

Aplicação operacional da RF em fotônica: o enlace analógico a fibra óptica e a faixa dinâmica livre de espúrios

Cap Com Bruno Elias Ribeiro*

RESUMO

Os primeiros sistemas a empregarem a tecnologia de radiofrequência (RF) em fotônica datam da década de 90. Desde então, diversas melhorias foram implementadas em sistemas de RF que utilizam dispositivos fotônicos, estejam estes dispositivos empregados em conjunto ou em substituição a dispositivos eletrônicos. Os dispositivos fotônicos têm sido empregados em Enlaces Analógicos a Fibra Óptica (EAFO) tendo em vista aplicações comerciais civis ou de interesse militar. Neste sentido, uma das características a estudar é a faixa dinâmica livre de espúrios (SFDR – Spurious Free Dynamic Range), que delimita, por exemplo, a sensibilidade e o ponto de operação, sem distorções de um radar ou de um sistema de guerra eletrônica. Também são abordadas neste artigo algumas vantagens dos EAFO, já que eles asseguram maior eficiência aos sistemas de RF a eles associados, dado o emprego de dispositivos fotônicos. Prevê-se que os sistemas vocacionados para emprego militar que utilizem estes dispositivos estarão comercialmente disponíveis em um futuro bem próximo, compondo sistemas de armas e sistemas de guerra eletrônica, dadas as imposições dos cenários de combate e as perspectivas de evolução para as tecnologias de RF em Fotônica.

Palavras-chave: Radiofrequência. Fotônica. Enlace analógico a Fibra Óptica.

Operational application of Microwave Photonics: the Analog Photonic Link and the Spurious Free Dynamic Range

ABSTRACT

The first devices to deploy Microwave Photonics technologies date from the nineties. Since then, several improvements have been made in radiofrequency (RF) systems which use photonic devices, deployed along or replacing electronic devices. Photonic devices have been used in Analog Photonic Links (APL) seeking

commercial civilian applications or applications that are interesting to the military. This way, one feature to be studied is the Spurious Free Dynamic Range (SFDR), which limits, for instance, sensibility and distortion-free operation of a radar or an electronic warfare system. This article also points at APLs advantages, since they provide higher efficiency to associated RF systems, once photonic devices are used there. It is foreseen that military systems deploying these devices will be commercially available in the near future, inside weapons systems and electronic warfare systems, given the requirements of battlefield scenarios and the evolutions predicted to microwave photonics technologies.

Keywords: Radiofrequency. Microwave Photonics. Analog Photonic Link.

1 INTRODUÇÃO

No dia 6 de agosto de 1960, Theodore Maiman publicou na revista Nature os resultados obtidos ao irradiar um cristal de rubi de 1 cm com uma lâmpada de flash de alta potência (MAIMAN, 1960). Este experimento formalizou a invenção do laser de estado sólido. A partir daí, com o amadurecimento desta tecnologia, a luz amplificada pela emissão estimulada de radiação (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) se mostrou uma invenção muito útil para diversas aplicações, em especial para as comunicações ópticas (KEISER, 2014).

Uma das primeiras aplicações comerciais neste sentido foi a utilização de fibras ópticas para a transmissão de sinais de TV a cabo.

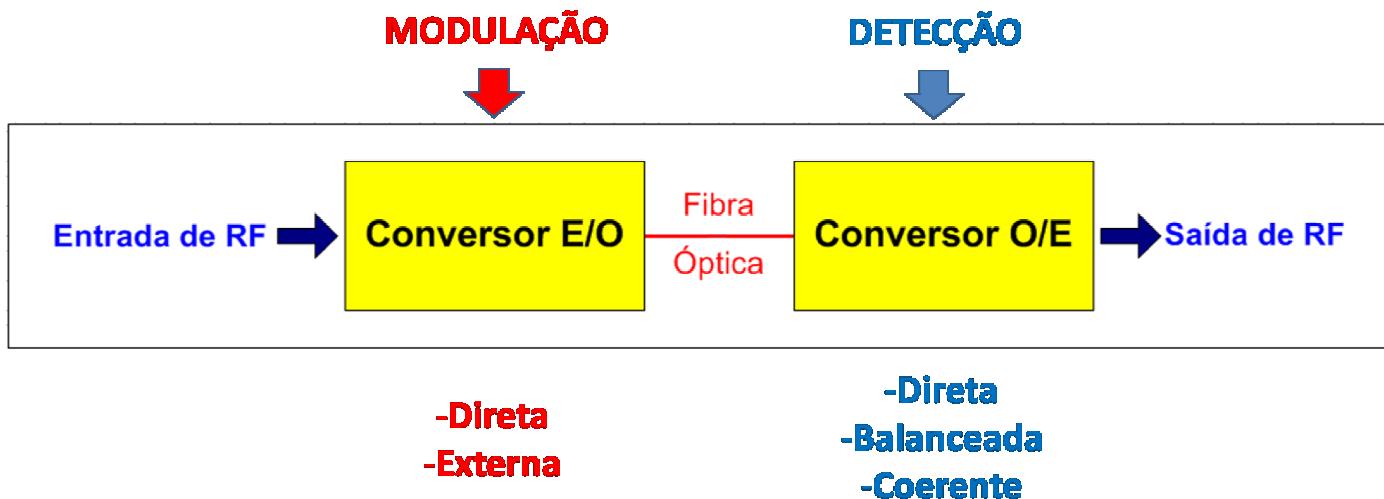
Outra aplicação, de interesse militar e não relacionada a comunicações, foi a transmissão de sinais de radar por fibra óptica a partir de uma estação controladora afastada a dezenas de quilômetros da antena do radar (COX III, 2004).

