

Proposição de Técnicas de Rádio Cognitivo para Mitigação de Interferências no Downlink de Satélites de Serviços de Exploração da Terra

Rodolfo Antonio da Silva Araujo¹, Walter Abrahão dos Santos², Luciano Barros Cardoso da Silva³, Marcelo Lopes de Oliveira e Souza⁴

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – No escopo do desenvolvimento das próximas missões de Serviços de Exploração da Terra por Satélite (EESS), há uma demanda para se melhorar o desempenho do *downlink* para a transmissão de taxa de dados ultra-alta. Existe um foco predominante em técnicas de modulação e codificação (MODCOD) para se alcançar alta eficiência de largura de banda e potência de RF. Em paralelo existem técnicas de Rádio Cognitivo (CR) que viabilizam a coexistência espectral entre serviços por satélites e serviços fixos primários de enlaces diretos em terra. Nesse trabalho, combinamos ambas as estratégias para se obter uma utilização eficiente dos recursos do espectro disponível. Inicialmente são evocados aspectos importantes sobre consciência e exploração espectrais por Rádio Cognitivo para se criar uma base para a promoção de técnicas de melhoria de recursos espectrais para satélites de observação da Terra. Em seguida, é apresentado o estágio atual da pesquisa que está sendo desenvolvida para esta aplicação, onde é proposta uma alternativa para permitir a coexistência de serviços fixos terrestres juntamente com serviços por satélite nas mesmas frequências. Desta forma, o artigo tenta explorar várias abordagens de CR e técnicas MODCOD que podem ser úteis para o objetivo de alto rendimento e solução para coexistência espectral entre EESS e Serviços Fixos (FS) terrestres. Por fim, é apresentado um estudo de caso ilustrando técnicas conforme as diretrizes do CCSDS (*Consultative Committee for Space Data System*).

Palavras-Chave – Rádio Cognitivo, Coexistência Espectral, MODCOD.

I. INTRODUÇÃO

Devido à demanda por sistemas de comunicação sem fio de banda larga espectral (com alta taxa de transferência de dados), impõe-se a necessidade do uso eficiente dos recursos do espectro enquanto sua provisão é limitada, apesar de subutilizada [1], devido à segmentação e 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. Como quase todos os recursos espectrais disponíveis estão licenciados, há pouca ou nenhuma banda disponível para adicionar novos serviços, a menos que algumas das licenças existentes sejam descontinuadas, como ocorreu recentemente no Brasil com o desligamento da TV analógica [3].

Nessa mesma direção, considerando futuras missões de Serviços de Exploração da Terra por Satélites (*Earth Exploration Satellite Services-EESS*) [4], esforços estão sendo direcionados para o uso de satélites de pequeno e médio porte com cargas úteis empregando sensores óticos de ultra-alta resolução ou sensores de microondas ativos e.g.,

Radares de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar-SAR*), que vão exigir cada vez maior largura de banda: resultado da maior taxa de dados gerados por eles. Ao mesmo tempo, iremos evidenciar a ocorrência de efeitos danosos em imagens de sensoriamento remoto dessas cargas úteis, transmitidas por satélites, provocados por sinais de rádio interferentes que surgem nas estações de recepção de imagem de satélites em geral por links de serviços fixos (FS) do regulamentado Serviço Limitado Privado [5].

O desenvolvimento de técnicas de Rádio Cognitivo (CR) para expandir aplicações terrestres de banda larga sem fio tem sido amplamente estudado e algumas metodologias já estão sendo utilizadas e padronizadas por meio de Acesso Dinâmico de Espectro e Compartilhamento Espectral. A aplicação de técnicas de modulação e codificação (MODCOD) de alta eficiência em conjunção com as arquiteturas dos paradigmas de Rádio Cognitivo, para satélites de comunicação de alto rendimento, pode ser vista como a solução mais promissora para se atingir as metas de transmissão de alta taxa de dados exigida nos próximos anos, além de permitir a coexistência espectral de serviços licenciados primários e secundários ou até de dois ou mais serviços primários sob as mesmas bandas de frequências.

Por meio da abordagem das várias técnicas de CR, em seus diferentes paradigmas, pode-se trabalhar no enlace de descida (*downlink*) de transmissão de dados de imagem dos satélites de observação da Terra (no TX embarcado e/ou no RX da estação) para solucionar a degradação causada por estas interferências. Isto demanda uma revisão destas abordagens de CR visando propor a solução de um algoritmo de Rádio Cognitivo, em particular para técnicas de subjacência (*underlay*), que tenha a função de se tornar uma ferramenta de suporte para solucionar falhas em consequência da coexistência espectral de usuários primários e secundários na mesma faixa de frequências.

