

Efeitos da Radiação Gama em *Down Converters* Fotônicos em Sensoriamento Remoto

André Paim Gonçalves, Renan Miranda Richter, Leandro da Silva Lopes, Olympio Lucchini Coutinho¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo — Este artigo pretende fazer uma breve análise da influência da radiação gama em dispositivos fotônicos empregados em radares embarcados em satélites de baixa órbita. Onde estes satélites com radar embarcado apresentam grande vantagem em relação aos de imageamento óptico. A operação de tais radares tem grandes implicações em um projeto desse tipo de satélite, tais como o consumo de energia, peso e o volume. Explorando essa necessidade, este trabalho buscou avaliar uma possível solução de RF em fotônica (*down converter* fotônico baseado em grade de Bragg) que poderia ser utilizada por conta da frequência de operação, banda e outras vantagens. Foi realizado um breve estudo da influência do ambiente cósmico no desempenho deste *down converter*. Foi verificado que a radiação gama pode causar um desvio de 50 pm na grade de Bragg e que isto poderia inviabilizar o seu uso.

Palavras-chaves — *Down converter* fotônico, grade de Bragg, radiação gama.

I. INTRODUÇÃO

O uso de satélites que operam radar se mostra interessante para aplicações duais, tanto em aplicações operacionais para as Forças Singulares como para aplicações civis (desmatamento, agricultura e outros usos), pois não são dependentes das condições de visibilidade, quando se compara estes com os que operam câmeras ópticas. Essa característica é importante, quando este não depende da visibilidade, o satélite pode imagear a qualquer hora, pode otimizar seu posicionamento em relação ao Sol para captar energia solar em seus painéis solares e operar em horários onde as estações de recepção estão com mais tempo livre, evitando congestionamentos. Os radares para essas aplicações operam entre 40 GHz (banda K-alfa) e 300 MHz (banda P) (ou entre 0,8 cm e 100 cm) [1].

Um bom projeto de satélite tem que aperfeiçoar o uso de sua energia, quando se trata de radar, quanto mais potência, maior se torna o seu alcance. As tecnologias desenvolvidas com os conceitos de Rádio Frequência em Fotônica, isto é o uso de RF em fotônica, se tornam vantajosas por conta de seu pequeno volume, peso e economia de energia [2].

O emprego desses dispositivos fotônicos deve levar em conta que um projeto de missão espacial, bem sucedido, necessita que os componentes e, consequentemente, os sistemas embarcados funcionem corretamente durante todo o tempo previsto para a missão. No que tange a satélites, não há espaço para erros, pois uma vez lançado, poucos são os reparos possíveis. Todos os sistemas devem ser certificados ainda na fase de desenvolvimento do projeto. Em geral, para cada missão, o grau de confiabilidade nos sistemas é dependente de vários fatores, tais como a duração, o ambiente na qual ela se desenvolverá, a disponibilidade de orçamento e etc. Para

satélites de observação ou telecomunicações a duração varia de 3 a 10 anos [1].

Para este trabalho será considerado um satélite de vigilância que emprega órbita baixa. Para tal, a sua altitude poderá variar entre 700 a 1000 km. Postula-se que o satélite opera em órbita hélio-síncrona a uma altitude de 778 km e realiza 14 revoluções por dia. Diante de tais premissas, o estudo foi conduzido levando em conta um *down converter* fotônico baseado em grade de Bragg com fase deslocada. Este dispositivo se beneficiaria da possibilidade das altas frequências das portadoras de RF (ordem de dezenas de GHz), grade banda, baixo consumo de energia, pequeno peso e volume [2]. A sugestão de emprego seria como componente de um radar embarcado que opera na frequência de 40 GHz.

O artigo foi organizado em três seções. Na seção II abordou-se uma breve análise de um sistema óptico que faz conversão de frequências de RF em dezenas de GHz para 1 GHz, que faz uso de grade de Bragg com deslocamento de fase. Nesta seção também é desenvolvido uma análise da influência do ambiente espacial no dispositivo fotônico em questão. Na seção III foram feitas as considerações finais do artigo.

