de 300 MHz a 20 GHz.

Observando o resultado na Figura 4, percebe-se que o ganho de potência do sinal de RF apresenta uma variação controlada pela potência do sinal óptico do *laser* DFB. Esse fato pode compensar a potência do sinal de RF na saída do circuito óptico. Na Figura 5, observa-se o sinal estável em termos de valores ganho do enlace para uma potência do *laser* selecionada; neste caso, a potência escolhida foi de 10 dBm.

Observando o resultado apresentado pela Figura 6, no qual de analisa a variação do ganho de RF (G_{RF}) em relação ao valor

Tabela 1. Valores previstos para os cálculos de ganho de rádio frequência.

PARÂMETRO	VALOR
Comprimento de onda da portadora óptica	1.551,5 nm
Impedância da carga de RF	50 Ω
Potência do sinal de RF aplicada ao MF	0,3 dBm para mi = 0,1
Potência do Laser	100,0 mW
Tensão de meia-onda	10,0 V
Perda óptica total	9,0 dB
Dispersão cromática da fibra monomodo padrão @ 1,550 nm (Corning®, 2002)	17 ps/nm.km
Responsividade do fotodetector	0,9 mA/mW

RF: rádio frequência; MF: modulador de fase.

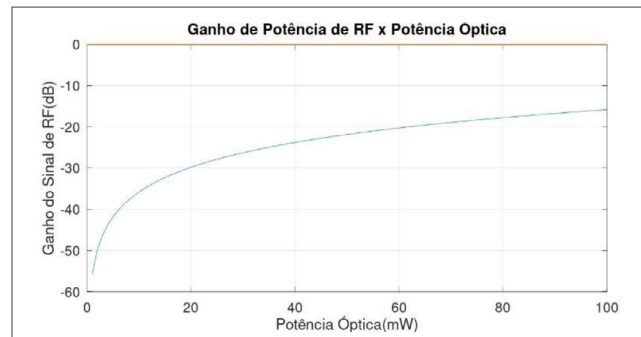


Figura 4. Comportamento do Ganho de Potência do sinal de Rádio Frequência sob a variação da potência do laser de realimentação distribuída.

estimado de referência em torno de -33 dB, a maior variação obtida foi de aproximadamente 0,002 dB. Conclui-se, portanto, que o comportamento é estável ao longo do intervalo de comprimento (0 a 50 m) e da frequência de RF (0,3 a 20 GHz).

3. EXPERIMENTOS REALIZADOS

O enlace foi implementado por componentes comerciais. Foram utilizados um laser DFB operando a 1.551,5 nm, um MF com tensão de meia-onda, $V_{\pi} = 10$ V, um divisor com duas saídas, 30 m de fibra óptica *Corning Glass* (SMF-28) com dispersão de 17 ps/nm.km e dois FDs para comprimentos de onda de 900 a 1.650 nm (banda de saída de RF até 5 GHz). As perdas ópticas medidas foram em torno de 12 dB. O arranjo de teste foi implementado conforme o diagrama esquemático apresentado na Figura 7.

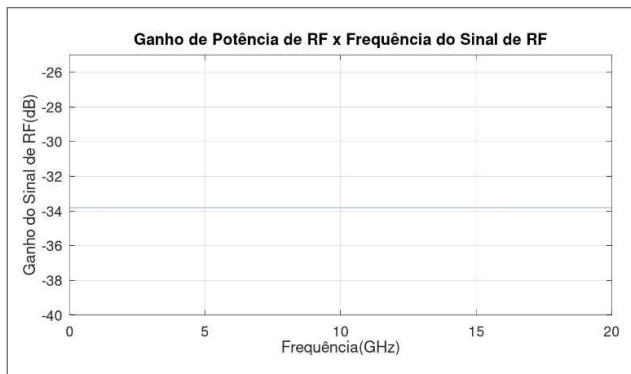


Figura 5. Comportamento do Ganho de Potência do sinal de Rádio Frequência sob a variação da frequência da portadora do sinal de Rádio Frequência.

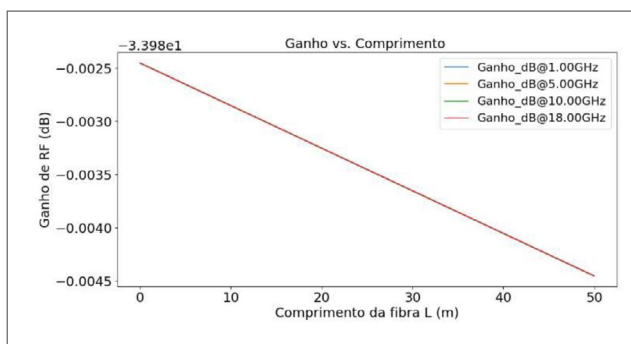


Figura 6. Comportamento do Ganho de Potência do sinal de Rádio Frequência sob a variação da frequência da portadora do sinal de Rádio Frequência.

