

Simulação de um Transmissor de Dados Filtered-OQPSK em Banda X de 450 Mbps para Missões EESS de Pequeno e Médio Porte

Rodolfo Antonio da Silva Araujo ¹, Marcelo Lopes de Oliveira e Souza ², Walter
Abrahão dos Santos ¹

^{1,2}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Aluno de Doutorado do Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais - ETE, Opção
Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – CSE, do INPE

²Professor Colaborador no Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais - ETE, do INPE

rodolfo.araujo@inpe.br

Resumo. Devida às crescentes necessidades de imagens de sensoriamento remoto de todo o território brasileiro, como relevos e vegetação, usando sensor SAR ou câmera de ultra-alta resolução, um volume muito grande de dados de imagem é gerada para ser transmitida do espaço para a Terra. A transmissão de ultra-alta taxa de dados requer o uso de transmissores de dados (DT) com maior largura de banda e alta eficiência de potência de RF. As imposições atuais promovem o uso de técnicas de modulação de alta eficiência em taxas superiores às utilizadas atualmente. Ademais, há a necessidade de focar em missões que devem ser desenvolvidas usando plataformas de satélites pequenos. O artigo detalha topologias de DT e técnicas de modulação eficientes recomendadas pela ESA. As abordagens de Engenharia de Requisitos e Sistemas são praticadas, estabelecendo os requisitos de desempenho e propondo a solução de engenharia de um transmissor em banda X a altas taxas. Resultados da simulação do DT proposto e o cálculo do orçamento do enlace do sistema demonstram a conformidade com os requisitos especificados.

Palavras-chave: Transmissor de dados; Alta Taxa; Modulação; OQPSK.

1. Introdução

Diferentes tipos de detecção são necessários para monitorar a floresta tropical e outros relevos de um diverso território como a do Brasil, tais como: abaixo das nuvens, abaixo das copas das árvores, mata atlântica contendo níveis de terra distintos de outras florestas, etc. Para isto, além de satélites de observação da Terra equipados com cargas úteis de detecção óptica passiva de média ou alta resolução, devem ser usados sensores ativos de micro-ondas, como SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Algumas aplicações requerem

satélites com resoluções espaciais ultra-altas, como o satélite americano WorldView-3 com resolução de 0,31m, conforme (DIGITALGLOBE, 2014). A consequência do uso de imagens SAR / sensores ópticos de ultra-alta resolução é a aumento do volume de dados em comparação com os dados gerados por uma câmera de imagem de média/alta resolução. Portanto, o requisito de largura de banda do espectro será maior; e será obrigatório aumentar a potência do sinal de RF, conforme explicado em (RAO, 2009). Em sistemas de comunicações para Serviços de Exploração da Terra Satélite (EESS) definidos na norma (ECSS, 2011), como satélites de observação da Terra, as faixas de frequência e a largura de banda máxima para transmissão de dados são regulamentadas pela União Internacional de Telecomunicações (ITU, 2008). De acordo com esses regulamentos, a largura de banda máxima em banda X é de 375 MHz (8,025 GHz a 8,400 GHz), que usando a técnica de modulação QPSK, como a dos satélites CBERS-4 e Amazonia-1, o transmissor de dados (DT) pode transmitir ~ 400 Mbps. Para operar em altas taxas de dados, o DT deve adotar esquemas de modulação com maior largura de banda e eficiência de potência de RF. Neste artigo, o objetivo principal é apresentar o estudo e projeto de topologias, modelagem, simulação e resultados do desenvolvimento de um transmissor de alta taxa de dados para ser empregado em satélites de pequeno porte.

2. Metodologia

2.1. Revisão de cálculo do orçamento do enlace

Para uma técnica de modulação específica, a relação E_b/N_0 (energia de bit pela densidade espectral de potência de ruído) deve ser calculada para cada valor de BER (taxa de erro de bit) especificado. As bases de processamento de imagem, por (LIEW, 2001), mostra que para sistemas de transmissão de dados digitais de sensoriamento remoto, o valor ideal de BER é 10^{-6} no máximo.

