TÉCNICA DE RÁDIO COGNITIVO PARA A MITIGAÇÃO DE FALHAS NA RECEPÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITES DE OBSERVAÇÃO DA TERRA CAUSADAS POR SINAIS INTERFERENTES EM TERRA

Rodolfo Antonio da Silva Araujo [1], Walter Abrahão dos Santos [1], Luciano Barros Cardoso da Silva [1] e Marcelo Lopes de Oliveira e Souza [1]

[1] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Avenida dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja - São José dos Campos/SP - CEP 12227-010
rodolfo.araujo@inpe.br; walter.santos@inpe.br; luciano.silva@inpe.br; marcelo.souza@inpe.br

RESUMO

As próximas missões de Satélites de Observação da Terra (EOS) requerem alto desempenho no enlace de transmissão de altas taxas de dados, com destaque para a técnica de modulação e codificação para elevar a eficiência espectral (bits/Hz) e de potência de RF. Em paralelo, existem técnicas de Rádio Cognitivo que viabilizam a coexistência espectral entre serviços fixos (em terra) e por satélite. Nesse artigo, estas estratégias são associadas para atingir o uso eficiente do espectro de radiofrequências disponível. Inicialmente, são apresentados aspectos importantes sobre consciência e exploração espectrais e seus recursos para EOS. Depois, é proposta uma técnica para permitir a coexistência entre serviços fixos e por satélite nas mesmas frequências, para que não ocorram falhas na recepção de imagens. Por fim, é apresentado um estudo de caso realístico demonstrando a eficiência desta técnica para uma determinada passagem do satélite com a presença de interferências.

Palavras-chave — Coexistência Espectral, EOS, MODCOD, Rádio Cognitivo.

ABSTRACT

Upcoming Earth Observation Satellite (EOS) missions require improved performance in high data rate downlink transmission, focusing on modulation and coding techniques to increase RF power and spectral (bits/Hz) efficiencies. In parallel, Cognitive Radio techniques enable spectral coexistence between satellite and fixed (terrestrial) services. In this paper, these strategies are combined to achieve efficient use of available spectrum. First, important aspects of spectral awareness and exploration and their resources for EOS are presented. Then, a technique is proposed to allow coexistence between fixed and satellite services on the same frequencies avoiding the occurrence of failures in the image data reception. Finally, we present a realistic case study attesting that the technique is efficient for a given satellite pass with presence of interferences.

Key words — *Cognitive Radio, EOS, MODCOD, Spectral Coexistence.*

1. INTRODUÇÃO

A demanda por sistemas de comunicação sem fio de banda larga espectral (alto *throughput*) requer o uso eficiente dos recursos do espectro de rádio, enquanto sua provisão é limitada e subutilizada [1]. Isto se deve à alocação das faixas de frequências para sistemas sem fio licenciados e padronizados primários [2]. Dessa forma, demonstra-se que as políticas regionais de alocação do espectro paralisam uma mobilidade autônoma dos sistemas de radiocomunicação.

Nessa direção, considerando futuras missões de Satélites de Observação Terra (EOS) [3], esforços vêm sendo direcionados para o emprego de satélites de pequeno e médio porte com cargas úteis como sensores óticos de ultra-alta resolução ou sensores de micro-ondas ativos e.g., Radares de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar-SAR*), que vão exigir maior largura de banda: resultado da maior taxa de dados gerados por eles.

Ao mesmo tempo, demonstra-se que eventos de falhas em imagens de sensoriamento remoto, transmitidas pelos satélites, são provocados por sinais de rádio interferentes que surgem nas Estações de Recepção de Imagem (ERG) de satélites em geral provenientes de enlaces de Serviços Fixos (FS) do regulamentado Serviço Limitado Privado [4].

O desenvolvimento de técnicas de Rádio Cognitivo (CR) para expandir aplicações terrestres de banda larga sem fio tem sido recentemente estudado também para satélites e algumas metodologias já estão sendo utilizadas e padronizadas por meio de Acesso Dinâmico de Espectro e Compartilhamento Espectral.