II. PROPOSTA DE UM CONVERTER FOTÔNICO

O *Down Converter* fotônico é baseado a partir da técnica de batimento de comprimento de ondas ópticas e conversão de modulação de fase em intensidade óptica, conforme mostrado na arquitetura apresentada na Fig. 1.

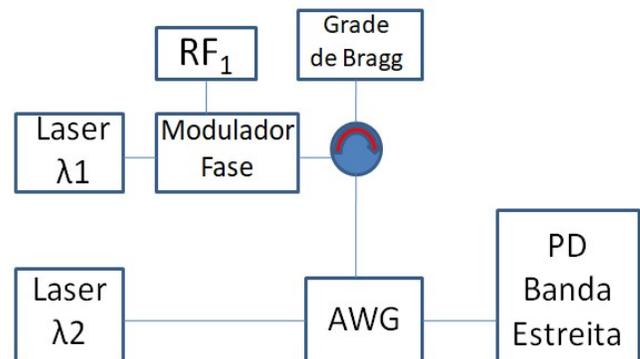


Fig. 1. *Down converter* proposto com batimento em comprimento de onda óptico e conversão de modulação óptica de fase em modulação de intensidade.

Nesta arquitetura, uma portadora óptica (E_{opt}) proveniente de um laser operando com frequência óptica (ω_o), é modulado em fase por um sinal na frequência de micro-ondas (V_{RF}). Os sinais referentes ao campo elétrico da portadora laser e ao sinal modulante podem ser expressos como:

$$E_{opt}(t) = E_0 e^{j\omega_0 t}, \quad (1)$$

onde é E_0 o campo elétrico óptico da saída do laser [V/m], ω_0 é a frequência angular óptica do laser [rad/s]; e

$$V_{RF}(t) = V \cos(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}), \quad (2)$$

onde V é tensão de pico do sinal de RF [V], ω_{RF} é a frequência angular do sinal de RF [rad/s] e φ_{RF} é a fase inicial do sinal de RF [rad].

A variação de fase do sinal óptico na saída do modulador pode ser expressa como [3]:

$$E_{PM}(t) = E_0 e^{j(\omega_0 t + \beta \cos(\omega_{RF} t + \varphi_{RF}))}, \quad (3)$$

Este sinal corresponde ao sinal óptico na saída do modulador de fase óptica da Fig.1. Na equação (3), o termo β corresponde ao índice de modulação de fase e é definido como [3]:

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

sendo este termo proporcional a tensão de pico (V) do sinal de RF aplicado na entrada do modulador e a tensão de meia onda do modulador de fase (V_π). Considerando uma condição especial de operação do modulador, a qual é denominada de regime de operação de pequenos sinais, em que $\beta \ll 1$, a equação (4) pode ser matematicamente reescrita de forma simplificada em função das equações de Bessel. Desta forma o sinal de saída do modulador no regime de operação de pequenos sinais pode ser expresso por [3]:

$$E_{PM} \approx E_0 J_0(\beta) e^{j(\omega_0 t)} + E_0 J_1(\beta) e^{j(\omega_0 t + \omega_{RF} t + \varphi_{RF} + \frac{\pi}{2})} - E_0 J_1(\beta) e^{j(\omega_0 t - \omega_{RF} t - \varphi_{RF} - \frac{\pi}{2})}, \quad (5)$$

onde, $J_0(\beta)$ e $J_1(\beta)$ são as função de Bessel de primeira espécie e ordem 0 e 1, respectivamente.

Este sinal de saída do modulador de fase é então acoplado a uma grade de Bragg em fibra óptica (FBG – *Fiber Bragg Grating*) com fase deslocada. Por meio de um circulador óptico, o sinal refletido é encaminhado para o combinador óptico, conforme se observa na Fig. 1. Esse tipo especial de grade de Bragg é caracterizado como um filtro óptico com um vale de baixa refletividade centrado dentro de uma faixa de operação com alta reflexão. O comprimento de onda de Bragg desse tipo de dispositivo pode chegar a largura de linha de 10 pm [2]. Este comportamento pode ser observado na Fig.2.

