

# Transmissão e Distribuição Remota de Sinais Radar Banda Larga Multicanal em Redes de Fibra Óptica por DWDM

André Paim Gonçalves, Olympio Lucchini Coutinho<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo** — Este artigo aborda a transmissão e distribuição de sinais de radar com banda larga em fibras ópticas com o emprego de Multiplexação por Divisão Densa de Comprimento de Onda (DWDM) para emissores radar remotamente localizado, 1 km, em relação a seu parque de antenas. Esse enlace analógico a fibra foi concebido para a transmissão de sinais radar na faixa de frequência de 0,3 a 3 GHz. Tal enlace é apresentado, por meio de uma breve abordagem teórica e experimental. Para isto este estudo fez considerações em relação à influência de não linearidade e dispersão cromática. Essa modelagem permite verificar com precisão o efeito da dispersão da fibra óptica no sinal de RF, bem como verificar o comportamento do ganho de potência do sinal de RF. A implementação de tal enlace em bancada permitiu confirmar tal comportamento espectral do sinal radar, a estabilidade do ganho e seu futuro emprego para radares de banda larga.

**Palavras-chaves** — DWDM, enlace analógico à fibra óptica, sinais radar.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos se observa uma busca por sistemas de RF, onde estes tenham uma grande largura de banda para transmissão de sinais, dimensões reduzidas e baixa dissipação de energia. Por conta dessas características, a Fotônica vem contribuindo no desenvolvimento dessas novas tecnologias. Circuitos fotônicos são significativamente mais leves do que os de RF, eles não sofrem interferência eletromagnética (IME) e são imunes a pulso eletromagnético (EMP). O fato de a fibra óptica não ser condutora e, portanto, não gerar arco voltaico ou faíscas se torna uma opção interessante para barramentos que passam próximos ou através de tanques de combustível, sem o risco de incêndio ou explosão [1].

Nesse contexto surgiu há alguns anos o termo *Microwave Photonics*, assim, este artigo fará referência a esse assunto com o nome de “RF em fotônica”. Este último é uma área, do conhecimento humano com rápido crescimento, usada para alicerçar o processamento, a transmissão e a geração de sinais de RF usando sistemas ópticos [1].

Valendo-se da RF em fotônica, foi proposto um enlace para transmissão de sinais de um radar com diversos canais para as suas respectivas antenas, conforme a Fig.1. Tal enlace deveria ter pelo menos 1 km de comprimento, baixa atenuação do sinal de RF e ter seu ganho de potência de RF estável, isto é, seu ganho ser uniforme para toda a banda de transmissão.

Diante de tais requisitos empregou-se um enlace analógico à fibra óptica com o uso de DWDM sem amplificação óptica.

Este artigo pretende fazer uma análise teórica e experimental da transmissão e distribuição remota de sinais radar multicanal em redes de fibra óptica por DWDM. Cabe ressaltar que DWDM é um acrônimo de *Dense Wavelength Division Multiplexing*, que significa em uma tradução livre: “multiplexação por divisão densa de comprimentos de onda”. Esta multiplexação é uma técnica de transmissão por fibra óptica que utiliza comprimentos de onda distintos da luz para a comunicação de dados [2].

O artigo foi organizado em quatro seções. Na seção II abordou-se uma breve análise do enlace, que faz uso da tecnologia DWDM, sobre as condições limitantes para o seu emprego e do comportamento de ganho de potência de sinal de RF do sistema com base em um modelo sem aproximações (emprega o Teorema de Adição de Graf). Na seção III os resultados experimentais obtidos foram apresentados e comentados. Na seção IV foram feitas as considerações finais do artigo.

Conforme se observa na Fig. 2, esse enlace é composto por diodos laser, circuitos casadores de impedância, moduladores eletro-ópticos de Mach-Zehnder, cabos de fibras ópticas mono modo padrão (SMF-28), multiplexadores/demultiplexadores do tipo AWG (*Arrayed Waveguide Grating*), fotodetectores do tipo p-i-n e unidades amplificadoras de RF (UA).