As aplicações supracitadas são possíveis devido ao emprego do laser em um EAFO. Nesta arquitetura, o sinal de RF a ser transmitido a longas distâncias modula a portadora no espectro

de frequências ópticas gerada pelo laser. Este sinal modulado é transmitido por fibra óptica até um fotodetector ou um conjunto de fotodetectores

responsável por converter o sinal transmitido do espectro de frequências ópticas para o espectro de frequências de RF (COX III, 2004).

Figura 1 - Diagrama esquemático de EAFO para a transmissão de sinais de RF.



Fonte: o autor (2018).

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático de um EAFO, ressaltando as possibilidades para a modulação e a detecção do sinal de RF. O sinal de RF, na conversão do espectro de frequências elétrica para óptica (E/O), modula uma portadora óptica sem o auxílio de um modulador – modulação direta – ou com o auxílio de um modulador – modulação externa, empregando, por exemplo, um modulador de eletroabsorção ou um modulador eletroóptico de intensidade.

O sinal modulado, após sua transmissão por um trecho de fibra óptica, é convertido do espectro de frequência óptica para elétrica (O/E) por meio de detecção direta, balanceada ou coerente, empregando, respectivamente, um fotodetector, mais de um fotodetector, ou técnicas de processamento homódinas ou heteródinas (COX III, 2004).

Em 2014, a revista *Nature* trouxe outra publicação de inovação tecnológica de interesse para a defesa, tendo em vista sua aplicação em sistemas de armas, colimada com as necessidades dos cenários de combate modernos: o radar fotônico (GHELF, 2014).

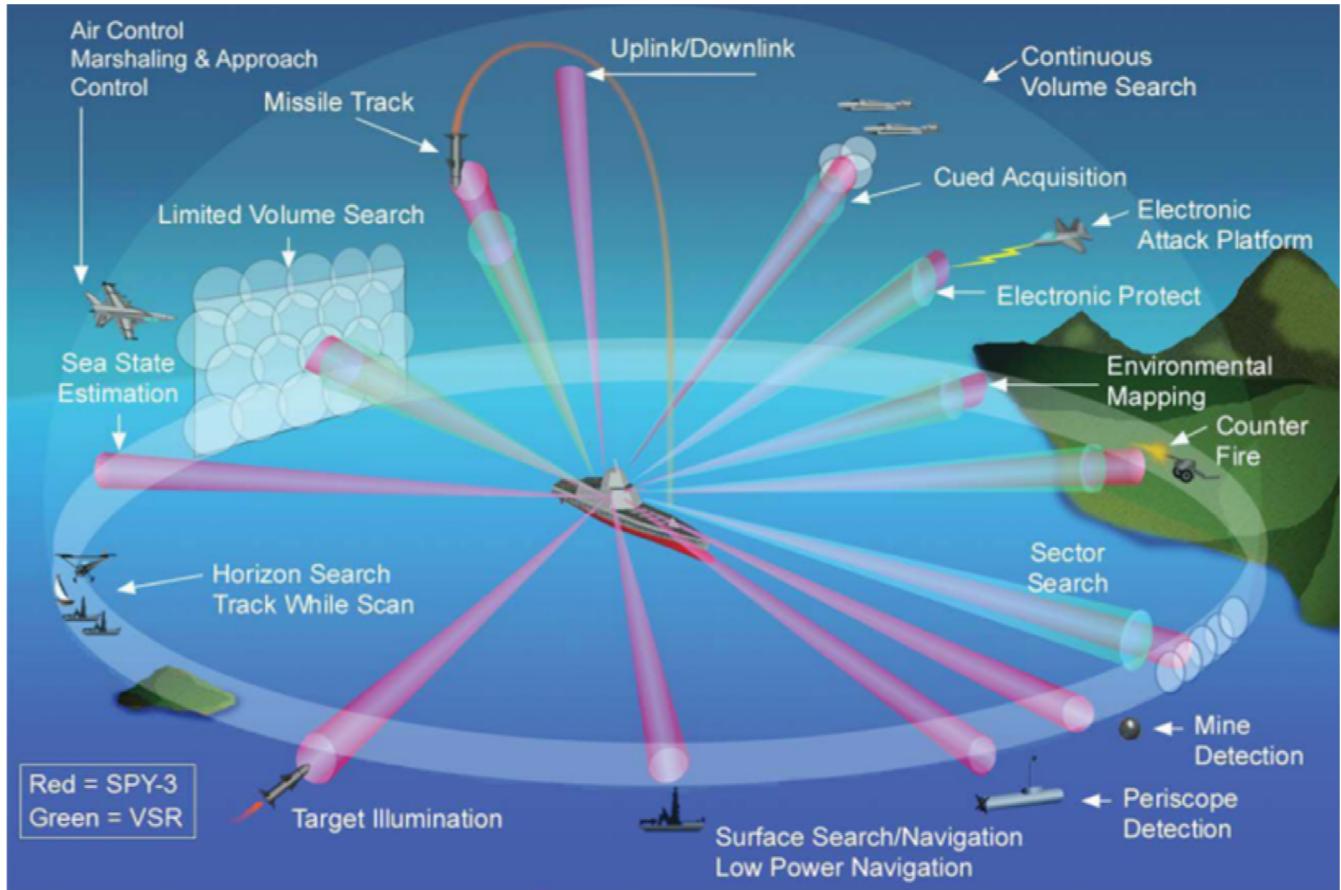
O radar fotônico, que emprega dispositivos fotônicos para a geração da forma de onda, processamento do sinal de RF e detecção de um