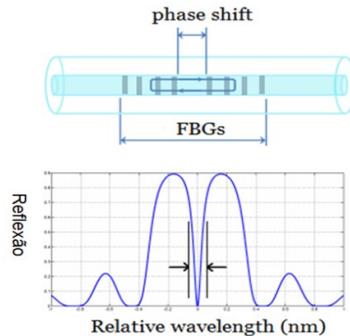


Fig. 2. Comportamento da grade de Bragg com fase deslocada genérica quanto sua refletividade [2].

O sinal óptico refletido pela FBG da Fig. 1 é expresso pela equação (6) e depende diretamente da resposta em frequência dos parâmetros de refletividade $r(\omega)$ e fase $\theta(\omega)$ da FBG. É importante observar que a FBG de fase deslocada é projetada para possuir um alto coeficiente de refletividade óptico, sendo praticamente constante para frequência de RF na região fora do vale [3].

$$E_{IM} \approx \sqrt{r(\omega_0)} E_0 J_0(\beta) e^{j(\omega_0 t + \theta(\omega_0))} + \sqrt{r(\omega_0 + \omega_{RF})} E_0 J_1(\beta) e^{j(\omega_0 t + \omega_{RF} t + \varphi_{RF} + \frac{\pi}{2} + \theta(\omega_0 + \omega_{RF}))} - \sqrt{r(\omega_0 - \omega_{RF})} E_0 J_1(\beta) e^{j(\omega_0 t - \omega_{RF} t - \varphi_{RF} - \frac{\pi}{2} + \theta(\omega_0 - \omega_{RF}))}, \quad (6)$$

Partindo de (6) e considerando que a grade de Bragg transmite a componente $\omega_0 + \omega_{RF}$ e reflete todos os outros componentes espectrais observa-se:

$$E_{IM} \approx \sqrt{r(\omega_0)} E_0 J_0(\beta) e^{j(\omega_0 t + \theta(\omega_0))} - \sqrt{r(\omega_0 - \omega_{RF})} E_0 J_1(\beta) e^{j(\omega_0 t - \omega_{RF} t - \varphi_{RF} - \frac{\pi}{2} + \theta(\omega_0 - \omega_{RF}))}, \quad (7)$$

Como observado na Fig. 1, o sinal refletido pela FBG é acoplado na entrada de um combinador óptico. Este último componente recebe um segundo sinal óptico que tem a sua frequência angular, ω_0 , deslocada de uma frequência angular igual ao que se deseja reduzir do sinal de RF ($\omega_0 - \omega_{ab}$). As frequências em questão seguem a relação $\omega_0 \gg \omega_{ab}$. A representação matemática desse sinal é:

$$E_{IM} \approx \sqrt{r(\omega_0)} E_0 J_0(\beta) e^{j(\omega_0 t + \theta(\omega_0))} + E_0 e^{j(\omega_0 t - \omega_{ab} t)} - \sqrt{r(\omega_0 - \omega_{RF})} E_0 J_1(\beta) e^{j(\omega_0 t - \omega_{RF} t - \varphi_{RF} - \frac{\pi}{2} + \theta(\omega_0 - \omega_{RF}))}, \quad (8)$$

No fotodetector, o sinal proveniente do combinador é convertido em um sinal de RF igual ao de entrada reduzido de ω_{ab} . A componente alternada (ac) do sinal de RF recuperado pode ser expressa por (9),

$$V(\omega_{RF}) \propto ac\{|E_{IM}(t)|^2\}, \quad (9)$$

Expandindo a equação (9) em função de (8) tem-se finalmente (10), a qual representa o sinal de RF na saída do *down converter* em função dos coeficientes de refletividade da FBG.

$$V(\omega_{RF}) \propto \sqrt{r(\omega_0)} E_0 J_0(\beta) e^{j(\omega_0 t + \theta(\omega_0))} + E_0 e^{j(\omega_0 t - \omega_{ab} t)} - \sqrt{r(\omega_0 - \omega_{RF})} E_0 J_1(\beta) e^{j(\omega_0 t - \omega_{RF} t - \varphi_{RF} - \frac{\pi}{2} + \theta(\omega_0 - \omega_{RF}))} \times \sqrt{r(\omega_0)} E_0 J_0(\beta) e^{-j(\omega_0 t + \theta(\omega_0))} + E_0 e^{-j(\omega_0 t - \omega_{ab} t)} - \sqrt{r(\omega_0 - \omega_{RF})} E_0 J_1(\beta) e^{-j(\omega_0 t - \omega_{RF} t - \varphi_{RF} - \frac{\pi}{2} + \theta(\omega_0 - \omega_{RF}))} \quad (10)$$