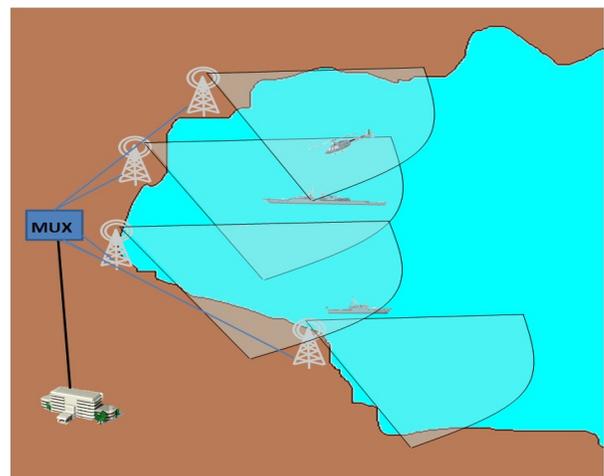


Fig. 1. Representação conceitual do enlace de sinais de RF remotamente transmitidos de um radar localizado (1 km) em relação aos conjuntos antenas/amplificadores [2].

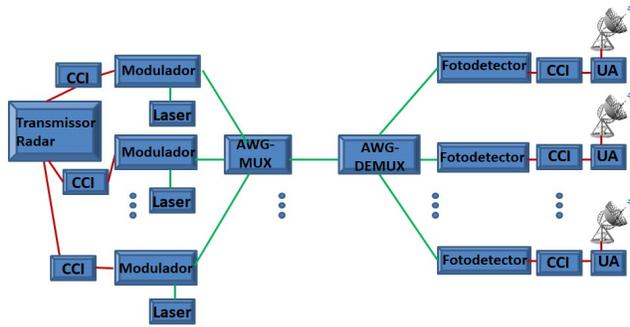


Fig. 2. Representação esquemática simplificada de um sistema de antena remotamente localizada de 1 km de distância do gerador radar. A linha verde significa enlace na faixa óptica do espectro e a vermelha na faixa de RF. CCI - Circuito de Casamento de Impedância [2].

## II. ANÁLISE DO ENLACE ANALÓGICO À FIBRA ÓPTICA DWDM

Pelo fato de serem utilizados moduladores de Mach-Zehnder (MMZ) nesse enlace, deve-se levar em conta sua resposta óptica senoidal quadrática, conforme observado na Fig.3. A análise de sua modulação é feita no ponto de quadratura e é escolhida uma abordagem para pequenos sinais ou uma abordagem para grandes sinais. A de pequenos sinais constitui em escolher índice de modulação, “m”, bem menor que um. Um valor postulado para “m”, neste trabalho, é em torno de 0,1, dependendo do nível de ruído. Quando o estudo é conduzido para valores muito pequenos de “m” implica em aproximações da série de funções de Bessel e quando é levada em conta uma modelagem para “m” maiores surge a necessidade de uma abordagem com série de funções de Bessel [2] e [3]. Neste artigo será empregada, para a análise do enlace, a figura de mérito relacionada com o ganho de potência do sinal de RF baseado no teorema de adição de Graf. Tal teorema permite fazer uma abordagem que engloba as duas abordagens anteriores, isto é, a de pequenos sinais e de grandes sinais.

A não linearidade do MMZ não advém do material, mas sim por intermédio da sua função característica senoidal quadrática, observada a esquerda na Fig. 3, o que ocasiona distorções por harmônicas das frequências dos sinais modulantes (sinais em RF) e produto de intermodulação, a direita na Fig. 3 [4].

