



TÉCNICAS DE RÁDIO COGNITIVO (CR) PARA APLICAÇÕES DE COMUNICAÇÃO POR SATÉLITE

Rodolfo Antonio da Silva Araujo
rodolfo.araujo@inpe.br

Engenharia e Tecnologia Espacial - DEA

19 de julho de 2018

SUMÁRIO

- 1. COMUNICAÇÕES SEM FIO COGNITIVAS - INTRODUÇÃO**
- 2. TÉCNICAS DE RADIO COGNITIVO**
 1. Técnicas de Conscientização Espectral
 2. Técnicas de Exploração do Espectro
- 3. SENSORIAMENTO ESPECTRAL**
 1. Detecção de Energia
 2. Detecção com Filtro Casado
 3. Sensores do Espectro Baseados em Autovalores
- 4. PARADIGMAS DE EXPLORAÇÃO E ADAPTAÇÃO DO ESPECTRO**
 1. *Interweave*
 2. *Underlay*
 3. *Overlay*
- 5. TÉCNICAS DE MODULAÇÃO PARA CR**
 1. OFDM (DVB-S2, LTE),
 2. MC-WPM - Multiportadora-Transformada por Pacotes *Wavelet*
 3. ACM – Modulação e Codificação Adaptativa

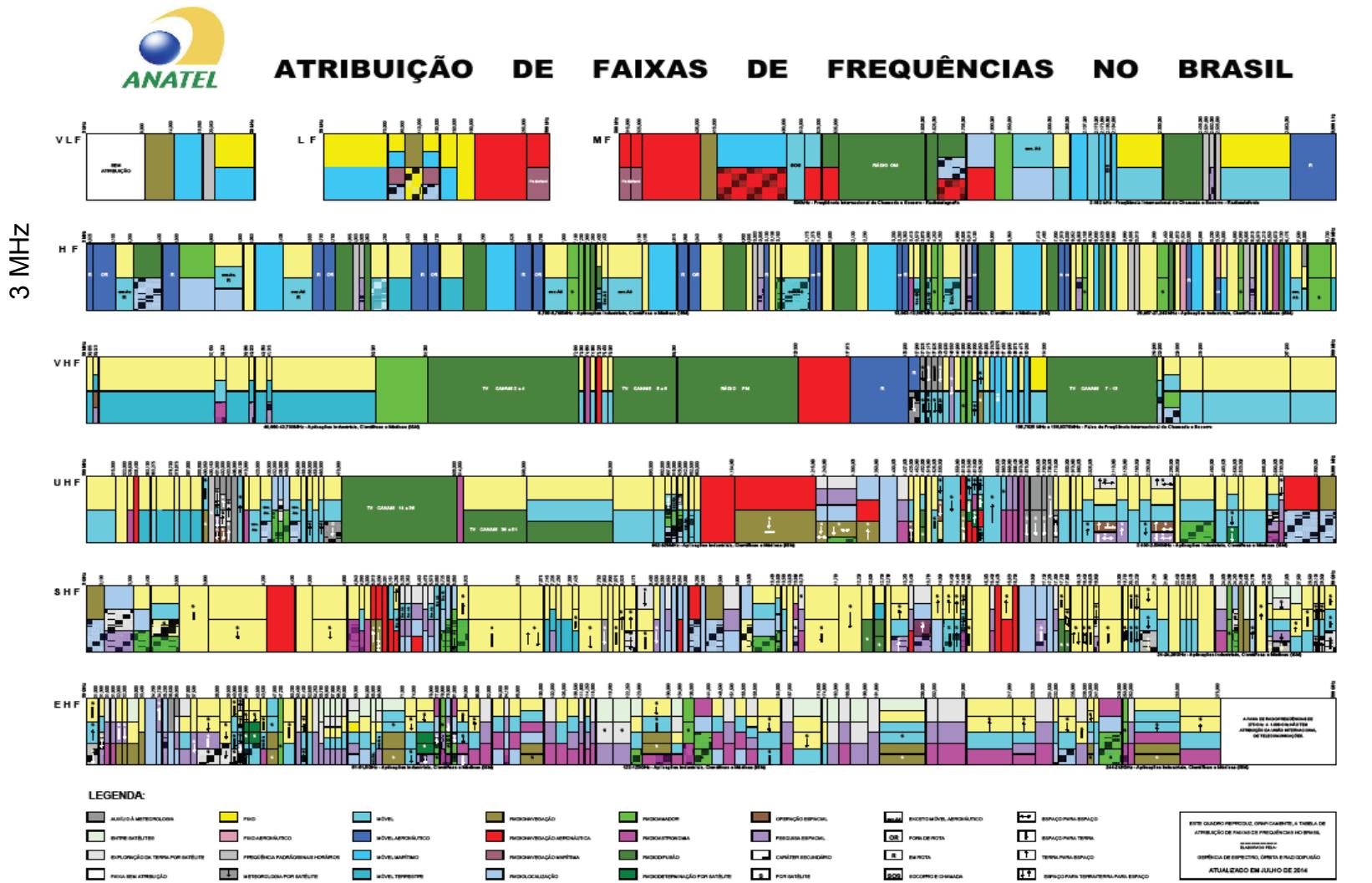
SUMÁRIO

- 6. COGNIÇÃO EM COMMUNICAÇÃO POR SATELITE**
- 7. REFERÊNCIAS**

COGNITIVE WIRELLES COMMUNICATIONS - INTRODUCTION

- Crescente demanda por sistemas de comunicação sem fio de banda larga espectral (alta taxa de transferência de dados) impõe a necessidade do uso flexível e eficiente dos recursos de espectro enquanto sua provisão é limitada devido à segmentação e alocação das frequências dedicadas para sistemas sem fio padronizados (licenciados).
- Políticas locais de alocação do espectro anulam uma livre mobilidade desejada dos equipamentos de radiocomunicação. Quase todos os recursos espectrais disponíveis estão licenciados, portanto, há pouco ou nenhuma banda para adicionar novos serviços, a menos que algumas das licenças existentes sejam descontinuadas.
- Essa escassez tem motivado a progressão do conceito de comunicação por Radio Cognitivo (CR), que compreende uma variedade de técnicas que permitem a coexistência de sistemas licenciados e não licenciados sobre o mesmo espectro – usuário licenciado/primário (LU/PU) e usuário não licenciado (de aluguel)/secundário (RU/SU).
- Além dessa noção de compartilhamento espectral, estudos e medições recentes mostraram que vastas porções do espectro licenciado não são usadas ou são subutilizadas em um determinado período de tempo ou de localização geográfica – razão: regulamentação inflexível do espectro.

INTRODUCTION



INTRODUCTION

- O CR tem soluções promissoras para conciliar os conflitos existentes entre o crescimento da demanda por espectro e sua subutilização, bem como aumentar a eficiência geral da exploração do espectro.