Desenvolvendo (10), o componente ac é:

$$\begin{aligned}
 & V(\omega_{RF}) \\
 & \propto \sqrt{r(\omega_0)} E_0^2 J_0(\beta) \cos(\omega_{abt} - \theta(\omega_0)) \\
 & - \sqrt{r(\omega_0 - \omega_{RF})} \sqrt{r(\omega_0)} E_0^2 J_0(\beta) J_1(\beta) \cos\left(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}\right. \\
 & \left. + \frac{\pi}{2} - \theta(\omega_0 - \omega_{RF}) + \theta(\omega_0)\right) \\
 & + \sqrt{r(\omega_0 - \omega_{RF})} E_0^2 J_0(\beta) \cos\left(\omega_{RF}t - \omega_{abt} + \varphi_{RF} + \frac{\pi}{2}\right. \\
 & \left. - \theta(\omega_0 - \omega_{RF})\right)
 \end{aligned} \quad (11)$$

Observando o resultado em (11), percebe-se que na saída do fotodetector aparecem três frequências angulares ω_{RF} , ω_{ab} e $\omega_{RF} - \omega_{ab}$, considerando que $\omega_{RF} > \omega_{ab} > \omega_{RF} - \omega_{ab}$. Com um filtro passa baixa ou um fotodetector que tenha uma banda de RF baixa é possível separar o sinal menor frequência dos demais.

Para demonstrar o conceito anteriormente exposto, foi empregado o *software OptSystem* da *Optwave* seguindo o esquema da Fig.1. O sinal de RF na entrada do modulador de fase foi 40 GHz, o sinal óptico do laser que sofreu modulação foi 139,14 THz e o laser de batimento foi de 139,139 THz. O resultado foi o abaixamento de 40 GHz para 1 GHz conforme apresentado na Fig.3.

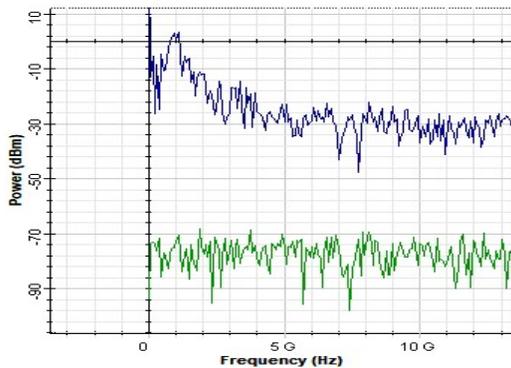


Fig. 3. Espectro na saída do *down converter* (cor azul), onde o sinal de entrada de 40 GHz foi convertido para 1 GHz. Simulação realizada pelo *software OptSystem* da empresa *Optwave*. O sinal na cor verde é o nível de ruído no receptor.

A. Impacto da Radiação Gama na Grade de Bragg

As grades de Bragg com fase deslocada empregam usualmente fibras monomodos comerciais padrão *corning SMF 28*. Elas são dopadas com Germânio para aumentar a fotosensibilidade ao laser no comprimento de onda no ultravioleta para a gravação da grade de Bragg. Nesse processo há a inserção de Hidrogênio para aumentar o contraste de índice de refração [2].

Com a exposição dessa grade à radiação gama, o índice de refração se altera e, com isso, muda o comprimento de onda de máxima reflexão da grade.

Para minorar esse efeito da radiação na degradação da grade, dentro do satélite, é possível usar anteparos absorvedores de alumínio com pinturas especiais [1]. Contudo, conforme se coloca anteparos mais grossos e/ou pinturas, o satélite terá aumentado seu peso. Esse aumento de peso poderá acarretar, por exemplo, a redução de combustíveis para correção de órbita, reduzindo sua vida útil. Para o satélite proposto neste estudo, postula-se que a espessura desse anteparo seja de 5 mm. Na Fig.4 observa-se que espessura do

absorvedor de alumínio da ordem de 5 mm é suficiente para blindar o componente eletrônico e de fônica de forma a reduzir a dose de radiação ao mínimo a ser recebida. Isto se deve as curvas saturarem na vizinhança dos 5 mm, qualquer valor acima dessa medida seria aumento de peso desnecessário.