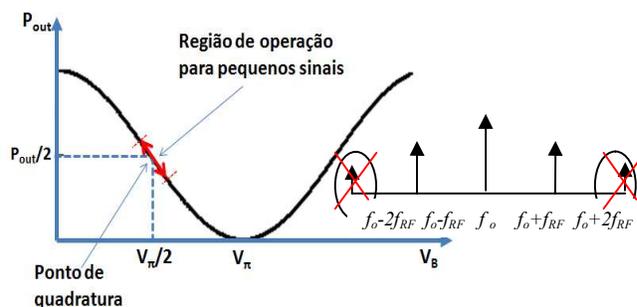


Fig. 3. Representação do comportamento da potência do sinal na saída do MMZ. À esquerda, o comportamento no domínio do tempo. À direita, o comportamento no domínio da frequência.  $f_{RF}$  é a frequência da portadora de RF e  $f_o$  é a frequência da portadora óptica.

Os sinais com frequências harmônicas pares podem ser desconsiderados desde que o MMZ-SD (modulador Mach-Zehnder *Single Drive*), esteja polarizado no ponto de

quadratura [4] e [5]. Quanto às distorções oriundas do produto de intermodulação, deve-se observar o limite de potência na entrada do modulador. Este limite é obtido por meio do teste de dois tons. Quando o modulador está polarizado no ponto de quadratura, o produto de intermodulação de terceira ordem se torna o mais importante.

Outro fenômeno importante é a dispersão. No enlace analisado, empregou-se a fibra óptica mono modo padrão (SMF-28), cuja dispersão cromática está presente. Contudo, devido ao seu comprimento ser de apenas 1 km e a faixa de RF a ser observada está definida entre 0,3 a 3 GHz, tal fenômeno não exercerá influência significativa, sendo confirmado pelo cálculo do ganho de potência de RF

Neste estudo não será abordada a influência do ruído no sinal de RF na saída do enlace.

A análise desse enlace deve levar em conta o problema da diafonia (*crosstalk*) pelo fato de empregar o DWDM. Essa diafonia pode ocorrer tanto no AWG demultiplexador (AWG-DEMUX) quanto na fibra óptica por conta dos seus efeitos não lineares.

Na fibra óptica, devido à multiplexação dos sinais do enlace, destacam-se os seguintes fenômenos: Automodulação de Fase (SPM), Modulação de Fase Cruzada (XPM), Mistura de Quatro Ondas (FWM), Espalhamento Brillouin (SBS) e Espalhamento Raman (SRS).

Para mitigar o efeito de tais fenômenos na fibra óptica, foi considerado o limite de potência do sinal das portadoras ópticas, a diferença mínima de comprimento de onda dessas portadoras e um valor mínimo de dispersão da fibra óptica [5] e [6].

O multiplexador/demultiplexador do tipo *Arrayed Waveguide Grating* (AWG), empregado neste estudo, segue a norma STM-4 da União Internacional de Telecomunicação (ITU), a qual preconiza espaçamentos entre canais de 12,5 a 200 GHz. O AWG em questão apresenta um espaçamento entre canais de 100 GHz. Com isto a eficiência de mistura para o efeito de XPM e FWM é próxima de zero e a interferência entre os canais fica desprezível quanto ao acoplamento entre canais ópticos adjacentes na fibra óptica [2].

Considerando o isolamento entre canais ópticos adjacentes em um multiplexador/demultiplexador do tipo AWG em torno de 30 dB, então esses são considerados como lineares [2] e como não havendo *crosstalk* entre canais ópticos adjacentes.

Diante de tais considerações e dentre as diversas figuras de mérito disponíveis para a verificação da qualidade do enlace, fez-se uso da análise do ganho de potência elétrica em [dB] que leva em conta todos esses fenômenos.