ou mais sinais de interesse – proposta dos dispositivos multifuncionais (RIDWAY, 2014; MELO et al, 2016) traz como uma de suas principais vantagens o aumento da largura de banda, proporcionada pelo processamento dos sinais na faixa do espectro óptico.

A Figura 2 ilustra os desafios para a autoproteção de uma plataforma de combate naval. Neste contexto, propõe-se um dispositivo radar multifuncional, capaz de operar em faixas diferentes do espectro eletromagnético – expressas pelos feixes nas cores verde e vermelha – necessitando de grande largura de banda instantânea para a detecção e identificação das diversas ameaças presentes no cenário. Este dispositivo multifuncional da Figura 2 é um exemplo de aplicação possível para o emprego do radar fotônico.

No Brasil, estudos sobre a tecnologia de RF em Fotônica aplicada à defesa são conduzidos por institutos de renome, como o Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) (MELO et al, 2016) e o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) (COUTINHO, 2018). Nestes institutos, é possível medir, por meio de experimentos práticos, as vantagens obtidas com o uso de dispositivos fotônicos.

Figura 2 - Desafios da consciência situacional no cenário de combate moderno

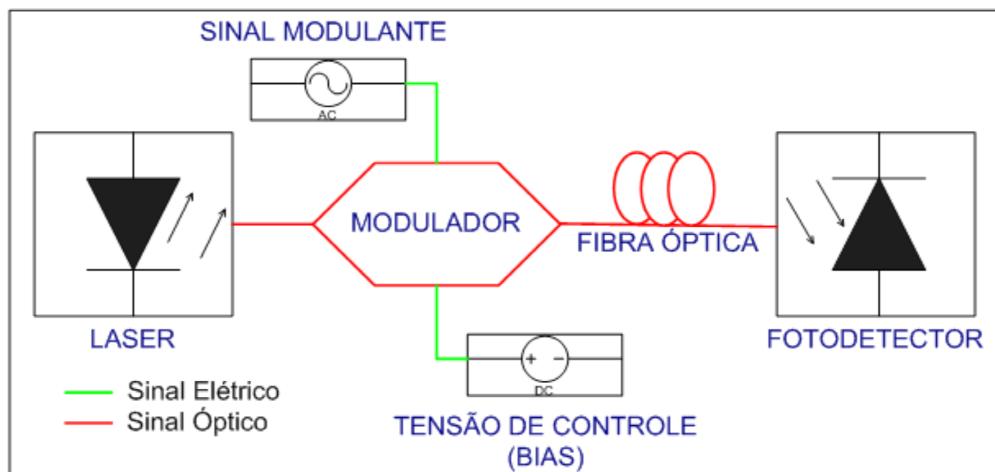


Fonte: Bogoni (2018).

Serão apresentadas a seguir algumas figuras de mérito em sistemas de não comunicações e guerra eletrônica (GE), como é o caso da faixa dinâmica livre de espúrios (SFDR – *Spurious Free Dynamic Range*) ou, simplesmente, faixa dinâmica. Ela está diretamente relacionada à detecção de alvos de interesse para sistemas de armas ou de guerra eletrônica, e é apresentada

neste artigo no contexto do EAFO. Ainda no contexto da área de pesquisa em RF em Fotônica, conhecida internacionalmente como *Microwave Photonics*, serão exploradas algumas vantagens angariadas com a geração, o processamento e a detecção fotônicos dos sinais de RF. (CAPMANY, NOVAK, 2007).