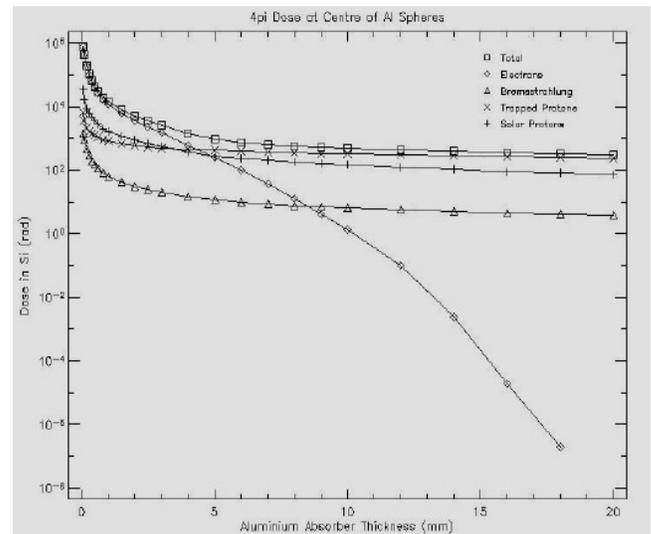


Fig. 4. Dose de radiação em Si, durante uma ano de órbita, para o satélite CBERS1 e por conveniência é igual ao postulado neste trabalho[1].

Como há a previsão de emprego desse anteparo, o foco desse estudo vai ser em relação à radiação gama.

Muitos estudos foram feitos sobre os efeitos da radiação gama ionizante e da sua fonte natural para o ambiente de voo espacial, em fibra ótica. Informações podem ser encontradas na literatura quanto à dependência do desempenho de uma fibra em um ambiente de radiação em relação aos materiais, os processos, os revestimentos utilizados em sua confecção, o tipo de dose, a taxa e dose total. Tempos de recuperação, *self-annealing* e os efeitos de *photobleaching* também foram bem documentados. Fabricantes interessados no mercado de voos espaciais estão cientes dessas dependências e desenvolveram processos de fabricação de produtos que pode suportar dezenas a centenas de dose total de kRads (Si), com um aumento de menos de um dB de perda por quilômetro de fibra [4]-[8]. A fibra ótica “escurecerá” devido à radiação ionizante, isto é, por conta da criação de centros de absorção, onde elementos químicos indesejados e outros defeitos ópticos se estabelecem nessa fibra. Geralmente, uma fibra sofrerá defeitos durante o processo de produção tornando-os difíceis de isolar e eliminar, independentemente da pureza da pré-forma de vidro [4]-[8].

Para o caso de grades de Bragg, empregam-se o Germânio para dopar o núcleo da fibra visando elevar o índice de refração deste guia de onda durante a gravação da grade, isto se deve ao aumento da sensibilidade à radiação. Cabe ressaltar que o Fósforo quando atua como dopante para o núcleo da fibra ou do revestimento mostrou-se não aceitável para o uso em ambientes espaciais [4].

Em temperaturas mais baixas o *annealing* dos centros de cor diminui. Em geral, é melhor usar sílica pura em aplicações espaciais quando as necessidades de dose total excedam 5 kRads (Si) [5].

Para se verificar como as grades de Bragg gravadas em fibra óticas comerciais se comportam em relação às doses de radiação gama quanto ao deslocamento do comprimento de onda de Bragg da grade. Foram escolhidas três fibras óticas

comerciais no padrão *corning* SMF 28 provenientes de três fabricantes de fibra óptica distintos. Os resultados são observados na Fig. 5 [9].