Para se determinar o comportamento do ganho de potência de RF no enlace DWDM deve-se partir da expressão do Ganho de Potência de RF [2] calculado com o auxílio do teorema de Graf dado por:

$$G = \frac{4\eta_D^2 \alpha_g^2 (P_o^{entrada})^2}{P_{RF} Z_L} J_1^2 \left( 2m_i \cos \left( \frac{1}{2} \theta_d \omega_{rf}^2 \right) \right) \quad (1)$$

A responsividade do fotodetector é representada por  $\eta_D$ ;  $\alpha_g$  é a representação de todas as perdas ópticas, tais como a perdas de inserção;  $P_o^{entrada}$  é a representação da potência óptica de entrada;  $P_{RF}$  é a potência do sinal de RF na entrada do sistema;  $J_1$  é a representação da função de Bessel de primeira espécie de ordem um;  $m_i$  é o índice de modulação de RF no modulador de Mach-Zehnder;  $\theta_d$  é o coeficiente de dispersão de primeira

ordem determinado na frequência angular da portadora óptica,  $\omega_o$ ;  $\omega_{rf}$  é a frequência angular do sinal de RF e  $Z_L$  é a impedância da carga. Note que em (1) a dispersão cromática é levada em conta de uma forma mais precisa do que a observada com a aproximação para pequenos sinais [2].

Aplicando os dados contidos na Tabela I em (1) é possível observar na Fig.4 o comportamento previsto do sinal variando de 300 MHz a 3 GHz.

TABELA I: VALORES PREVISTOS PARA OS CÁLCULOS DE GANHO DE RF

PARÂMETRO	VALOR
Comprimento de onda da portadora óptica	<b>1553,33 nm</b>
Impedância da fonte de RF	<b>50 <math>\Omega</math></b>
Impedância da carga de RF	<b>50 <math>\Omega</math></b>
Potência do sinal de RF aplicada ao MZM	<b>-4,68 dBm para <math>m_i=0,1</math> e 8 dBm para <math>m_i=1</math></b>
Potência do Laser	<b>10,69 mW</b>
Tensão de meia onda	<b>4,1 V</b>
Impedância de entrada MZM	<b>50 <math>\Omega</math></b>
Perda óptica total	<b>4,54 dB</b>
Dispersão cromática da fibra mono modo padrão @ 1,550 nm (Corning®, 2002)	<b>17 ps/nm·km</b>
Velocidade da luz no vácuo	<b><math>3 \times 10^8</math> m/s</b>
Responsividade do fotodetector	<b>0,97 mA/mW</b>

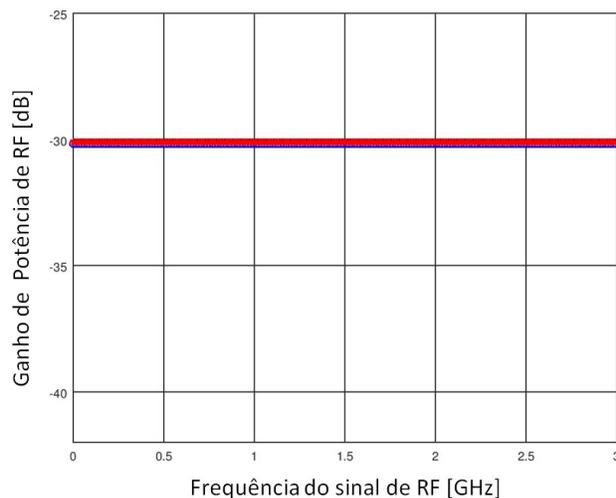


Fig.4. Comportamento do Ganho de Potência do sinal de RF sob influência da dispersão sem o uso do amplificador de RF na saída do fotodetector.

Observando o resultado na Fig. 4, percebe-se que o ganho de potência do sinal de RF se comporta de forma estável ao longo do intervalo de frequência de RF (0,3 a 3 GHz). Este comportamento permite inferir, por exemplo, que um sinal radar com banda de 2 GHz centrado em 1,5GHz não teria problema para ser transmitido nesse enlace.