Inicialmente, todos os componentes deste circuito óptico foram caracterizados experimentalmente, a fim de determinar os valores envolvidos em cada parâmetro do enlace. Ressalta-se que os valores dos parâmetros dos componentes ópticos utilizados no cálculo do valor teórico do ganho de RF foram praticamente os mesmos observados experimentalmente, com variação desprezível.

Após essa caracterização, para medir o ganho de potência do sinal de RF do enlace, um dos cabos de RF de entrada do sistema a ser caracterizado foi conectado à porta 1 do analisador de rede. O FD foi conectado à porta 2 do analisador de rede. Com esse procedimento, o parâmetro S21 da matriz de espalhamento de RF pôde ser calculado a partir do enlace de fibra óptica. O ganho de RF do sistema foi determinado a partir da comparação dos valores medidos nas portas 1e 2 do analisador de rede, representado como o parâmetro S21 de cada canal, descontando-se a perda representada pelo resultado medido do parâmetro S21 dos cabos de RF. Esse método de medida foi repetido para o outro canal. A Figura 8 mostra a comparação dos sinais medidos para uma das saídas de RF, sobrepondo os valores calculados pelo método numérico e os valores experimentais em uma variação de frequência de 300 MHz a 3 GHz. Essa medida ficou restrita ao equipamento disponível. Deve-se notar que o resultado medido na saída de RF foi

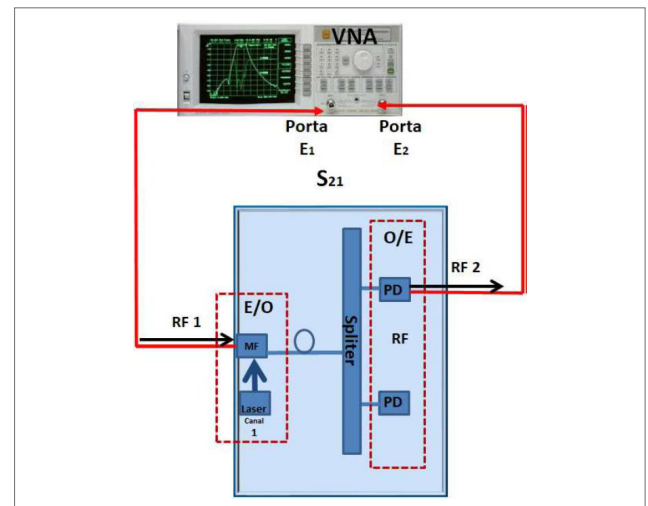


Figura 7. Arranjo experimental tratando o enlace como um dispositivo sob teste. O equipamento utilizado para medir o ganho do sinal de Radio Frequência pelo enlace foi o analisador de rede Agilent N5230C, que opera de 300 MHz a 3 GHz.

praticamente idêntico, considerando o equilíbrio do divisor de quase 50% em cada porta de saída.

Comparou-se o resultado obtido com aqueles existentes para enlaces de RF de banda larga, para a mesma faixa de frequência, empregando cabo coaxial de alto desempenho. Essa comparação é apresentada na Figura 9.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observando os resultados, pode-se constatar que o enlace de 30 m se comporta linearmente como se não houvesse restrição

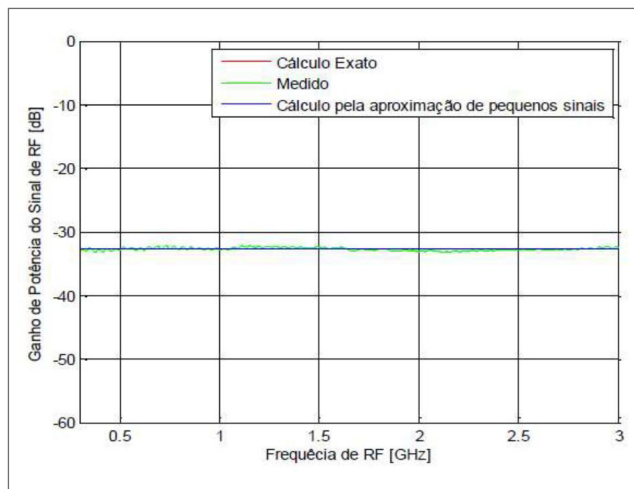


Figura 8. Resultado para um enlace de 30 m com laser operando em 10 mW e o valor estimado no modelo numérico para os mesmos parâmetros do enlace, considerando a faixa de frequência de 300 MHz a 3 GHz.