Assim, este artigo busca explorar as técnicas MODCOD que podem ser úteis para atingir o objetivo de alto desempenho, e para propor determinada técnica de CR com a intenção de reduzir as consequências das interferências. As técnicas operacionais mais comuns e básicas disponíveis em todos os sistemas de CR propostos na literatura disponível podem ser descritas na forma de ciclos cognitivos contínuos [6], nesta sequência (ver Figura 1):

- *Consciência do espectro*: 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 (adaptação) do espectro*, ou seja, 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.

Mais especificamente, a capacidade de reconhecimento do espectro permite que um CR adquira informações sobre as oportunidades espectrais dinamicamente, enquanto a capacidade de exploração do espectro auxilia o CR a explorar as oportunidades espectrais disponíveis de forma eficiente.

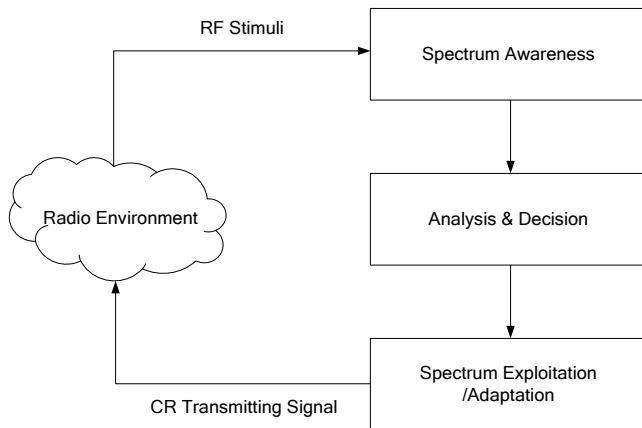


Fig. 1. Um ciclo simplificado de técnicas operacionais para CR.

II. CENÁRIO DO DOWNLINK DE UM SATÉLITE LEO DE OBSERVAÇÃO DA TERRA

O cenário de coexistência, ilustrado na Figura 2, do *downlink* de EESS (*Earth Exploration Satellite Services*), assumindo a recepção na estação terrena do satélite LEO de observação da Terra e os links de microondas FS de estações fixas na Terra. Consideramos que o sistema EESS utiliza o modo de operação contínuo em banda larga na banda X para o *downlink* durante a passagem visível do satélite sobre a estação terrena.

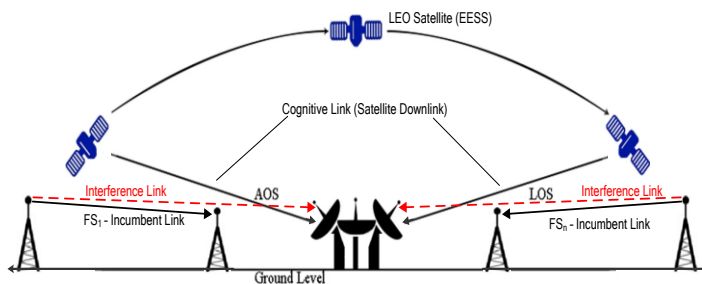


Fig. 2. Esquema do cenário do downlink do satélite LEO.

A seguir, nos concentramos na apresentação e análise deste cenário de *downlink* dos sinais com dados das imagens de observação da Terra em banda X, enquanto que neste mesmo cenário encontra-se o link em faixa estreita do serviço fixo (FS) terrestre entre torres de estações de Serviço Limitado Privado (SLP), também em banda X.

No cenário de coexistência com o link FS, as estações terrestres EESS podem receber interferência prejudicial das estações fixas FS, normalmente trabalhando com intensidade de EIRP e largura de feixe que interferem em determinados ângulos de azimute e elevação da antena de recepção do satélite. A análise e proposição de técnicas de CR no paradigma de *underlay* serão consideradas nas próximas seções para mitigar e/ou minimizar os efeitos das interferências para uma perfeita recepção de dados das imagens do satélite. Caso contrário, a interferência do *downlink* EESS nas estações FS não ocorre devido à baixa densidade de fluxo de potência equivalente que chega a estas estações. O cenário de interferência com os receptores de satélite devido ao compartilhamento de espectro na banda X também pode ser visto na Figura 2. Especificamente, assumimos que em uma área particular exista ou será necessária à instalação de um link FS entre dois pontos próximos a uma estação de recepção terrestre EESS operando de 8025 MHz a 8400 MHz, que sofrerá interferência deste link FS.