O nível do sinal da portadora na entrada front-end do receptor da estação terrestre é dado por (MARAL, 2009):

$$c_d = p_s \cdot g_{st} \cdot g_{er} / l_d \quad (W) \quad (1)$$

Onde,

c_d é a potência da portadora em W;

p_s é a potência de saída do DT em;

g_{st} é o ganho da antena do DT do satélite para a estação terrena;

g_{er} é o ganho da antena da estação de recepção;

l_d é a perda de espaço livre no enlace de descida.

E:

$$p_s \cdot g_{st} = (eirp)_s$$

é a potência irradiada isotrópica efetiva do satélite. Desta forma,

$$c_d = (eirp)_s \cdot g_{er} / l_d \quad (W) \quad (2)$$

Portanto, dividindo ambos os lados da equação acima por n_0 (densidade espectral de potência de ruído), temos:

$$(c/n_0)_d = (eirp)_s \cdot g_{er} / (l_d \cdot kT_d) \text{ (W/Hz)} \quad (3)$$

Sendo $kT_d = n_0$

Onde

T_d é a temperatura equivalente de ruído da estação terrena (K);

k é a constante de Boltzmann = $1.38064852 \times 10^{-23} \cdot m^2 kgs^{-2} K^{-1}$

Como,

$$g_{er}/T_d = (g/T)_e$$

$(g/T)_e$ é a figura de mérito ganho para temperatura de ruído da antena estação terrena, em K^{-1} .

$$\therefore (c/n_0)_d = (eirp)_s \cdot (g/T)_e / l_d \cdot k^{-1} \text{ (W/Hz)} \quad (4)$$

e l_d pode ser calculado através da fórmula abaixo descrita por (PRITCHARD, 1993)

$$l_d = \left(\frac{4\pi d}{\lambda_c} \right)^2 \quad (5)$$

Onde:

λ_c é o comprimento de onda na frequência central (f_c)

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \times 10^8 m/s}{f_c \text{ Hz}}$$

d é a distância real entre o satélite e a antena receptora (satélite em órbita LEO), dada por:

$$d = \sqrt{(R_e + h)^2 - (R_e \cos \theta)^2} - R_e \sin \theta \quad (6)$$

Onde:

R_e é o raio médio da Terra ≈ 6371 km;

h é a altitude do satélite no Nadir (elevação de 90°);

θ é o ângulo de elevação da antena de recepção

A fórmula 4 é frequentemente expressa em decibéis

$$(C/N_0)_d = (EIRP)_s + (G/T)_e - L_d + 228.6 \text{ (dBm/Hz)} \quad (7)$$

Como trabalhamos com sinais digitais temos que calcular o $(E_b/N_0)_d$, podemos usar a relação:

$$e_b/n_0 = c/n_0 \times 1/R_b \quad (8)$$

Assim,

$$(C/N_0)_d = (E_b/N_0)_d + 10 \log R_b \quad (9)$$

Onde R_b é a taxa de bits transmitida, em Mbps, e a E_b/N_0 é a requerida para o sistema de transmissão e depende do esquema de modulação que será empregado. Normalmente, uma margem no enlace de descida de pelo menos 3 dB é usada.

$$\begin{aligned} (E_b/N_0)_d &= (E_b/N_0)_{req} + \text{MARGEM} \\ &= (E_b/N_0)_{req} + 3dB \end{aligned} \quad (10)$$

A expressão final fica:

$$\begin{aligned} (E_b/N_0)_{req} &= (EIRP)_s + (G/T)_e - L_d - L_o - 10 \log R_b - 3 \\ &\quad + 228.6 \end{aligned} \quad (11)$$

2.2. Topologias de Transmissores de Dados de Altas taxas

Os fatores fundamentais que devem ser considerados na transmissão de alta taxa de dados, destacados por LIU (2013), são:

- i. Requisito de BER para processamento de imagem;
- ii. Minimizar a energia de bits necessária sobre a densidade espectral de potência de ruído (E_b/N_0) para um determinado BER;
- iii. Minimizar/otimizar a largura de banda ocupada do sistema;
- iv. Reduzir a complexidade do sistema e os custos para aplicação em pequenos satélites.

As arquiteturas funcionais básicas do DT podem ser encomendadas em três classes principais:

1) Síntese e modulação direta em frequência na banda X onde se obtém a compactação máxima do sistema.