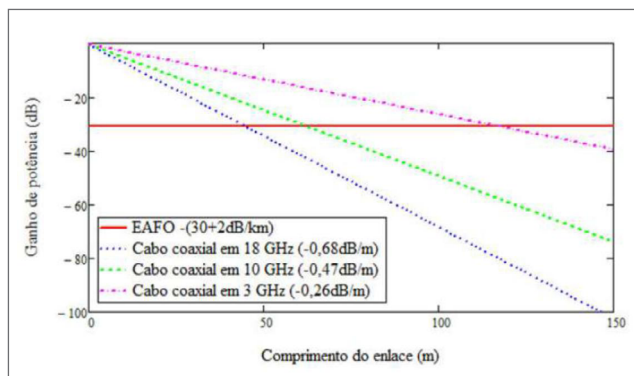


Figura 9. Comparativo de rendimento do enlace em fibra óptica com o cabo coaxial do modelo TestPro8, da Radiall Inc.

por dispersão cromática, descasamento de impedância e outros problemas não lineares, conforme a Figura 8. O mesmo não pode ser observado em enlaces de sinais de banda larga por cabos coaxiais. Pelas curvas observadas na Figura 9, os valores de GRF variam de forma bastante expressiva tanto em comprimento quanto em frequência. O ganho de potência de RF para o enlace à fibra óptica manteve-se aproximadamente estável em torno de -32 dB para a faixa de frequência de 0,3 a 3 GHz. Esse ganho estável mostra que esse canal permite grande largura de banda do sinal de RF. Os resultados obtidos pelo método de cálculo empregando a aproximação para pequenos sinais aderiram completamente à curva de GRF medida para o circuito óptico. Relembrando que o conceito da aproximação para pequenos sinais considera que, com o índice de modulação m próximo de 0,10, não há transferência de energia da componente fundamental para os harmônicos. Caso a potência do sinal de RF seja aumentada na entrada do circuito óptico, o MF suporta até a potência de ruptura em torno de 30 dBm; em toda essa variação de potência, o sinal sofrerá distorção por harmônicos e compressão de 1 dB no ganho de potência de RF. A sugestão é utilizar um limitador de potência entre as antenas e o MF para garantir uma potência suficiente, de modo que o índice de modulação m não ultrapasse 0,1. Com essa expressão matemática apresentada, só é possível prever com precisão o comportamento do ganho de potência do sinal de RF para pequenos sinais. Como o enlace é de apenas 30 m, podendo chegar a 50 m, não foram percebidos problema de descasamento de impedância ou dispersão cromática, conforme observado na literatura e na verificação experimental.

5. CONCLUSÕES

Conforme pode ser depreendido no trabalho, o enlace de sinais de RF de banda larga por intermédio de circuito óptico mostrou-se uma solução viável para resolver os desafios apresentados no desenvolvimento de sistemas de Guerra Eletrônica. O sinal de RF pode ser transmitido sem distorções, sem preocupação com casamento de impedância, podendo ter seu ganho regulado pela potência do laser DFB, sem alteração significativa de seu valor entre 0 a 50 m. A banda do sinal de RF fica condicionada somente à largura de banda permitida pelo MF e pelo FD. Contudo, o MF necessita de um limitador de potência entre a saída da antena e sua entrada.

REFERÊNCIAS

- CAPMANY, J.; NOVAK, D. Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photonics*, v. 1, p. 319-330, 2007. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.89>
- HALEMANE, T. R.; KOROTKY, S. K. Distortion characteristics of optical directional coupler modulators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 38, n. 5, p. 669-673, maio 1990. <https://doi.org/10.1109/22.54939>
- IVO, F. S.; BARONI, R. F.; COUTINHO, O. L. Filtro de RF fotônico sintonizável por variação de temperatura em *laser* DFB. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 2017. *Anais [...]*. 2017. p. 169-173. Disponível em: https://www.sige.ita.br/edicoes-anteriores/2017/st/ST_11_2.pdf. Acesso em: 10 mar. 2026.
- JEMISON, W. D.; PAOLELLA, A. C. Analog fiber-optic links. In: GOLIO, J.; GOLIO, M. (org.). *RF and microwave applications and systems*. Boca Raton: CRC Press, 2018. p. 160-190.
- SERAFINO, G.; MARESCA, S.; PORZI, C.; SCOTTI, F.; GHELFI, P.; BOGONI, A. Microwave photonics for remote sensing: from basic concepts to high-level functionalities. *Journal of Lightwave Technology*, v. 38, n. 19, p. 5339-5355, 1º out. 2020. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2989618>