A aplicação da técnica de Modulação e Codificação (MODCOD) de alta eficiência em paradigmas de CR, para satélites de comunicação de alto rendimento, pode ser vista como uma solução promissora para se atingir as metas de transmissão de altas taxas de dados, exigidas nos próximos anos, além de permitir a coexistência espectral de serviços licenciados primários e secundários (ou de dois ou mais serviços primários) sob as mesmas bandas de frequências.

Por meio desta abordagem, podemos atuar no enlace de descida de transmissão de dados de imagens dos satélites de observação da Terra para solucionar a degradação causada por estas interferências.

Assim, este artigo busca explorar a técnica MODCOD,

no paradigma de CR *underlay*, para atingir o objetivo de alto *throughput*, além de propor uma técnica adaptativa de CR com a intenção de reduzir as consequências das interferências.

Em suma, as técnicas operacionais básicas disponíveis em todos os sistemas de CR propostos na literatura disponível podem ser descritas na forma de ciclos cognitivos contínuos [5], nesta sequência (ver Figura 1):

- *Consciência Espectral:* a primeira tarefa de um CR é estar ciente do ambiente de rádio ao seu redor,
- *Análise e Decisão:* analisar as informações adquiridas e tomar uma decisão inteligente sobre como utilizar os recursos disponíveis de forma eficaz, e
- *Exploração e Adaptação do Espectro:* o CR adapta autonomamente seus parâmetros operacionais, como potência de transmissão, frequência de operação, esquemas de modulação e codificação, feixe ou polarização de radiação da antena, etc., a quaisquer condições ambientais para explorar as oportunidades espectrais disponíveis efetivamente.

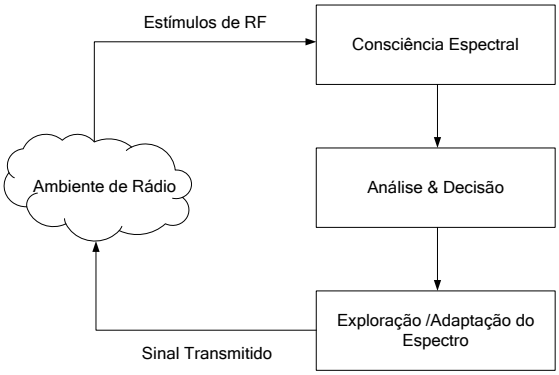

Figura 1. Um ciclo simplificado de técnicas operacionais para CR.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Cenário do enlace de descida do EOS

A Figura 2 ilustra o cenário de coexistência entre o enlace de descida do EOS, cuja recepção ocorre na ERG do satélite, e os enlaces de micro-ondas FS. Consideramos que o sistema EOS utiliza o modo de operação contínuo em banda larga na banda X do espectro de radiofrequências para o enlace de descida durante a passagem visível do satélite sobre a estação terrena.

Neste cenário, as estações terrenas EOS recebem interferência prejudicial dos enlaces FS, que normalmente operam com intensidade de EIRP (*Effetive Isotropic Radiated Power*) e largura de feixe que interferem em determinados ângulos de azimute e elevação da antena de recepção do satélite. A análise e proposição da técnica de CR no paradigma de *underlay* serão implementadas para mitigar e/ou minimizar os efeitos das interferências para uma perfeita recepção dos dados.

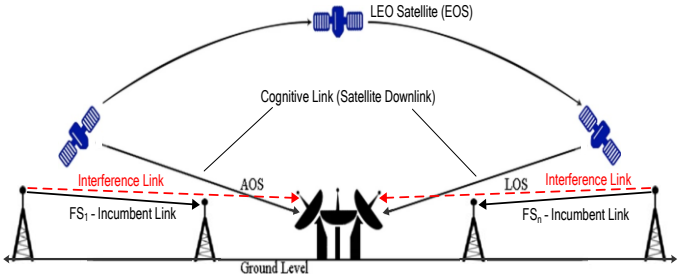

Figura 2. Esquema do cenário do enlace de descida do EOS.

Especificamente, assumimos um cenário realístico que, em uma localização particular, exista ou será necessária a instalação de enlace FS entre dois pontos próximos à ERG, que opera de 8025 MHz a 8400 MHZ, provocando interferência no enlace EOS.