Atualmente, devido às tecnologias avançadas de componentes espaciais e ao crescente uso de componentes *Commercial-Off-The-Shelf* (COTS) para aplicações de pequenos satélites, como destacado por (COLE, 2015), a disponibilidade de componentes para aplicação direta em banda X está consolidada. Algumas restrições relacionadas ao controle de exportação de dispositivos de RF específicos podem ocorrer devido ao Regulamento Internacional de Tráfego de Armas (ITAR), encontrado em (U.S. DEPARTMENT OF STATE, 1993), que deve ser considerado na fase inicial do projeto de aquisição de componentes.

A Figura 6 mostra a topologia descrita acima, onde o subsistema DT tende a ter menor volume e massa. O sintetizador de banda X, o modulador de banda X, o pré-amplificador e o filtro passa faixa (BPF) formam a célula básica DT. O sinal de saída de RF de

transmissão é amplificado pelo *High Power Amplifier*-HPA e o sinal é conformado por um BPF mecânico com alto Q, suprimindo os lóbulos secundários do sinal modulado.

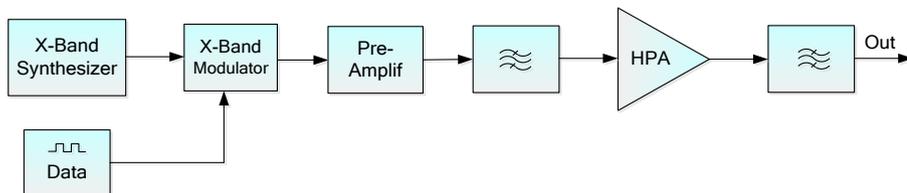


Figura 1. Topologia1: DT com geração e modulação direta da banda X.

2) Sintetização de frequência em uma frequência intermediária (IF), geralmente banda S, devido à alta disponibilidade e confiabilidade dos componentes qualificados para o espaço de prateleira. A modulação é realizada em banda S e utiliza-se um conversor ascendente para a banda X (mixer); neste caso a compactação do subsistema é média. O diagrama em blocos é mostrado na Figura 2.

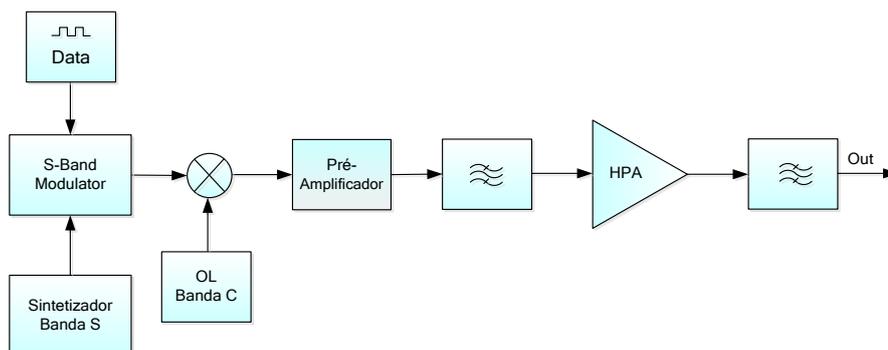


Figura 2. Topologia2: DT com geração e modulação em banda S e *up-conversion* para banda X.

2.2. Design do DT

Para o requisito de $R_b = 450$ Mbps, o $BW = 450$ MHz para a técnica de modulação QPSK, que foi empregada nos satélites CBERS-4 e Amazonia-1. Se utilizarmos o esquema básico de modulação 8PSK, o $BW = 300$ MHz ($2/3$ do valor de QPSK), mas é necessário aumentar a potência de saída de RF em 3,45 dB.

Se utilizarmos a técnica de modulação Filtered-OQPSK com $roll-off = 0,5$ (do filtro), nós temos um $BW = 352,4$ MHz (valor confirmado pela simulação), atendendo ao requisito máximo de BW de 375 MHz.

Várias simulações foram realizadas com o mesmo Filtered-OQPSK e o valor de $R_b = 475$ Mbps foi obtido para o limite máximo de $BW = 375$ MHz.