### III. O EXPERIMENTO

O enlace foi implementado por componentes comerciais. Utilizaram-se dois lasers DFB que operam no canal 30@ 1553,33 nm e Canal 31 @ 1552,52 nm, dois moduladores MZ com tensão de meia onda,  $V_\pi = 4,1$  V @ 1GHz, dois AWG DWDM que operam nos Canais 29 a 32 (espaçamento entre canais ópticos 100 GHz), 1 km de fibra óptica *Corning Glass SMF-28* dispersão de 17 ps/nm·km, dois fotodetectores para comprimento de ondas de 900 a 1650 nm (banda de saída em RF >5 GHz) e amplificadores de RF (banda até 3 GHz, ganho mín. 33 dB). Esses componentes foram montados conforme as Fig. 5, 6 e 7.

Primeiramente, modelaram-se e caracterizaram-se experimentalmente todos os componentes deste sistema visando ter conhecimento dos valores envolvidos em cada parâmetro do enlace.

Após esta caracterização, visando medir o ganho de RF do enlace, conectou-se um dos cabos de RF de entrada do sistema a ser caracterizado à porta “1” do analisador de rede. Os fotodetectores foram conectados aos seus respectivos amplificadores. Os cabos de saída dos amplificadores foram conectados a um combinador de RF. A saída deste combinador foi conectada a um cabo de RF. A outra extremidade deste cabo foi conectada à porta “2”. Quando foram medidos os parâmetros “S” do sistema, colocou-se o conector da entrada de RF do canal 30 na porta “1” e casou-se a entrada de RF do canal 31 com uma carga de 50  $\Omega$ . O que podem ser observados nas Fig. 5 e 7.

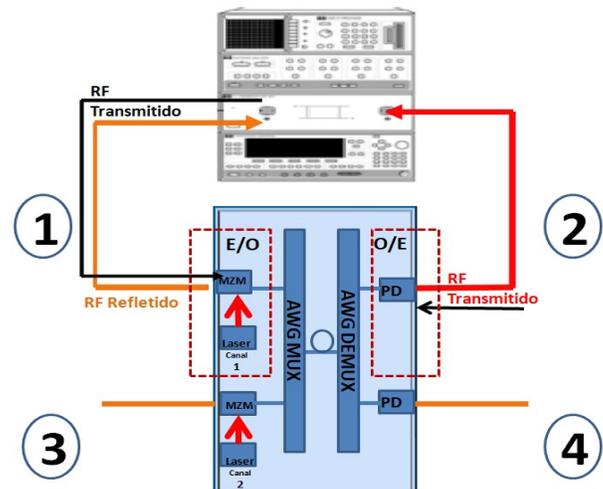


Fig.5. Esquema representativo da caracterização do enlace analógico a fibra óptica baseado na técnica DWDM quanto à frequência de RF e sua potência com analisador de rede. Os números circulos representam os pontos de entrada de RF (ímpares) e de saída de RF (pares) do circuito óptico.

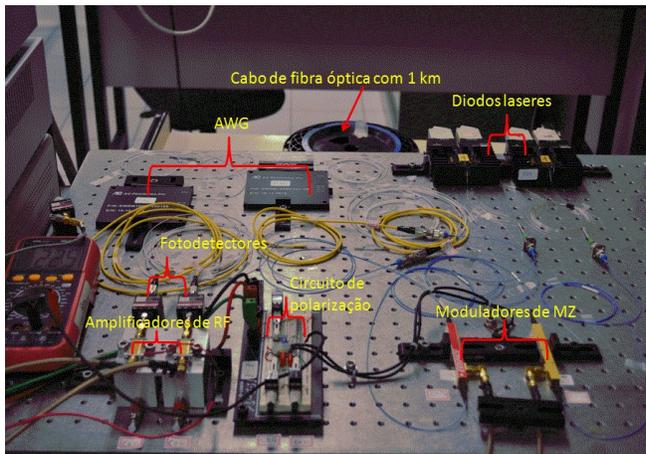


Fig. 6. Equipamentos empregados no enlace.