A série de passagens diárias de um satélite LEO, como exemplo o CBERS-4A, em órbitas distintas em torno de 100 minutos, acarreta graus de azimutes e elevações diversas. Interferências ocorrem em pontos específicos na localidade de Cuiabá - MT, onde se encontra a principal estação de recepção de imagens do Brasil e há vários links de operadoras de celular, além de Serviços Limitados Privados que interferem na recepção do satélite CBERS-4A.

As especificações e recomendações referentes ao sistema de *downlink* EESS em avaliação podem ser extraídas do Relatório da União Internacional de Telecomunicações (ITU) [7], que especifica os parâmetros relacionados à sua implantação para bandas entre 8025 e 8400 MHz, sendo que o limite de emissões não deve ultrapassar os valores conforme a Tabela I.

TABELA I. Limite de emissões em banda X. Fonte: [7]

Faixa de frequências	serviço	Limite em dBW/m ² para ângulos de visada (δ) acima do plano horizontal			Largura de banda de referência
		0 - 5°	5° - 25°	25° - 90°	
8025 - 8500 MHz	Exploração da Terra por satélite	-150	-150 + 0.5	-140	4 kHz
		(δ-5)			

Os satélites de observação da Terra respeitam estes valores e operam numa faixa de 375 MHz (entre 8025 e 8400 MHz); e, como o nível de potência que atinge a Terra é relativamente baixo, este serviço não interfere nos links FS. Exemplo de um cálculo de enlace, com todos os parâmetros e níveis de sinal, para o satélite de observação da Terra CBERS-4A pode ser, como exemplo, verificado na Tabela II.

Informações adicionais sobre formatação, modulação e codificação deste sinal transmitido pelo satélite serão analisadas na Seção IV para demonstrar como o sinal FS, em banda estreita, dentro da banda do sinal EESS afeta os dados recebidos pela estação e, conseqüentemente, degrada a qualidade da imagem de sensoriamento remoto processada.

III. PARADIGMAS E TÉCNICAS DE CR

A. Técnicas de Consciência e Sensoriamento Espectrais

Para aplicações de exploração do espectro, podem ser empregados diferentes métodos de conscientização do

espectro próximo, dependendo do nível de conscientização e da métrica desejadas [8].

TABELA II. Cálculo do link do canal DTS do CBERS-4A

CBERS-4A – DTS FM as-built link budget $\theta = 62,5^\circ$, Plane $\Phi = 0^\circ$, Freq = 8212 MHz		
		LINK BUDGET - DTS
MWT ANTENNA		Satellite Receive Site
E/S LOCATION		Cuiabá
LONGITUDE (+)W (-)E	deg	56,0
LATITUDE (+)N (-)S	deg	-17,7
ELEVATION MASK	deg	13,047
theta satellite		62,5
SATELLITE LOCATION		
HEIGHT	Km	628
SATELLITE - EARTH STATION		
DISTANCE	Km	2395,1
TRANSPONDER		
TX EIRP	dBW	33,0
ANTENNA GAIN	dBi	25,00
TX OUTPUT POWER	dBW	10,0
CABLE LOSSES	dB	2,0
BANDWIDTH	MHz	375,00
MODULATION		
MODULATION		QPSK
INFORMATION RATE	Mbps	450,00
CODE EFFICIENCY	bps/Hz	1,2
SIGNAL BANDWIDTH	MHz	375,00
PROPAGATION		
DOWNLINK FREQUENCY	MHz	8212,00
CLEAR SKY DOWNLINK LOSS	dB	178,32
LOSSES		
ATMOSPHERIC / RAIN LOSSES	dB	1,00
EARTH STATION:(E/S)		
RECEIVER G/T	dB/K	35,0
POLARIZATION LOSS	dB	2,0
ANTENNA POINTING LOSS	dB	1,5
DOWNLINK BUDGET:		
EIRP	dBW	33,0
LOSSES	dB	-185,82
G/T EARTH STATION	dB/K	35,0
BOLTZMANN'S CONSTANT	dB/K	228,6
Received C/No (DOWN)	dBHz	110,78
OVERALL LINK BUDGET:		
Received C/No (DOWN)	dBHz	110,8
Received Eb/No	dB	24,3
MODULATION/ DEMODULATION LOSSES	dB	6,0
OTHER LOSSES	dB	0,0
DESIRED Eb/No (BER= 1e-7)	dB	11,5
MARGIN	dB	6,8
POWER FLUX DENSITY	dBW/m ² /4kHz	-155,3
CONSTANTS		
EARTH RADIUS	Km	6371
LIGHT SPEED	Km/s	300000