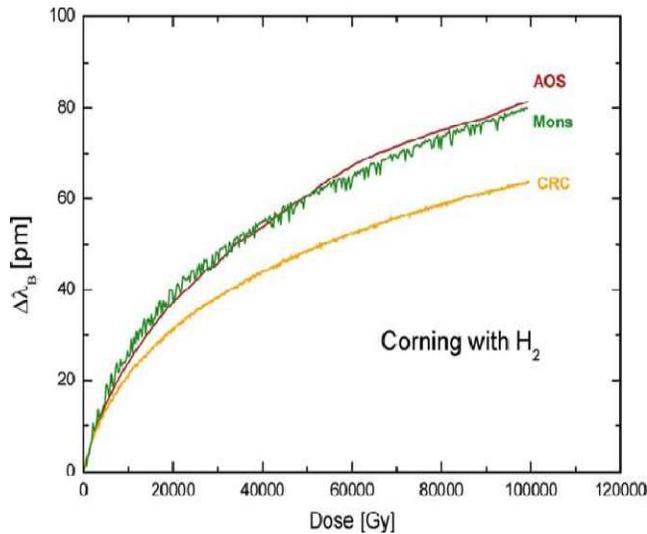


Fig. 5. Variação do comprimento de onda de máxima reflexão da grade em função da dose de radiação em Gray [Gy], cabe ressaltar que 1 Gy = 100 rad[9].

O comportamento observado na Fig. 5 não é linear e pelo intervalo observado para a dosagem, é possível perceber que não há saturação. Como há a previsão de operação do satélite em um período de 3 a 10 anos e como a temperatura para este estudo é considerada constante e bem definida, é possível inferir que a dose de radiação gama acumulada atinja valores expressivos. Com base da Fig. 5, considera-se para este trabalho uma dose acumulada de 40 kGy que acarreta em 50 pm de variação do comprimento de onda de Bragg. Observa-se que essa dose é compatível com a Fig.4, onde a dose acumulada total para um anteparo de 5 mm é da ordem de dezenas de kGy em mais de 3 anos.

Nesse contexto, onde o índice de refração sofre alterações com a radiação gama, a grade de Bragg com fase deslocada poderá se tornar muito sensível a esse efeito. A largura de linha da grade de Bragg com fase deslocada é em torno de 150 pm e a radiação gama causa um deslocamento no comprimento de onda de Bragg de 50 pm. Isto poderá fazer com que um terço do sinal seja perdido por conta da perda de sintonia. O efeito poderá ser mais grave quando se considera a largura de linha da grade de Bragg em torno de 10 pm como descrito por [2].

Para verificar como o *down converter*, com um deslocamento de 50 pm em seu comprimento de onda de Bragg, se comportaria, foi simulado este dispositivo, conforme a Fig. 1, no *software OptSystem* da *Optwave* com uma grade sem a influência e depois com a influência dos 50 pm de deslocamento. Estes comportamentos podem ser observados nas Fig. 6 e 7 respectivamente.

Cabe ressaltar que foi gerado um sinal com a portadora de RF de 40 GHz, foram sintonizados o laser que incide no modulador de fase e o laser de batimento com frequências de 193,1 THz e 193,139 THz respectivamente. A grade de Bragg tinha o seu comprimento de onda sintonizado em 193,140 THz.

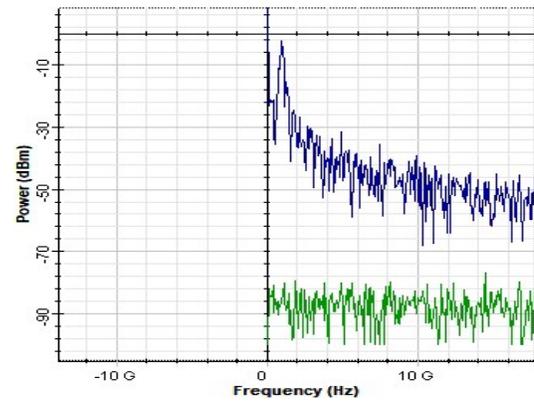


Fig. 6. Resultado da simulação da redução de um sinal com a portadora de RF centrada em 40 GHz. O resultado mostra um abaixamento de 39 GHz sem a influência da radiação gama. O sinal na cor verde é o nível de ruído no receptor e o azul é o sinal de RF simulado.