Por este motivo, selecionamos e implementamos a modulação Filtered-OQPSK para um DT da topologia 2 da Figura 2 que analisamos e simulamos neste artigo.

2.3. Sistema de Comunicação Satélite-Estação de Recepção

O modelo de transmissão de dados de sensoriamento remoto de um satélite de observação da Terra, segundo (LIU, 2013), é ilustrado na Figura 3.

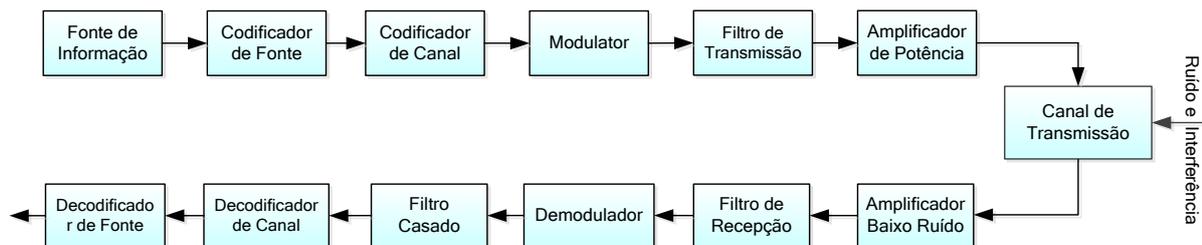


Figura 3. Modelo do sistema de transmissão de dados de satélite de observação da Terra. Fonte: Adaptado de LIU (2013).

A seguir, são destacados aspectos típicos de alguns dos blocos do modelo acima.

i. Fonte de informação:

As informações de sensoriamento remoto são principalmente informações de imagem mais dados auxiliares, e, geralmente, as imagens são sinais analógicos digitalizados (amostrados e quantizados) provenientes de câmera óptica com sensor CCD ou CMOS, sensor infravermelho e de sensores ativos como o SAR e o LASER, etc.

ii. Codificação da fonte e decodificação:

A codificação da fonte de informação é a conversão da informação de entrada numa sequência digital apropriada para o próximo bloco do transmissor. A fim de reduzir a taxa de bits a ser transmitida com os propósitos de reduzir a largura de banda, economizar potência e otimizar a capacidade de armazenamento, uma das técnicas importantes usada na codificação da fonte de informação é a compressão de dados.

iii. Técnicas de codificação/decodificação de canal:

Em sistemas de transmissão de dados a taxa de erro de bits requerida é extremamente baixa para os serviços de observação da Terra se comparado com outros serviços de comunicação terrestre. Portanto, pode ser necessário selecionar um método de controle de erros com grande capacidade de correção de erros. Para um satélite de observação da Terra com um subsistema de transmissão de dados a altas taxas, mas com uma largura de banda limitada, o método combinando codificadores de bloco com codificação convolucional pode ser usado para realizar o controle de erro sob potência e banda limitada (por exemplo, o RS/LDPC).

2.3.1 Modelagem do sistema de comunicação

Na Figura 4 é mostrado o sistema de comunicação completo que foi utilizado para a simulação. Neste diagrama constam detalhadamente todos os blocos de transmissão e recepção, além do canal com ruído branco Gaussiano.

3. Resultados e Discussão

3.1. Resultados dos Testes da Modelagem e Simulação

Nesta seção, mostramos o DT da Figura 4 com os resultados de desempenho da modulação OQPSK Filtrada, bem como avaliamos os efeitos dos parâmetros especificados e medidos incorporados na simulação.