Figura 3 - Exemplo de EAFO com IMDD para a transmissão de um sinal radar.



Fonte: o autor (2018).

2 O ENLACE ANALÓGICO A FIBRA ÓPTICA

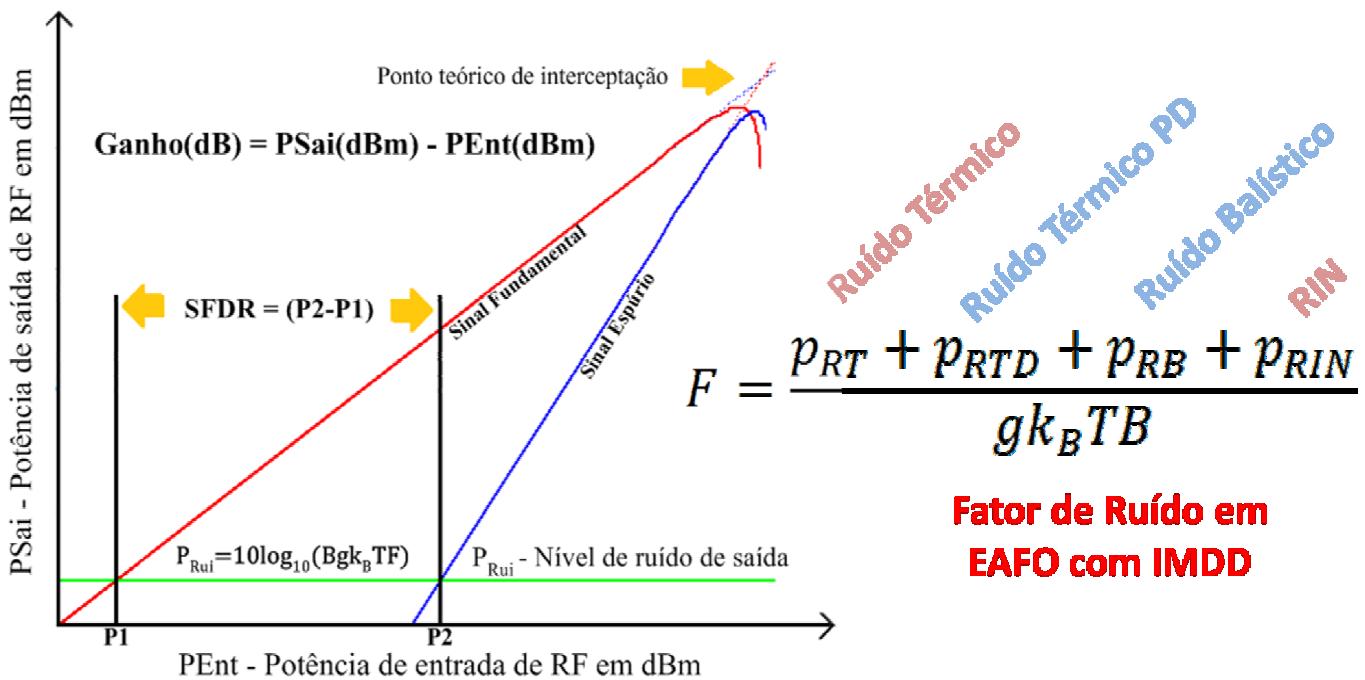
No exemplo da Figura 3, um laser de material semicondutor gera uma portadora óptica na faixa de frequência de centenas de THz. Esta portadora é modulada por um sinal de corrente alternada (AC - *Alternate Current*) na faixa de dezenas de GHz com o auxílio de um modulador eletroóptico de intensidade do tipo Mach-Zehnder (MZM - *Mach-Zehnder Modulator*), caracterizando assim a modulação externa. O ponto ótimo de operação deste modulador é controlado por uma tensão de corrente contínua (DC - *Direct Current*), que regula um valor de potência de transmitância do sinal modulado a ser transmitido pela fibra óptica. Após a sua transmissão, o sinal é fotodetectado a partir da potência óptica incidente no fotodiodo, dispositivo mais comumente empregado neste tipo de enlace, possibilitando a recuperação do sinal AC que modulara previamente a portadora óptica, caracterizando assim o processo de detecção direta.

Traduzindo o parágrafo anterior para o exemplo de uma possível aplicação operacional de um EAFO, pode-se citar a estrutura que permite a operação remota de um radar em relação a sua antena. Esta estrutura abrange o laser que gera a portadora óptica e o MZM, junto com seu controle DC e o gerador AC do sinal de RF.