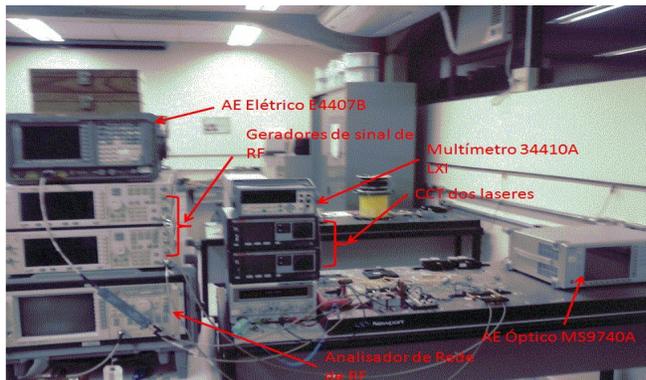


Fig. 7. Equipamentos empregados nas medições dos parâmetros do enlace.

O enlace foi organizado de acordo com a Fig. 5 para medir o ganho de potência do sinal de RF. Tal ganho para cada canal pode ser calculado descontando o resultado medido do parâmetro “ $S_{21}$ ” para os cabos de RF e o amplificador de RF no valor medido do parâmetro “ $S_{21}$ ” de cada canal. A Fig. 8 apresenta o resultado medido para o canal 30 comparado com o calculado pelo método de pequenos sinais e pelo método exato aplicando teorema de Graf.

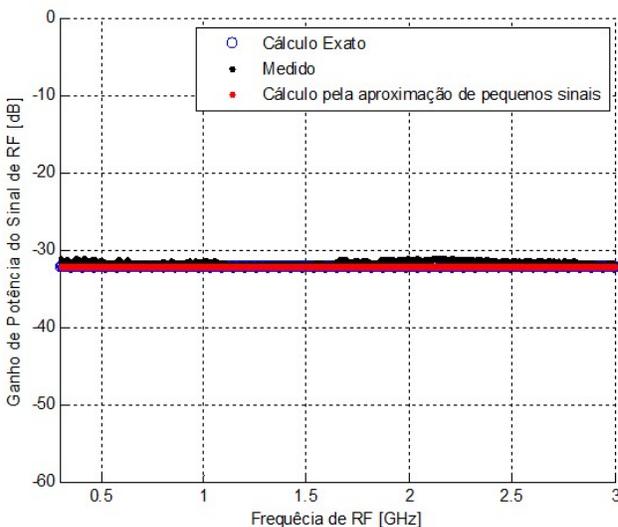


Fig.8. Gráfico comparativo do resultado medido com o índice de modulação = 0,1 para o canal 30 em relação ao calculado pelo método de pequenos sinais e pelo método exato aplicando teorema de Graf.

Observando a Fig. 8, percebe-se que a sobreposição dos valores obtidos visando à comparação do resultado calculado com o valor medido mostra uma diferença muito pequena. Os valores calculados (-32 dB) estão oscilando aproximadamente em 0,5 dB com relação aos resultados medidos.

Para verificar o impacto do *crosstalk* óptico, observado na Fig. 9, no sinal de RF a partir do enlace configurado conforme a Fig. 10, optou-se por desconectar a saída do canal óptico 31 (que não está sendo medido) de seu fotodetector. Diante deste fato, foi possível observar somente o sinal que vinha do fotodetector do canal 30. O resultado desta ação foi observado no analisador de espectro Agilent E4407B que explora uma faixa de 9 kHz a 26,5 GHz, o qual foi obtido no canal 30 e apresentado na Fig.11.