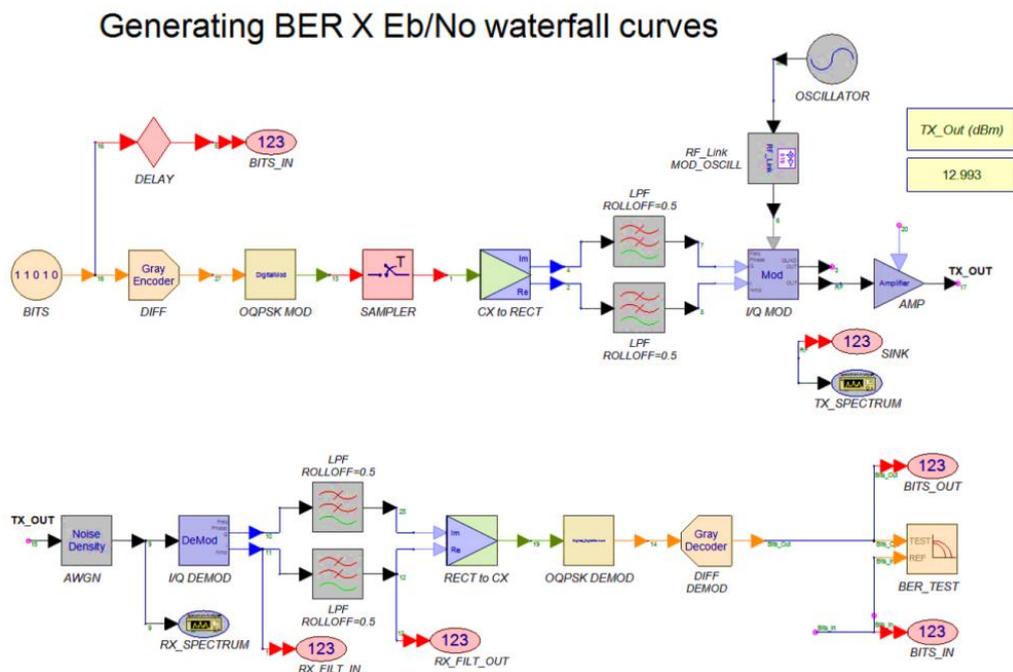


Figura 4. Sistema de comunicação global simulado - o DT está na parte superior.

- **Desempenho do DT em relação ao BER:**

Analisando a Figura 5 podemos obter os valores de BER para o transmissor real onde nós podemos ver o efeito dos resultados práticos do projeto na simulação. Para um BER de 10^{-6} , o valor teórico requerido de E_b/N_0 é de 10,5 dB e, o valor prático de E_b/N_0 para o mesmo BER é de 11,75 dB (da curva design), uma perda de 1,25 dB, sendo 0,5 dB da contribuição de codificação diferencial e 0,75 dB de perda do DT implementado.

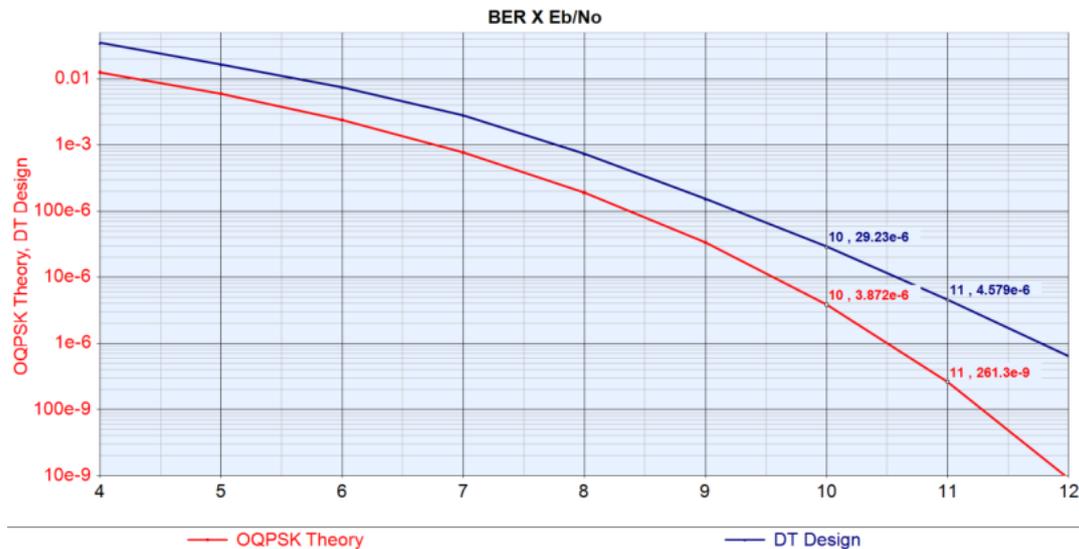


Figure 5. Curva em cachoeira do BER X E_b/N_o para o DT com parâmetros práticos dos módulos.