Exemplificando, as passagens diárias de um satélite LEO EOS, como o CBERS-4, em órbitas distintas a cada 100 minutos, acarretam diferentes graus de azimute e elevação. As interferências ocorrem em pontos específicos na localidade de Cuiabá - MT, onde se encontra a principal ERG do Brasil e há vários enlaces dos Serviços Limitados Privados interferindo na recepção do satélite.

2.2. Descrição do problema

Na mesma banda X ocorrem transmissões primárias FS de operadoras de telefonias móveis em sua grande maioria. A Figura 3 apresenta o resultado de testes realizados na ERG de Cuiabá em 2018, comprovando a presença de sinais interferentes dentro da banda de operação do EOS, em função do azimute e elevação da antena de recepção.

A Figura 4 mostra uma cena da câmera WFI do CBERS-4 com falha na recepção da informação, que foi degradada pela influência dos sinais interferentes. Estas interferências provocam redução significativa da Relação Sinal Ruído (SNR) recebida pelo demodulador do sistema de recepção da ERG, aumentando a Taxa de Erros de Bits (BER) do sinal digital que contém os dados da imagem.

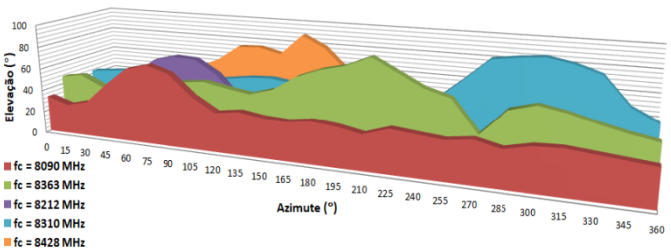

Figura 3. Distribuição de sinais interferentes em função do azimute e elevação da antena de recepção da ERG.

2.3. Técnica ACM

A técnica de Modulação e Codificação Adaptativa (ACM)

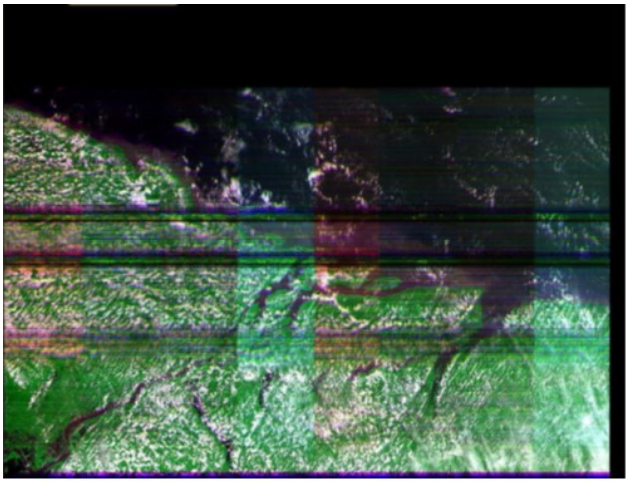

Figura 4. Imagem WFI – CBERS-4 danificada por interferência em 2018-01-20 (Lat: -6.04821274, Lng: -56.39372832).

pode ser utilizada para obter melhor resultado de eficiência espectral e utilização de potência de RF. Neste trabalho foi desenvolvida uma abordagem através da reconfiguração da ACM para resolver o problema do efeito das interferências no enlace de descida de EOS – a degradação das imagens.

As técnicas avançadas para a transmissão de altas taxas de dados baseiam-se no uso adequado de MODCOD. As principais estratégias para realizar um esquema MODCOD de alta eficiência são: a utilização de codificação de Verificação de Paridade de Baixa Densidade (LDPC) seguida de Modulação por Chaveamento de Amplitude e Fase (APSK). O APSK LDPC está se tornando o padrão de próxima geração para o enlace de descida de telemetria para EOS [6], sob a padronização DVB-S2X [7].

O LDPC usa um codificador simples capaz de produzir palavras-código com propriedades de distância das palavras ótimas e técnicas de baixa complexidade computacional no codificador e decodificador baseados em matrizes de verificação de paridade esparsas (baixa densidade), onde maior número de seus elementos possui valor "zero" [8]. O parâmetro do sistema a ser controlado é o desempenho do código LDPC na BER requerida do sistema, selecionando a taxa do código com o desempenho esperado. MODCOD foi normatizado como nomenclatura específica dos padrões DVB-S2X.