O processo de modulação ocorre nesta estrutura, e o sinal modulado é transmitido por fibra óptica por dezenas de quilômetros até o fotodiodo, onde ocorrerá a fotodetecção do sinal óptico modulado, a recuperação do sinal de RF e a posterior radiação deste sinal pela antena do radar. O ciclo se repete para o envio do sinal de RF com a informação do alvo detectado pelo radar para a estrutura remota, de forma que a posição onde ocorre a operação do radar também disponha de um fotodetector e estruturas para o pós-processamento do sinal de RF, de forma a executá-lo em posição afastada da antena, garantindo assim a segurança dos operadores e analistas.

Neste tipo de enlace, algumas figuras-de-mérito são de interesse, tendo em vista a correta detecção do alvo por parte de um radar, para empregar o mesmo exemplo. Dentre elas, é possível citar: ganho de RF; fator de ruído; e faixa dinâmica livre de espúrios. Esta última, como será visto a seguir, é decisiva para a correta detecção de alvos e, consequentemente, garantia de êxito na obtenção da consciência situacional em combate. A SFDR e outras figuras -de-mérito serão detalhadas a seguir, e podem ser deduzidas a partir da observação do gráfico da Figura 4.

Figura 4- Figuras-de-mérito de um EAFO com IMDD



Fonte: Ribeiro (2016).

No gráfico da Figura 4, é possível analisar as figuras de mérito de um EAFO com IMDD. O eixo das abscissas corresponde ao valor em dBm da potência do sinal de RF à entrada do EAFO, no processo de modulação (PEnt). O eixo das ordenadas corresponde ao valor em dBm da potência do sinal de RF à saída do EAFO, após a fotodetecção (PSai). Para obter o ganho do EAFO, correspondente à primeira figura-de-mérito de interesse, basta obter o resultado de (PSai - PEnt) referente a qualquer ponto sobre a curva que denota o sinal fundamental, representado na cor vermelha.

A segunda figura-de-mérito de interesse é o fator de ruído do EAFO, que está relacionado ao nível de potência de ruído deste enlace. A potência de ruído é decisiva para o cálculo da SFDR, tendo em vista que ela denota o nível de potência a partir do qual o sinal fundamental, em vermelho, e o sinal espúrio, em azul, são detectados na faixa de passagem do EAFO.

O fator de ruído, dado pela letra F, é proporcional ao ruído térmico, ao ruído balístico e ao ruído de intensidade relativa (RIN – *Relative Intensity Noise*). O ruído térmico está associado ao movimento aleatório de portadores de carga em condutores; o ruído balístico está ligado ao processo estatístico de geração de corrente elétrica em fotodetectores – eventos independentes e randômicos associados à incidência de fôtons e geração de portadores livres para a corrente elétrica; o RIN, por sua vez, relaciona-se à corrente de bombeamento do laser e aos processos de emissão espontânea e estimulada associados à geração do laser, resultando em processos randômicos que provocam flutuações aleatórias na potência óptica. (COX III, 2006; 2004).

Obtém-se, assim, a linha verde paralela ao eixo das abscissas, que estabelece o threshold do sistema de detecção.

É possível, então, definir a figura-de-mérito SFDR, calculada no gráfico da Figura 4 pela diferença entre os valores P1 e P2. Estes valores se referem, respectivamente, à potência do sinal fundamental de RF e à potência do sinal espúrio de RF decorrente da distorção.

Na medida em que aumenta a potência do sinal fundamental na entrada do sistema, aqui definido como o alvo de interesse para o radar associado a um sistema de armas, este sinal deve transpor o nível de potência de ruído, ou nível de *threshold*, para ser detectado. O valor P1 indica o nível de potência em que o sinal fundamental transpõe o limiar de ruído e

permite sua identificação como alvo, correspondendo portanto ao valor em dBm para a sensibilidade do radar.

No entanto, na medida em que se aumenta o ganho deste sistema de RF, com o aumento dos valores de potência de RF de entrada, o sistema se torna suscetível a distorções. O valor P2 indica o nível de potência em que o sinal espúrio transcende o limiar de ruído e se apresenta na faixa de passagem observada, correspondendo ao alvo falso apresentado ao operador do radar e, portanto, ao valor em dBm limite para a operação deste radar sem distorções. O resultado obtido de (P2 – P1) expressa assim a SFDR ou faixa dinâmica deste radar.

Cabe aqui ressaltar que, apesar de utilizado para estudar o exemplo de um EAFO com IMDD, o gráfico da Figura 4 pode ser empregado para analisar o funcionamento de qualquer sistema que emprega RF, uma vez que os eixos coordenados estão em função dos valores de potência em dBm de entrada e saída dos sinais de RF.

A influência dos dispositivos fotônicos, neste caso, está na lei de formação do limiar de ruído, onde estão presentes a influência do RIN, na geração do laser; e a influência do ruído balístico, no processo de fotodetecção. A influência do ruído térmico está associada aos dispositivos eletrônicos, presentes nas resistências ôhmicas associadas ao modulador (gerador de sinal AC) e ao fotodetector (recuperação do sinal AC que modulara a portadora óptica). Verifica-se, assim, a importância atribuída ao cálculo da figura-de-mérito SFDR para o funcionamento de sistemas de interesse para a guerra eletrônica de não comunicações.