Conforme mostrado na Figura 3, métodos baseados em sensoriamento do espectro (*SS-Spectrum Sensing*), banco de dados e transmissão de *beacon* podem ser aplicados para adquirir informações de ocupação de espectro. Para obter informações sobre SNR (*Signal to Noise Ratio*) e canais de usuários primários (PU), algoritmos adequados de estimativa de SNR e canal podem ser empregados. Para realizar a comunicação de sobreposição (*overlay*), as características da forma de onda do sinal PU devem ser necessárias, bem como os esquemas de modulação e codificação (MODCOD), frequências cíclicas, informações do *beacon* ou de cabeçalho, etc.

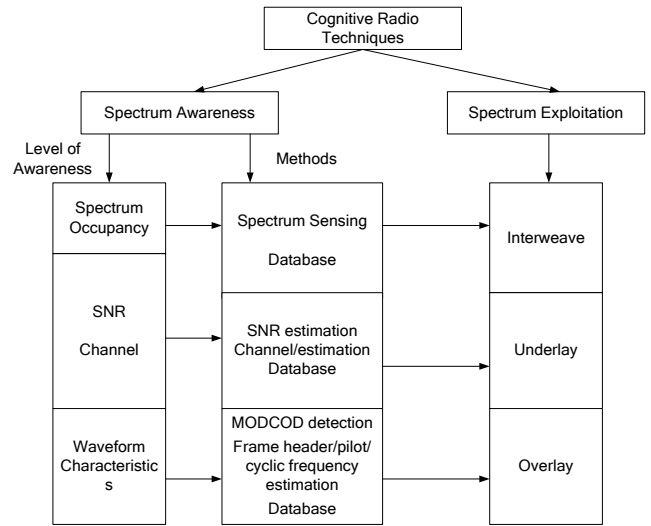


Fig. 3. Estrutura: técnicas de consciência-exploração do espectro (Adapt. de [8]).

A.1 Sensoriamento do Espectro por Detecção de Energia (ED)

ED é a abordagem de SS mais usual devido à sua baixa complexidade computacional e de implementação [9]. Esta técnica permite detectar o sinal do PU comparando a saída de um detector de energia com um limiar pré-determinado que depende do piso de ruído do ambiente. Este método é simples de programar, mas apresenta desvantagens, como a incapacidade de diferenciar interferências de PU e ruído, e baixo desempenho sob baixos valores de SNR.

A.2. Detecção Baseada em Filtro Casado

A filtragem casada é reconhecida como o método ideal para detecção de PU quando o sinal transmitido é bem conhecido [10]. A principal vantagem do filtro casado é que ele requer menos tempo para atingir uma meta de probabilidade de detecção de erros em comparação com outros métodos devido à sua funcionalidade coerente. Esta abordagem apresenta duas desvantagens: a necessidade de um canal receptor dedicado para cada tipo de PU; e requer sincronização entre transmissor e receptor, o que pode ser difícil de conseguir na prática, pois o sistema primário e o secundário podem ser administrados por dois operadores diferentes.

A.3. Detecção baseada em Autovalores

Para esta, precisam ser utilizadas aprimoradas técnicas de detecção e amostragem com o uso de múltiplas antenas, de técnicas associativas e com sobreamostragem, para melhorar

a eficiência de SS em canais sem fio com desvanecimento [11]. Na maioria desses métodos, as propriedades dos autovalores da matriz de covariância do sinal recebido são consideradas utilizando os avanços recentes da teoria de matrizes aleatórias [12]. Algumas das técnicas de SS baseadas em autovalores não requerem nenhuma informação prévia do sinal do PU e superam as técnicas de ED, especialmente na presença de incerteza de covariância de ruído.

B. Técnicas de Exploração do Espectro

A partir do conhecimento dos sinais de transmissão de PU, as técnicas existentes de exploração de espectro podem ser classificadas nos paradigmas de Rádio Cognitivo, entrelaçamento (*interweave*), subjacência (*underlay*) e sobreposição (*overlay*) [8], mostrados na Figura 3.

B.1. Entrelaçamento

Essa abordagem de coexistência espectral atua na mitigação da interferência através de técnicas oportunistas, cujo objetivo é permitir que os rádios cognitivos relacionem-se oportunamente usando buracos espectrais no espaço, tempo e frequência que não são ocupados pelos PU. Portanto, não ocorre interferência no caso ideal. O ambiente circundante deve ser constantemente identificado e monitorado para prever a subutilização de cada fração do espectro para ser acessado pelos usuários secundários (SU) ou usuários cognitivos (CU) até que a atividade principal permaneça ociosa. As dimensões de polarização e angular também podem ser consideradas como dimensões adicionais para fins de exploração do espectro por *interweave*.