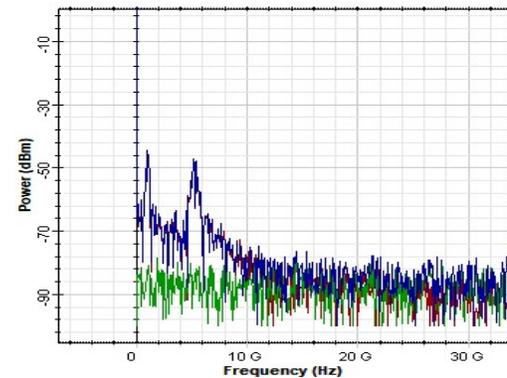


Fig. 7. Resultado da simulação da redução de um sinal com a portadora de RF centrada em 40 GHz. O resultado mostra um abaixamento de 39 GHz com a influência da radiação gama, onde o comprimento de onda de Bragg foi deslocado de 50 pm. O sinal na cor verde é o nível de ruído no receptor e o azul é o sinal de RF simulado.

Como na saída do *down converter* é esperado ter um circuito sintonizado na frequência de saída deste conversor, o sinal com a influência da radiação gama tem uma diminuição em torno 50 dB, o que poderá inviabilizar a sua recepção, dependendo do nível do ruído. O segundo sinal, em torno de 5 GHz, surgiu com o deslocamento da grade em 50 pm.

III. CONCLUSÃO

Com o emprego de radares embarcados em satélites que operam em baixas órbitas podem trazer um ganho operacional para as Forças Singulares e também para outras atividades duais como a agricultura, desmatamento e outras, se torna imprescindível o seu desenvolvimento. Porém, o embarque de radares em satélites exige muita energia e espaço. Uma solução para esse problema seria o emprego de RF em fotônica. Este trabalho buscou fazer uma abordagem simplificada do comportamento de um dispositivo fotônico baseado na grade de Bragg (*down converter* fotônico), que tem emprego em circuitos de RF em radar, sob influência do ambiente cósmico. Neste estudo foi observado que o emprego destes dispositivos tem seu desempenho dependente do material empregado, proteções empregadas e doses de radiações expostas.

Como a operação destes satélites pode durar de 3 a 10 anos, foi possível estimar uma dose acumulada nesse período e verificar a sua influência. Considerou-se que essa dose deslocaria a resposta da grade de Bragg em 50 pm. Este deslocamento foi capaz de atenuar o sinal em 50 dB na saída do *down converter*, o que poderia inviabilizar o seu uso.

REFERÊNCIAS

- [1] Claro, L. Henrique; Santos, J. Antonio, “Danos de Radiação em Componentes Eletrônicos nas Aplicações Aeroespaciais,” International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2005, Santos, SP, Brazil, Sep, 2005.
- [2] R. Kashyap, P. F. Mckee, and D. Armes, “UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibres using phase-shifted phase masks”, *Electron. Lett.*, 30, pp. 1977-1978, 1994.
- [3] Ivo, F. Streitenberger; Baroni, R. de Faria; Coutinho, O. Luchini “Filtro de RF Fotônico Sintonizável por Variação de Temperatura em Laser DFB”, anais do XIX Simpósio de Aplicações Operacionais em Área de Defesa, São José dos Campos, SP, Brasil, 2017.
- [4] Lisa McMurray, "Analysis of Kevlar Strength Members for Space Qualified Fiber Optic Cables," Martin Marietta Aerospace Group, Space Systems Company.
- [5] A. Holmes-Siedle, *Handbook of Radiation Effects*, 2nd ed., Oxford University Press, New York -USA (2002).
- [6] E. J. Friebele, "Survivability of Photonic Systems in Space" DoD Fiber Optics Conference, McLean VA, March 24-27, 1992.
- [7] E. J. Friebele, "Photonics in the Space Environment," IEEE Nuclear Space Radiation Effects Conference, San Diego CA, 1991.
- [8] Akira Iino, Junich Tamura, "Radiation Resistivity in Silica Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6(2), pp. 145-149, IEEE 1988.
- [9] Stefan K.Hoeffgen, Henning Henschel, Jochen Kuhnhenh, Udo Weinand, Christophe Caucheteur, Dan Grobnc and Steven J. Mihailov, "Comparison of the Radiation Sensitivity of Fiber Bragg Gratings Made by Four Different Manufacturers," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol.58, No.3, pp.906-909, June 2010.