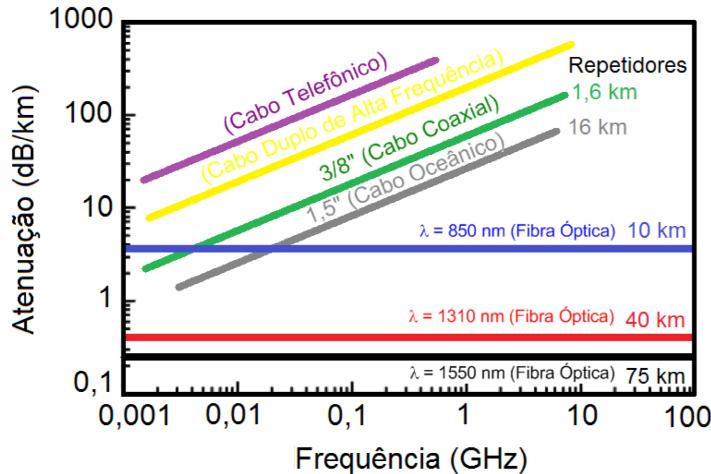
3 VANTAGENS ASSOCIADAS AO EMPREGO DE EAFO

No exemplo apresentado na sessão anterior, optou-se pela fibra óptica para a transmissão do sinal modulado. Contudo, é possível fazer a opção por um sistema que utilize a transmissão do sinal óptico modulado empregando óptica no espaço livre (FSO – *Free Space Optics*). Neste caso específico, deve-se atentar para o alinhamento entre os sensores transmissor e receptor, bem como às características atmosféricas da região do enlace, já que o sinal óptico a ser transmitido é suscetível a absorção, espraiamento e turbulências por conta da presença de partículas de poeira e gotículas de água (SANTOS, 2008).

No caso em estudo neste artigo, retomando exemplo do radar, quando a opção é a utilização de cabeamento para a transmissão de sinais de RF, verifica-se que o emprego da fibra óptica é mais vantajoso que o emprego de um cabo coaxial, por exemplo. No exemplo da Figura 3, o sinal de RF a ser transmitido pelo radar – que pode ser gerado por técnicas fotônicas –

modula a portadora óptica. A partir daí, o sinal modulado está pronto para ser transmitido pela fibra. Existem três opções janelas de transmissão a empregar, associadas aos comprimentos de onda de 850 nm, 1310 nm e 1550 nm, que oferecem, conforme a Figura 5, suas peculiaridades para a transmissão do sinal modulado. (DIAS, 2017).

Figura 5 - Comparação entre atenuações em diversos meios de transmissão



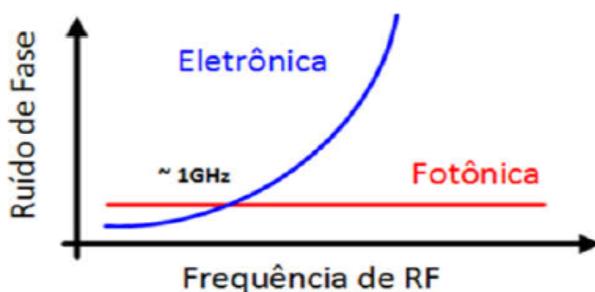
Fonte: COX III (2004) adaptado pelo autor.

A partir da Figura 5 verifica-se que, para transmissão a longas distâncias, independente do comprimento de onda utilizado para a propagação do laser pela fibra óptica, verifica-se que a opção por este meio é mais vantajosa que a que utiliza, por exemplo, um cabo coaxial para transmitir um sinal de RF de 10 GHz. Além da tendência de aumento da atenuação em dB/km com o aumento da frequência, o valor de atenuação para esta frequência é superior quando se emprega cabo coaxial. Ressalta-se ainda a necessidade de repetir o sinal de RF a cada 1,6 km com o uso do mesmo cabo, ao invés de repetir a cada 40 km, com o emprego da fibra óptica no comprimento de onda de 1310 nm. Contudo, conforme o artigo publicado em

2014 pela *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), os receptores multifuncionais a serem empregados nos cenários de combate futuros tendem a operar em freqüências de operação ainda maiores. No caso do artigo, freqüências superiores a 18 GHz e larguras de banda instantâneas superiores a 1 GHz (RIDGWAY, 2014).

Esta tendência vai ao encontro do desejável aumento da largura de banda nestes sistemas de RF de interesse. A operação dos EAFO, a partir da utilização de dispositivos fotônicos em conjunto com dispositivos eletrônicos, possibilita um aumento natural da largura de banda, já que o processamento do sinal pode ocorrer na faixa de freqüências do espectro óptico.