Por outro lado, a constelação modulada do sinal APSK opera melhor que a do QAM (Modulação de Amplitude em Quadratura) na presença de distorções não lineares causadas por amplificadores de potência operando na saturação, devido ao menor número de níveis de amplitudes.

O DVB-S2X é o padrão de segunda geração estendida para a transmissão de vídeo digital por satélites. Os MODCOD têm modulações selecionáveis para emprego na transmissão de TM para EOS em banda X: QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK e 64APSK, e com uma ampla variedade de taxas de código (de 1/4 a 9/10), variando em eficiência espectral cerca de 0,49 bits/s/Hz a 4,9 bits/s/Hz.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Estudo de caso 1

A abordagem proposta foi aplicada ao canal de transmissão da câmera WFI do satélite CBERS-4 com taxa de bits de 51,28 Mbps. Os MODCOD canônicos: denominação, identificação (ID), eficiência espectral, relação entre E_b/N_0 e E_s/N_0 e largura de banda efetiva da portadora modulada são apresentados na Tabela 1.

MODCOD	ID	Eficiência espectral	E_S/N_0 (dB)	E_b/N_0 (dB)	Símbolo BW (MHz)
QPSK 1/3	9	0.65645	–1.24	0,5879967	78.12
QPSK 3/5	8	1.18830	2.23	1,480724	43.15
QPSK 5/6	7	1.65466	5.18	2,9929044	30.99
QPSK 9/10	6	1.78861	6.42	3,8948386	28.67
8PSK 3/4	5	2.22812	7.91	4,4306064	23.01
8PSK 5/6	4	2.47856	9.35	5,408002	20.69
8PSK 9/10	3	2.67921	10.98	6,6999373	19.14
16APSK 5/6	2	3.30018	11.61	6,4246185	15.54
32APSK 8/9	1	4.39785	15.69	9,2575919	11.66

Tabela 1. MODCOD DVB-S2X.

Os resultados a seguir estão relacionados à contribuição do trabalho: otimização do desempenho do enlace de descida do satélite para o canal de transmissão da câmera WFI do CBERS-4 removendo os efeitos da interferência no cenário do sistema satélite coexistindo com serviços fixos. Em todos os casos, são considerados os valores reais do sistema de comunicação (transmissão e recepção) do CBERS-4 e a margem do enlace é especificada em 3 dB. Os MODCOD foram selecionados de acordo com cálculos numéricos do orçamento do enlace, sendo adaptados em função da Relação-Interferêcia-Ruído (INR), onde a INR aumenta com o aumento do nível de potência da soma dos sinais interferentes. (Ver Grafico da Figura 5).

3.2. *Throughput* com modulação fixa

A taxa máxima de transmissão de informação no canal de comunicação em banda X com modulação fixa QPSK sem codificação, como foi empregado no satélite CBERS-4, na banda de 51,28 MHz para a câmera WFI, é limitada a 51,28 Mbps na elevação de 5,7° (pior caso). O *throughput* (*Thr*) depende da duração da passagem do satélite em visada com a ERG (vamos considerar um tempo médio de 12 min).

$$\therefore T_{hr} = 51{,}28 \times 12 \times 60 = 36{,}922\ Gbits$$

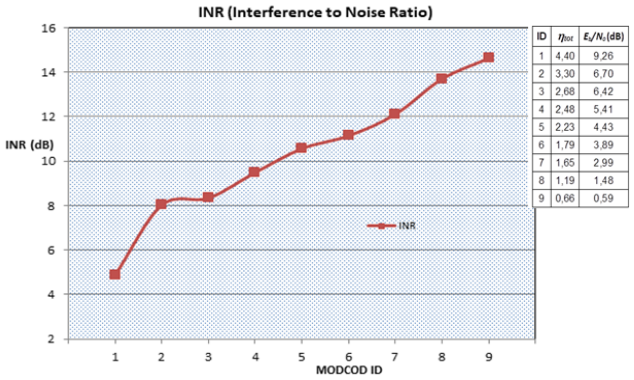

Figura 5. Curva de variação da INR pelo MODCOD utilizado.