B.2 Subjacência

Neste paradigma, transmissões cognitivas e não cognitivas simultâneas são permitidas na mesma banda de frequências, desde que o nível de interferência no lado da PU permaneça aceitável em um nível de limiar pré-definido. O nível máximo de interferência permitido na PU pode ser modelado pelo conceito de temperatura equivalente de interferência e é definido/regulado pela política federal local (FCC *Spectrum Policy Task Force* em [13], por exemplo). As informações do sistema PU, como SNR, modelagem do canal, direções de chegadas (DoAs), são úteis para realizar as técnicas de *underlay*. A comunicação por *underlay* pode ser realizada usando uma só ou uma combinação das seguintes técnicas no transmissor secundário (ST): (i) conformação do feixe com o uso de múltiplas antenas ou *phased array*, (ii) alocação dinâmica de recursos: portadora, potência, MODCOD, etc., (iii) abordagem de espalhamento espectral e (iv) usando o princípio da Zona de Exclusão (EZ).

B.3. Sobreposição

As redes de sobreposição são caracterizadas pela mitigação de interferência usando estratégias avançadas de codificação e transmissão no TX secundário (ST), bem como uma retransmissão da mensagem do PU pelo SU, isto é, quando o SU e o PU estão transmitindo simultaneamente, a interferência causada pelo ST no RX primário (PR) pode ser compensada usando uma parte da energia do SU para

retransmitir o sinal do PU. Neste paradigma, PU compartilha informações de seus livros de código e mensagens do sinal para SU. Mais precisamente, SU processa as mensagens enviadas por fontes de PU e usa essas informações para eliminar a interferência gerada pela comunicação primária no lado do RX secundário (SR), bem como para melhorar o desempenho da transmissão primária retransmitindo as mensagens acumuladas para o PR. Este último caso permite que o ST transmita ambos os sinais ao mesmo tempo, desde que sua potência total de transmissão seja suficiente para cobrir a energia necessária para sua própria comunicação em conjunto com sua operação de retransmissão. As técnicas de *overlay* são as mais adequadas para sistemas altamente integrados onde existe um elevado grau de cooperação entre redes de satélite e terrestres primárias e secundárias. Neste contexto, as maneiras possíveis de adquirir as características da forma de onda do PU devem ter abordagens de estimação, como detecção e classificação de MODCOD, estimação de cabeçalho dos quadros, estimação das frequências cíclicas, etc., e usar essas características de forma da onda do sinal para projetar estratégias de transmissão avançadas para o ST.

A Figura 4 mostra a representação do sinal dessas três técnicas de exploração.

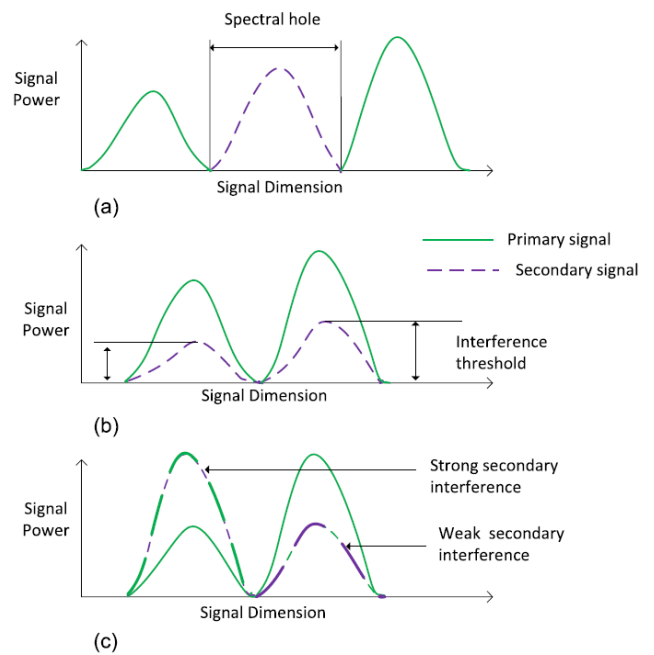


Fig. 4. Representação das técnicas *interweave*, *underlay*, and *overlay* [8].