Figura 6 - Aumento do ruído de fase em função do aumento da freqüência de operação com o emprego de dispositivos eletrônicos (azul) e dispositivos fotônicos (vermelho)



Fonte: Dias (2017).

O aumento da frequência de RF baseada em sistemas que operam apenas com eletrônica convencional traz os seguintes inconvenientes: aumento da complexidade destes sistemas, pelo acréscimo de componentes eletrônicos; aumento da inserção de ruído, dificultando a detecção do sinal fundamental; aumento do peso destes sistemas, restringindo seu emprego em vetores aéreos como os sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (SARP) e sistemas satelitais; aumento do custo de desenvolvimento e manutenção; e aumento do consumo de potência para o processamento dos sinais de interesse. O uso dos dispositivos fotônicos apresentados na Figura 3, além de contar com as vantagens proporcionadas pela transmissão por fibra óptica, garante, por sua vez, imunidade a interferências eletromagnéticas, aumenta a largura de banda e reduz o peso e a complexidade dos sistemas.

Estas vantagens estimulam o estudo destas tecnologias, tendo em vista seu emprego em aplicações operacionais de interesse para a defesa. O primeiro exemplo é o radar fotônico italiano, criado a partir do Projeto *Photonic Based Fully Digital Radar System* (PHODIR), que permite a geração, o processamento e a detecção do sinal de RF com o emprego de fotônica (BOGONI, 2013). Pode-se citar ainda o Projeto *Active Phased Array Radio Photonics* (ROFAR), da Rússia, relacionado ao uso de dispositivos fotônicos para gerar o padrão de irradiação de antenas de arranjo de fase (PAA – *Phased Array Antenna*) (THAI Militay..., 2016).

No Brasil, o INATEL fez recentemente o teste de campo de um receptor multifuncional, em parceria com os pesquisadores do radar fotônico. O sistema de uso dual proposto utiliza dispositivos fotônicos, fazendo com que um transceptor se comporte simultaneamente como um radar e como um dispositivo de comunicações, utilizando um único elemento irradiador de RF sem, contudo, prejudicar o seu desempenho global. Utiliza, portanto, uma antena e um transceptor para as duas aplicações: radar e comunicações, o que se reflete em redução de custo, tamanho, peso e consumo de potência pelo sistema (MELO, 2016).

Ainda no Brasil, a pesquisa na área de RF em Fotônica no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, aplicada à defesa nacional, segue na mesma direção, com trabalhos acerca da geração fotônica de sinais de RF e do uso de filtros e linhas de retardo fotônicos para emprego em antenas PAA. Esta pesquisa, no âmbito da Força Aérea Brasileira, teve início com a publicação em 1999 do artigo *Trends in Photonics Applied*

to Electronic Warfare at Brazilian Airforce, um dos primeiros associados ao surgimento do Programa de Pós Graduação em Aplicações Operacionais (PPGAO) daquela Força Singular, ativo até a presente data e contribuindo com a formação de massa crítica no contexto de tecnologia aplicada à Defesa Nacional. (DIAS, 2017; SILVA, 2017; OLIVEIRA, 1999)

Por tudo isso, verifica-se a atribuição de grande importância às tecnologias de RF em Fotônica, tanto em pesquisas internacionais como nacionais, dadas as vantagens proporcionadas pelo emprego de dispositivos fotônicos em conjunto ou em substituição a dispositivos eletrônicos (MARQUES, 2017). Os sistemas de armas ou sistemas de guerra eletrônica serão mais eficientes com o emprego das tecnologias de RF em Fotônica, dotados de novas capacidades para a aquisição da consciência situacional em combate, com a possibilidade de emprego em plataformas aéreas ou satelitais (BOGONI, 2013).

Para tanto, são perspectivas futuras para o emprego desta tecnologia a miniaturização de componentes, utilizando as tecnologias de fotônica em silício e outros materiais avançados, como o grafeno, para a implementação em uma placa de circuito (*in-chip*) (BOGONI, 2013). Este esforço permitirá o emprego da tecnologia de RF em Fotônica embarcada em SARP e sistemas satelitais, dada a redução do peso, das dimensões e do consumo de potência necessários à operação dos futuros sensores de não comunicações.

4 CONCLUSÃO

Buscou-se apresentar neste artigo a aplicabilidade das tecnologias de RF em Fotônica em cenários de combate futuros, onde o desafio é assegurar a consciência situacional em um ambiente eletromagneticamente denso.

Verificou-se, inicialmente, como funciona um EAFO e quais as principais figuras-de-mérito associadas ao seu funcionamento efetivo. O ganho, o fator de ruído e a SFDR auxiliam a compreender não apenas o funcionamento dos EAFO, mas também de qualquer sistema que utilize RF. Afinal, o EAFO continua a ser uma estrutura para a transmissão e o processamento do sinal de RF, aproveitando as vantagens proporcionadas pela geração, processamento e detecção no espectro de frequências ópticas.