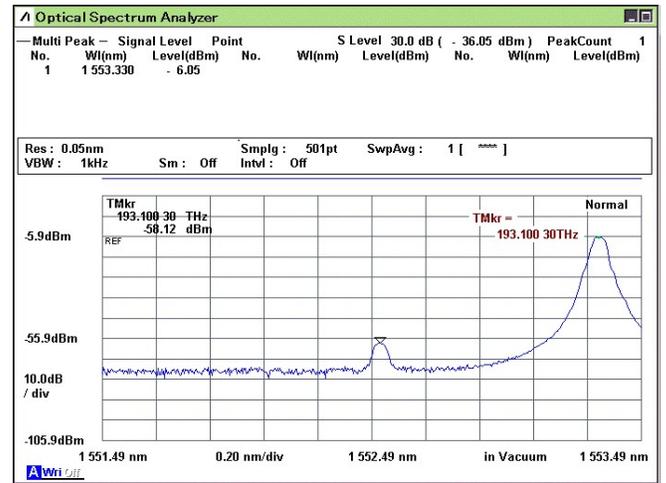


Fig. 9. Espectro óptico obtido no canal 30 apresentando um sinal espúrio devido ao *crosstalk* com o canal 31. Este sinal apresenta uma potência óptica de -58,12 dBm, isto é uma diferença de aproximadamente de 52 dB do sinal do canal 30.

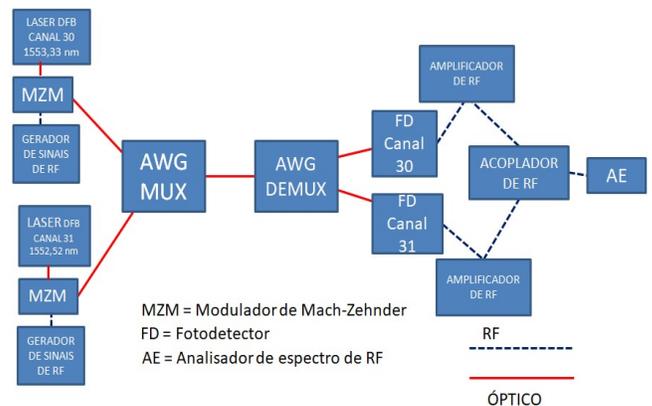


Fig.10. Esquema representativo da caracterização do enlace analógico a fibra óptica baseado na técnica DWDM quanto à frequência de RF e potência.

O resultado observado na Fig. 11 mostra o sinal de RF na frequência da portadora centrada em 1 GHz proveniente do canal 30 sem a interferência do sinal de RF proveniente do canal 31. Não são observados os sinais harmônicos da frequência de RF centrada em 1 GHz. Foi observado um sinal espúrio constante em torno de 2,154 GHz. Este último, mesmo com os geradores de RF desligados, foi observado. O que

indica ser um sinal interferente externo. Para a faixa de frequência de operação do enlace estudado, verifica-se que este sinal não influenciou no experimento.

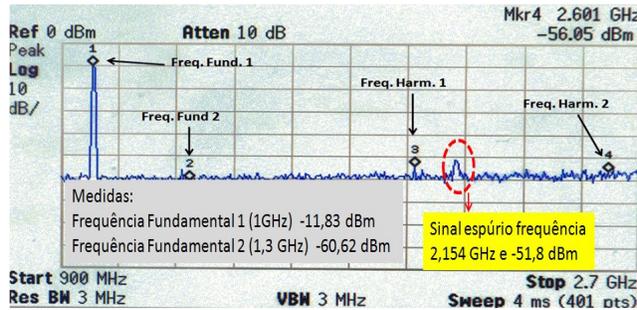


Fig. 11. Medida obtida no analisador de espectro Agilent E4407B. O espectro do sinal de RF referente ao canal 30 pode ser observado. Os sinais de RF foram gerados com potência de -4,68 dBm (equivalente ao índice de modulação igual a 0,1).

Analisando (1) percebe-se que o ganho de RF depende da potência da portadora óptica. Contudo, quando se trata de transmissão de mais de uma portadora óptica em uma fibra óptica deve-se limitar o aumento da potência óptica que é utilizada para melhorar o ganho de potência do sinal de RF. Este fato ocorre por conta dos efeitos não lineares descritos na Seção II.

Observando a Fig.4, como estudado na seção anterior, era esperado um comportamento aproximadamente retilíneo nesta faixa de frequência e isto foi verificado na Fig. 8.