- **Largura de banda ocupada no espectro**

Na saída do DT, após o amplificador na saída do modulador, foi medido o espectro modulado, mostrado na Figura 4.

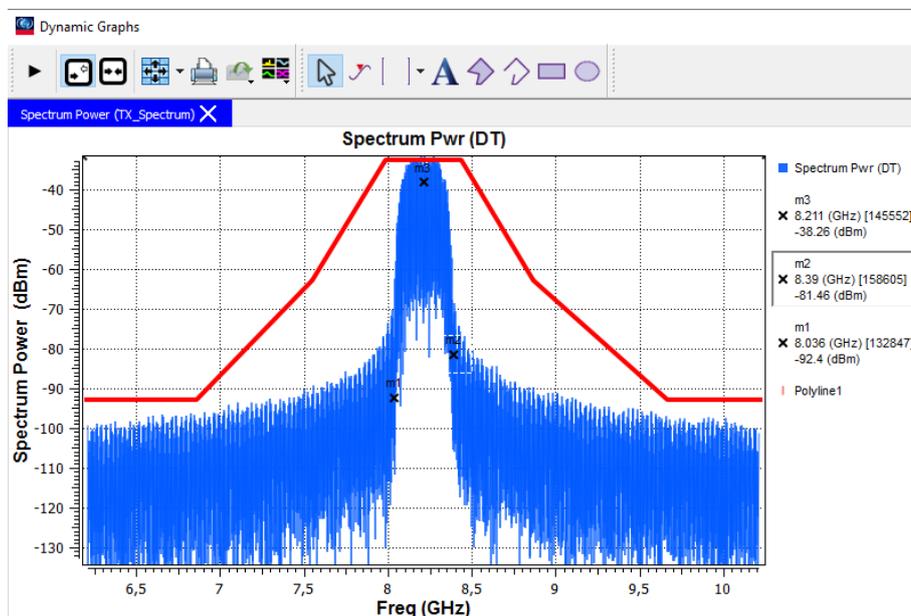


Figura 6. Espectro de saída do DT com limites de emissão - a máscara CCSDS (2009) em vermelho.

- Efeitos da não linearidade do HPA TWTA (*Traveling Wave Tube Amplifier*):

A Figura 7 apresenta a contribuição adicional de perda que devemos considerar no enlace devido ao uso do TWTA operando na saturação.

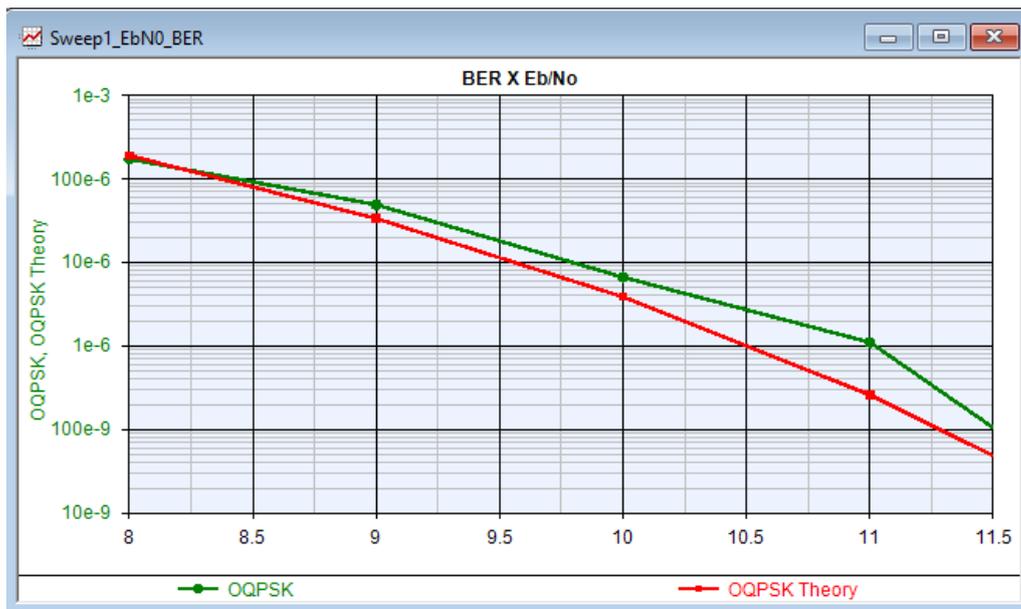


Figure 7. Contribuição na perda de E_b/N_0 pela TWTA operando na saturação.