Destas vantagens, foram ressaltadas a baixa atenuação na transmissão do sinal de RF com o emprego da fibra óptica, o aumento da largura de banda instantânea, a redução no peso e nas

dimensões dos sistemas que empregam RF em Fotônica e, consequentemente, menor inserção de ruído pela adoção de componentes e menor consumo de potência. Estas características se mostram promissoras para a implementação *in-chip* destes dispositivos fotônicos, possibilitando a miniaturização de componentes e sua posterior aplicação em SARP e em sistemas satelitais. São capacidades de relevância para agregar aos futuros sistemas de armas e de guerra eletrônica, dados os desafios proporcionados pelos cenários de combate futuros.

Por fim, cabe aqui ressaltar a importância dos instrumentos de parceria no contexto de pesquisa e aplicação da tecnologia de RF em Fotônica, a exemplo do que ocorreu, conforme citado anteriormente, com o INATEL e os pesquisadores do radar fotônico italiano. A pesquisa em RF em Fotônica se mostra relevante para o cenário de defesa, e é importante buscar o conhecimento já disponível junto aos institutos nacionais de renome (Instituto Militar de Engenharia, ITA, INATEL) para consolidar sua aplicação nas capacidades operativas de interesse para as Comunicações e, por conseguinte, para o Exército Brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOGONI, Antonella. **Phodir project:** photonic based fully digital radar system. CNIT, TECIP, [2013?]. Disponível em: <<http://www.phodir.eu/phodir/file/presentation.pdf>>. Acesso em: 3 jun. 2018.

CAPMANY, J.; NOVAK, D. Microwave photonics combines two worlds. **Nature Photonics**, Nature Publishing Group, v. 1, p. 319–330, June 2007.

COUTINHO, O. L. RF em Fotônica e suas aplicações em defesa. Brazil Cyber Defence Summit & Expo – Conferência de Simulação e Tecnologia Militar. **Proceedings...** 2018. Brasília – DF.

COX III, C. H. **Analog Optical Links:** theory and practice. Nova York: Cambridge University Press, 2004. 288 p.

COX III, C. H. et al. Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 54, n. 2, p. 906–920, Feb. 2006.

DIAS, P. E. S. **Estudo do Ruído de Fase na Geração Fotônica de Sinais de RF:** modelagem e caracterização. 2017. 194 f. Dissertação (Mestrado em Microondas e Optoeletrônica) – Instituto Tecnológico de

Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

GHELFİ, P. et al. A fully photonics-based coherent radar system. Research Letter. **Nature**, v. 507, p. 341–345, Mar. 2014.

KEISER, G. **Comunicações por fibras ópticas.** Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2014. 659 p.

MAIMAN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. **Nature**, v. 187, p. 494, Aug. 1960.

MELO, S. et al. Dual-use System Combining Simultaneous Active Radar & Communication, Based on a Single Photonics-Assisted Transceiver. In: INTERNATIONAL RADIO SYMPOSIUM – IRS, 17., 2016. **Proceedings...** [S.I.], 2016.

OLIVEIRA, J. E. B.; ALVES, F. D. P.; MATTEI, A. L. P. Trends in photonics applied to electronic warfare at Brazilian Air Force. In: SBMO/IEEE MTT-S IMOC MICROWAVE OPTOELECTRONIC CONFERENCE, 2., 1999, Rio de Janeiro.

Proceedings... Psicataway: IEEE, 1999, p. 599–602.

RIDGWAY, R. W. et al. Microwave photonics programs at DARPA. **Journal of Lightwave Technology**, v. 32, n. 20, p. 3428–3439, Oct. 2014.

SANTOS, L. B. **Análise de Sistemas de Comunicação Utilizando Óptica no Espaço Livre.** 2008. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.pgee.ime.br/pdf/leandro_santos.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2018.

SILVA, J. L. B. **Filtros e linhas de retardo fotônicos integrados aplicados a sistemas de RF em Fotônica.** 2017. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2017.

THAI Military and Asian Region - **Zhuk-AE/FGA-35 modified radar with AESA (ROFAR).** Disponível em: <<https://thaimilitaryandasianregion.wordpress.com/2016/03/14/kret-creates-a-laboratory-forresearch-in-photonics/>>. Acesso em: 31 jul. 2018.

MARQUES, R. B. et al. Perspectivas de modernização em guerra eletrônica: aplicação militar da fotônica. **Spectrum**, v. 1, n. 20, p. 32–38, set. 2017.

*Artigo realizado a partir do trabalho de conclusão do Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais (PPGAO) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em 2016 pelo Capitão de Comunicações Bruno Elias Ribeiro do Exército Brasileiro. Email: eliasribeiro@eb.mil.br.