Analisando a Fig. 11 percebe-se que o segundo sinal de RF na frequência de 1,3 GHz (frequência fundamental de RF do canal 31) não foi observado. O sinal de RF do canal 31 continuou sendo gerado com potência igual a do canal 30 (-4,68 dBm). Com isto, constata-se que não ocorre a diafonia na faixa de frequência de RF mesmo ocorrendo o *crosstalk* óptico, conforme a Fig. 9. Repetindo o procedimento aplicado para verificar o *crosstalk* na faixa de frequência de RF no canal 31 foi obtido o mesmo resultado para este nível de ruído. Cabe ressaltar que a diafonia óptica verificada na Fig. 9 tinha uma diferença entre os sinais de aproximadamente de 50 dB, o que possivelmente evitou a interferência mútua entre canais óticos e de RF. As frequências harmônicas da frequência fundamental gerada no canal 30 não aparecem. Isto era esperado tendo em vista que o nível do sinal de RF do canal 30 quando entra no MMZ não é grande o suficiente em relação à tensão de polarização de meia onda deste modulador, o que confere um índice de modulação menor que 0,1.

Na Fig. 11 aparece um sinal espúrio que não estava previsto e que permanecia mesmo com os equipamentos desligados, o mesmo foi interpretado como interferência e não influenciou na análise do resultado.

#### IV. CONCLUSÃO

A linearidade e a dispersão cromática podem limitar o ganho do enlace a fibra óptica por DWDM do sinal de RF. Observando os resultados percebe-se, por conta do comprimento do enlace de 1 km, que a dispersão e os fenômenos não lineares da fibra não influenciaram na transmissão dos sinais de RF. O ganho de potência de RF para este enlace a fibra óptica por DWDM foi aproximadamente -32 dB para a faixa de frequência de 0,3 a 3 GHz. Os resultados para o método de cálculo aplicando o Teorema de Adição de

Graf e os resultados pela aproximação para pequenos sinais foram aproximadamente coincidentes, tendo em vista que, com o índice de modulação ( $m$ ) próximo de 0,10, não ocorre a transferência de energia da componente fundamental para as harmônicas. Cabe ressaltar, que se fosse necessário observar o comportamento dos sinais de RF para o caso de índices de modulações maiores, poderia ser avaliado com essa expressão desenvolvida com base no teorema de adição de Graf. Tornou-se possível verificar que o enlace se apresenta aproximadamente linear graças ao respeito aos limites de potência óptica, dispersão e espaçamento entre canais óticos sendo respeitados. Essa linearidade permite a fidelidade do sinal para esta aplicação. E com estes resultados, nesse estudo inicial, a possibilidade de emprego de enlace à fibra óptica por DWDM de sinais de RF em transmissão de sinais radar que dependam de banda larga (acima de 1GHz) sem distorções é factível.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Coutinho, Olympio L., Almeida, Vilson R. e Oliveira, José Edimar B. "Uso de Redes de Comunicações Ópticas para Transmissão e Distribuição de Emissores Radar", XIII Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE), São José dos Campos, 2011.
- [2] Gonçalves, André P. Estudo experimental de enlace analógico a fibra óptica empregando WDM e sinal de RF multi-espectral. 2014. 171f. Dissertação (Mestrado em Micro-ondas e Opto-eletrônica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [3] Jemison, William D. e Paoletta, Arthur C., "Introduction to Analog Fiber-Optic Links", RF and Microwave Applications and Systems, Chapter 9, RF and Microwave Handbook, 2ª Edição, CRC Press, 2008
- [4] Kolner, Brian H. e Dolfi, David W., "Intermodulation distortion and compression in an integrated electrooptic modulator", Applied Optics, Vol. 26, No. 17, setembro, 1987
- [5] Korotky, S. K. e Halemane, T. R., "Distortion Characteristics of Optical Directional Coupler Modulators", IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 38, n.º. 5, maio, 1990.
- [6] S. P. Singh and N. Singh, "Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications", Progress in Electromagnetics Research, PIER 73, 249–275, 2007.