Exemplificando, em um cenário interferente, assumindo uma INR fixa de 10 dB (potência de interferência mediana), temos uma redução significativa do *throughput* para:

$$T_{hr} = 10{,}152\ Gbits$$

Neste caso, o enlace não atinge a margem desejada e não recebemos a quantidade de informação mínima para o processamento das imagens em uma passagem (36,922 Gbits).

3.3. Estudo de caso 2

Vamos utilizar os resultados das medidas de sinais interferentes da Seção 2.2. Os sinais A, B, C, D e E (curvas "azul", "verde", "laranja", "roxo" e "vermelho", respectivamente, da Figura 3) tem os níveis máximos de potência aferidos em 0° de elevação.

Foram realizados os cálculos do orçamento do enlace com a adaptação do MODCOD, simulando o enlace de descida para azimutes entre 0° e 360°, explorando a mitigação das interferências pela presença ou ausência dos cinco sinais interferentes. Foram utilizadas as informações e distribuições dos níveis dos sinais de interferência em elevação versus azimute para obter o pior caso na Tabela 2.

ELEVAÇÃO (°)	MODCOD	% do tempo[2]	R_b[1] Mbps	T_{hr}[2] Gbits
90	16APSK 5/6	16,6	169,23	65,621
75	8PSK 9/10	13,6	137,39	
50	QPSK 9/10	25,4	91,72	
30	QPSK 3/5	35,4	51,28	
5,7	QPSK 1/3	9,2	33,66	
Notas: [1] largura de banda está limitada a 51,28 MHz; [2] 12 min.				

Tabela 2. *Thr* X MODCOD, com interferência (Azim = 90°).

Da Tabela 2, com o cálculo para o azimute de 90° - pior caso, fica demonstrado que a técnica mitiga o efeito do aumento dos níveis de potência das interferências (aumento da INR), por meio da adaptação do MODCOD para cada elevação de acordo com o requisito da Relação-Sinal-Interferência-mais-Ruído (SINR) especificado para o BER da missão. Também pode ser enfatizado que o *throughput* (T_{hr} = 65,621 Gbits) tem valor superior ao mínimo para a transmissão de todos os dados em uma passagem. Em um cenário sem interferência esse valor pode chegar a 162,374 Gbits.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma solução baseada nos conceitos de CR que permite a coexistência entre enlaces de FS e do EOS. Essa solução permite uma otimização da transferência de altas taxas de dados em ambiente interferente. Os resultados do estudo real, aplicado no enlace do CBERS-4 e considerando dados da câmera WFI, demonstram que a técnica de adaptação do MODCOD mitiga o problema dos sinais interferentes presentes na ERG de Cuiabá. O passo seguinte será a realização de um ensaio em laboratório do sistema de comunicação de transmissão e recepção, com interferência somada, empregando imagens reais gravadas.

5. REFERÊNCIAS

[1] I. Budiarjo, H. Nikookar, and L.P. Ligthart. Cognitive radio modulation techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25.6, 2008.

[2] ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações. Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil. Resolução nº 716, de 31 de outubro de 2019.

[3] AEB - Agência Espacial Brasileira, "PNAE: Programa Nacional de Atividades Espaciais: 2022-2031", Brasília, 2022.

[4] ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações, "Regulamentação do Serviço Limitado Privado", Resolução nº 617, de 19 de junho de 2013.

[5] A. F. Ian, et al. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer networks*, 50.13: 2127-2159, 2006.

[6] P. Addabbo, et al. A review of spectrally efficient modulations for earth observation data downlink. *In: Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, pp. 428-432. IEEE, 2014.

[7] CCSDS Space Link Protocols over ETSI DVB-S2X Standard, CCSDS 131.31-O-1. Orange Book. Issue 1. Washington, D.C: CCSDS, September, 2021.

[8] H. S. Silva, J. E. P. de Farias, M. S. de Alencar. Códigos Verificadores de Paridade de Baixa Densidade. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 26-33, out. 2016. ISSN 2237-5104. Disponível em: <http://rtic.com.br/index.php/rtic/article/view/77>. Acesso em: 28 set. 2021.