IV. COEXISTÊNCIA ESPECTRAL E MÁXIMA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE DADOS NA TRANSMISSÃO

Partindo do que foi descrito sobre escassez no espectro, coexistência espectral e compartilhamento entre usuários primários e secundários ou mesmo entre dois usuários designados como serviços primários na mesma faixa de frequências, há um problema de substancial importância que vem sendo investigado e, deve ser tratado, que ocorre na recepção e processamento (geração) de imagens de sensoriamento remoto de observação da Terra.

Este problema se relaciona ao controle de interferências nos receptores das estações terrenas de recepção de dados de

imagens de satélites (ERG-Estação de Recepção e Geração), que acarreta efeitos danosos sobre as imagens, provocados por sinais interferentes em banda X presentes no entorno da localização da ERG. A banda X é uma das faixas de frequências (8,025 - 8,400 GHz) regulamentada [17] para aplicações de transmissão de dados de satélites para terra em EESS. No entanto, nesta faixa de frequências, também ocorrem transmissões de enlaces (*links*) fixos de estações de rádio enlaces fixas (FS) de operadoras de telefonia móveis e fixas, em sua grande maioria.

Examinando o cenário de coexistência do *downlink* de EESS, recepção na estação terrena do satélite LEO de observação da Terra e o link de microondas FS de estações fixas na Terra, considera-se o sistema EESS utilizando o modo de operação contínuo em banda larga (portadora modulada com taxas superiores a 50 Mbps) na banda X, com modulação APSK (*Amplitude and Phase Shift Keying*) para o *downlink* durante a passagem visível do satélite sobre a estação terrena e o link também em banda X do serviço fixo FS terrestre de faixa estreita.

Dado que o sinal interferente é proveniente de links FS de usuários primários operando dentro da faixa de frequências 8025 - 8400 MHz, veremos a seguir que as interferências não ocorrem em todas as passagens do satélite quando em visada com a estação de recepção e sim em certas passagens com azimutes e elevações que cruzam o feixe dos sinais FS.

A ERG principal do Brasil de satélites de observação da Terra fica localizada no Campus do INPE na cidade de Cuiabá, MT, nas coordenadas a 17,7° de latitude Sul e 56,0° de longitude oeste, sendo que a região de Cuiabá e seus arredores oferecem a localização ideal dentro do território brasileiro para a instalação de antenas de rastreamento de satélites de sensoriamento remoto de órbita polar. Localizada no centro geodésico da América do Sul, essa região possibilita, a única antena de rastreamento, um raio de visibilidade de aproximadamente 3000 km para satélites com altitude ao redor de 750 km. Isto permite o envio e recepção de dados em tempo real com cobertura de todo o território nacional e de grande parte da América do Sul. Isto evita a necessidade de instalar mais antenas para atender um mesmo satélite durante a sua passagem de um polo ao outro.

Quando planejada e implantada no início dos anos 70, a primeira ERG do INPE ficava localizada em um sítio bem distante da área urbana de Cuiabá. Com a expansão da região,

hoje o INPE fica ao lado do novo Centro Administrativo da capital de Mato Grosso, onde houve a necessidade de estabelecer recursos avançados de telecomunicações e, conseqüentemente, *links* de microondas FS dos diversos Serviços Limitados Privados.

Realizando um levantamento atual no entorno da estação em Cuiabá, verifica-se que existem vários SLPs - *links* de microondas FS. Alguns deles cadastrados na Anatel [18] são mostrados na Tabela III para exemplificar, com seus parâmetros associados e especificações técnicas, de operadores de telefonia móvel, como a Telefônica, Tim, etc. A estação de Cuiabá também está relacionada.

V. TÉCNICAS DE MODULAÇÃO E CODIFICAÇÃO VARIÁVEL E MODULAÇÃO E CODIFICAÇÃO ADAPTATIVA

As técnicas de *Variable Coding and Modulation* (VCM) e *Adaptive Coding and Modulation* (ACM) não são geralmente referidas como abordagens específicas de Rádio Cognitivo, mas o emprego destas técnicas em consonância com técnicas próprias de CR acabarão se tornando muito úteis para diversas aplicações em CR por satélite.

As técnicas avançadas para *downlink* a altas taxas de dados (HDR) baseiam-se no uso adequado de modulação e codificação de canal (MODCOD) [14]. As principais estratégias para realizar um esquema MODCOD de alta eficiência são: a utilização de codificação LDPC (*Low-Density Parity Check*) seguida de Modulação por Chaveamento de Amplitude e Fase (APSK). O APSK LDPC está se tornando o padrão de próxima geração para o *downlink* de satélites de observação da terra em HDR [14], sob a padronização DVB-S2 [15] e o recente DVB-S2X [16].