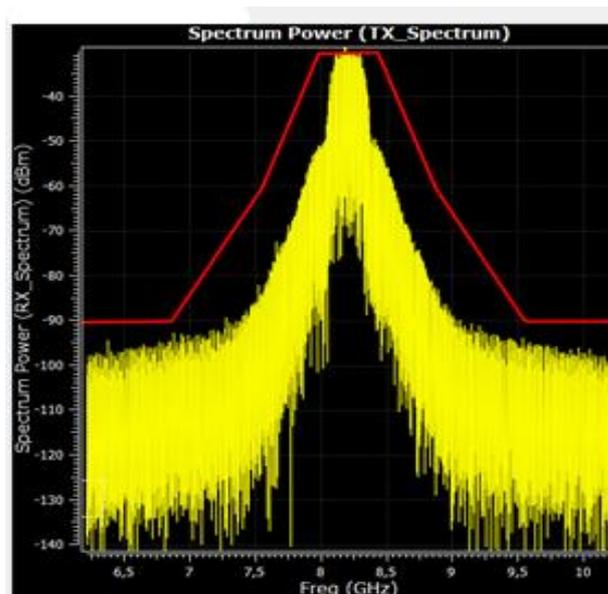


Figure 8. Recrescimento do espectro devido à não linearidade do TWTA saturado.

O efeito não linear do TWTA resultou no chamado recrescimento espectral, que contribuiu para um aumento da perda do sistema em 0,5 dB. A Figura 8 mostra no analisador de espectro o efeito de recrescimento espectral.

4. Conclusão

O artigo apresentou uma solução de engenharia e a simulação de um projeto completo do canal de transmissão com, geração de dados digitais, o DT, canal de transmissão e módulo de recepção/demodulação, mostrando o atendimento dos principais requisitos do sistema para atender a margem do enlace, superior ao mínimo requerido, e demonstrando a viabilidade da proposta.

Foi avaliada a potencialidade do uso da técnica de modulação Filtered-OQPSK com $roll-off = 0,5$, onde os resultados da simulação mostraram a eficiência da técnica selecionada para altas taxas de dados, a conformidade com o enlace, largura de banda do espectro, BER e requisitos de potência de RF.

Referências

CCSDS. CONSULTATIVE COMMITTEE FOR SPACE DATA SYSTEMS. CCSDS 413.0-G-2 – BANDWIDTH-EFFICIENT MODULATIONS SUMMARY OF DEFINITION, IMPLEMENTATION, AND PERFORMANCE. Green Book, October 2009.

COLE, S. Small Satellites Increasingly Tapping COTS Components. Article in Military Embedded Systems, published on June 8th, 2015. Disponível em: <http://mil-embedded.com/articles/small-tapping-cots-components/>

DIGITALGLOBE. WorldView-3 Data Sheet, 09/2014. Disponível em: <https://www.digitalglobe.com/resources/satellite-information>

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). ECSS-E-ST-50-05C Rev.2 - Space Engineering – Radio Frequency and Modulation. Noordwijk, The Netherlands, 4 October 2011.

MARAL, G.; BOUSQUET, M.; SUN, Z. Communications Systems: Systems, Techniques and Technology. 5th ed. Wiley, 2009.

RAO, V. S.; PAL, S. High Bit Rate Data Transmitting System for Remote Sensing Satellites. High Frequency Electronics – Copyright © Summit Technical Media, LLC, April 2009.

PRITCHARD, W. L.; SUYDERHOUD, H. G. AND NELSON, R. A. Satellite Communication Systems Engineering. New Jersey, Prentice Hall, 1993.

U.S. DEPARTMENT OF STATE. Directorate of Defense Trade Controls (DDTC). ITAR, 1993. Disponível em: https://www.pmdtc.state.gov/ddtc_public