A ideia fundamental dos códigos LDPC é usar um codificador simples capaz de produzir palavras-código (*codewords*) longas com propriedades de distância de código (*word-distance*) excepcionais e técnicas de baixa complexidade baseadas numa estrutura predefinida do codificador. O parâmetro do sistema a ser controlado pode ser sintetizado como o desempenho do código LDPC na taxa de erros de bit (BER-*Bit Error Rate*) requerida do sistema – seleção da taxa de código dado o desempenho esperado e complexidade de codificação/decodificação.

TABELA III. Parâmetros e especificações de casos reais de emissões de FS em banda X

Entidade	Ato de RF	Endereço	Freq. TX (MHz)	Freq. RX (MHz)	Azimute	Ganho Ant.	Ângulo 1/2 Pot.	Elevação	Polariz	Altura Ant (m)	Potência Transm (W)	Latitude	Longitude
Telefônica	686902007	R. Pao de Acucar QD22 N16E17	7895.95	8207.27	72.9	45.2	0.9	0.7	H	27	0.79	-15.603	-56.078.6
Telefônica	686902007	R. Pao de Acucar QD22 N16E17	7836.65	8147.97	72.9	45.2	0.9	0.7	V	27	0.79	-15.603	-56.078.6
Telefônica	686902007	R. Pao de Acucar QD22 N16E17	7895.95	8207.27	354.9	46.7	0.8	0.5	H	70	1	-15.603	-56.078.6
Telefônica	686902007	R. Pao de Acucar QD22 N16E17	7955.25	8266.57	354.9	46.7	0.8	0.5	V	70	1	-15.603	-56.078.6
MCTI	99992017	INPE	0	8217.5	0	55	0.3	89	X	1	0	-15.552	-56.073.1
Tim	130582017	Av. Prof. Herminia Torquato 101	7925.6	8236.92	223.7	35.5	2.6	-0.6	V	62	0.316	-15.575	-56.075.4
Tim	130582017	Av. Archimedes Pereira Lima S/N	7895.95	8207.27	262.9	31.1	4.7	0.1	V	40	0.398	-15.601	-56.070.5

Por outro lado, a constelação modulada do sinal APSK funciona melhor que a do PSK ou QAM na presença de distorções não lineares causadas por amplificadores de potência operando na região de saturação devido ao menor número de níveis de amplitudes. O pior desempenho de BER é compensado pelo código.

DVB-S2 é o padrão de segunda geração para transmissão de vídeo digital por satélites. Esse formato de MODCOD é baseado em códigos LDPC combinados com quatro formatos de modulação selecionáveis (QPSK, 8PSK, 16APSK e 32APSK) e com uma ampla variedade de taxas de código (de 1/4 a 9/10), variando em eficiência espectral (η_{tot}) de ~ 0,5 bits/s/Hz a ~ 5 bits/s/Hz.

O ACM ou VCM pode ser prontamente demonstrado aqui para otimizar a transmissão, por exemplo, de um satélite de observação da Terra LEO, permitindo que seus parâmetros de transmissão sejam alterados quadro a quadro, dependendo das condições particulares do enlace satélite-estação terrena de recepção (ERG) – basicamente elevação da antena da estação e condições climáticas. Usando uma combinação de modos de transmissão, conforme sugerido pelo CCSDS [15] que consta na Tabela IV, para uma taxa de 200 Msymbols, a taxa de informação média transmitida (R_{TX}) será de:

$$R_{TX} = 30 \times 1.655 + 25 \times 1.981 + 40.6 \times 2.228 + 28.4 \times 2.479 + 50 \times 2.967 + 26 \times 3.300 = 494.15 \text{ Mbps}$$

Uma vez que a máxima taxa de bits que pode ser transmitido em um canal de transmissão de altas taxas de dados é dada por:

$$(R_{TX})_{\text{máx}} = BW \times \eta_{tot}, \quad BW = \text{largura de banda do canal}$$

Os telecomandos para o satélite para alteração dos parâmetros podem ser predefinidos anteriormente com cálculos prévios de órbita e programados pelo Centro de Controle e Rastreamento (CCR) do satélite no modo VCM, ou através de um enlace de telecomando de *feedback* contínuo entre o CCR e o computador de bordo do satélite, onde serão enviadas informações em tempo real (detecção e monitoramento) do E_b/N_0 , realizado pela ERG, que fará com que o próprio rádio transmissor embarcado realize as adaptações necessárias (modo ACM).

TABELA IV. ACM proposto pelo CCSDS

DVB-S2 MODCOD	Efficiency bit/symbol	E_b/N_0 for BER= 10^{-7}	% of being in this mode-CCSDS
QPSK 5/6	1.6547	5.2	15.0
8PSK 2/3	1.9806	6.7	12.5
8PSK 3/4	2.2281	8.0	20.3
8PSK 5/6	2.4786	9.4	14.2
16APSK 3/4	2.9667	10.3	25.0
16APSK 5/6	3.3002	11.7	13.0

VI. CONCLUSÃO

Este artigo teve como propósito principal a realização de uma revisão sobre conceitos, abordagens e técnicas de Rádio Cognitivo que são aplicáveis em sistemas de comunicações via satélite, evidenciando uma solução técnica que permite a coexistência entre links de satélites cognitivos com sistemas fixos.

Adicionalmente, essa solução permite uma otimização máxima de transferência de altas taxas de dados. Um exemplo real foi descrito considerando o *downlink* do satélite CBERS-4A e sinais interferentes de serviços fixos de operadoras da telefonia móvel presentes na ERG de Cuiabá.

A aplicação de técnicas MODCOD adaptativas, baseadas no padrão DVB-S2, combinadas com abordagens de Rádio Cognitivo, permite uma maior taxa de transmissão de dados entre o satélite e as estações terrenas, além de também permitir a coexistência espectral entre serviços fixos e serviços por satélite. Trabalhos futuros estarão focados na avaliação prática das estratégias expostas e na coleta de suas métricas significantes.

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] BRASIL. Ministério das Comunicações. Gabinete do Ministro. Portaria MCOM Nº 2.524, de 4 de maio de 2021. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 05 de maio de 2021.
- [4] AEB - Agência Espacial Brasileira, "PNAE: Programa Nacional de Atividades Espaciais: 2022-2031", Brasília, 2022.
- [5] ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações, "Regulamentação do Serviço Limitado Privado", Resolução nº 617, de 19 de junho de 2013.
- [6] A.F. Ian, et al. "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey." Computer networks 50.13 (2006): 2127-2159.
- [7] ITU – "ITU-R AS.1277-0: Sharing in the 8 025-8 400 MHz frequency band between the Earth exploration-satellite service and the fixed, fixed-satellite, meteorological-satellite and mobile services in Regions 1, 2 and 3", 1997.
- [8] S. K. Sharma, T.E. Bogale, S. Chatzinotas, B. Ottersten, L.B. Le, and X. Wang. "Cognitive radio techniques under practical imperfections: a survey." IEEE communications surveys and tutorials (2015).
- [9] S. Herath, N. Rajatheva, and C. Tellambura, "Energy detection of unknown signals in fading and diversity reception," IEEE Trans. Commun., vol. 59, no. 9, pp. 2443-2453, Sept. 2011.
- [10] J. Prokakis, Digital Communications, 3rd ed. McGraw-Hill, 1995.
- [11] A. Kortun, T. Ratnarajah, M. Sellathurai, C. Zhong, and C. Papadias, "On the performance of eigenvalue based cooperative spectrum sensing for cognitive radio," IEEE J. Sel. Topics in Signal Process., vol. 5, no. 1, pp. 49-55, Feb 2011.
- [12] W. Zhang, G. Abreu, M. Inamori, and Y. Sanada, "Spectrum sensing algorithms via finite random matrices," IEEE Trans. Commun., vol. 60, no. 1, pp. 164-175, January 2012.
- [13] Federal Communications Commission. "Establishment of interference temperature metric to quantify and manage interference and to expand available unlicensed operation in certain fixed mobile and satellite frequency bands." Et Docket 03-237 (2003).
- [14] P. Addabbo, F. Antonacchio, T. Beltramonte, M. di Bisceglie, F. Gerace, G. Giangregorio, and S.L. Ullo. "A review of spectrally efficient modulations for earth observation data downlink." In: Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 2014 IEEE, pp. 428-432. IEEE, 2014.
- [15] CCSDS Space Link Protocols over ETSI DVB-S2 Standard, CCSDS 131.3-B-1. Blue Book. Issue 1. Washington, D.C: CCSDS, March, 2013.
- [16] CCSDS Space Link Protocols over ETSI DVB-S2X Standard, CCSDS 131.31-O-1. Orange Book. Issue 1. Washington, D.C: CCSDS, September, 2021.
- [17] REGULATIONS, ITU Radio. Frequency allocations. Volume I, 2020. Disponível em: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2020/en>. Acesso em: 19 de abril de 2022.
- [18] ANATEL. AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. Consulta Emissões Licenciadas. Disponível em: <http://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/licenciamento.php>. Acesso em: 3 abril 2022.