- Esta ampla variedade de paradigmas e de técnicas de arquitetura para permitir a coexistência espectral dos usuários PU e SU só foi possível com os recursos de Rádio Definido por Software.
- O conceito CR foi primeiramente proposto por Joseph Mitola em 2000 em sua tese de doutorado [1]. Recentemente, em [2], um Sistema CR (CRS) é definido como “O CRS emprega tecnologias que permitem ao sistema obter conhecimentos do seu ambiente operacional e geográfico, das políticas vigentes e do seu estado interno; para ajustar dinamicamente e autonomamente seus parâmetros e protocolos operacionais, de acordo com estes conhecimentos obtidos, para atingir objetivos pré-definidos; e aprender com os resultados obtidos”.
- Examinando as pesquisas sobre CR nestes 18 anos, verificamos que a investigação de CR nos primeiros 10 anos permaneceu ativamente nas redes terrestres. As abordagens de CR para comunicação por satélite só recentemente ganharam grandes impulsos na literatura.

INTRODUCTION

- Em um contexto geral, de acordo com [3], existem duas abordagens amplamente utilizadas para melhorar a eficiência espectral em sistemas sem fio atuais: utilizando o acesso oportunista ao espectro, denominado *Dynamic Spectrum Access* (DSA) e, permitindo o compartilhamento do espectro disponível entre os sistemas primários e secundários, chamado *Spectrum Sharing*.
- As técnicas operacionais mais comuns e básicas disponíveis para todos os CR propostos podem ser descritas em forma de um ciclo cognitivo contínuo:
 - (1) Consciência do espectro: a primeira tarefa para um CR é estar ciente de seu ambiente de rádio circundante,
 - (2) Análise e decisão: analisar as informações adquiridas e tomar uma decisão inteligente sobre como usar os recursos disponíveis de forma eficaz, e
 - (3) Exploração e adaptação do espectro: o CR adapta autonomamente seus parâmetros operacionais, como potência de transmissão, frequências e bandas ocupadas, modulação e esquema de codificação, padrão do feixe da antena, etc., a quaisquer condições ambientais para explorar as oportunidades espetrais disponíveis efetivamente.

INTRODUCTION

- A capacidade de consciência espectral permite ao CR obter informações sobre as oportunidades espetrais dinamicamente; a capacidade de adaptação do espetro auxilia um CR a explorar as oportunidades espetrais disponíveis de forma eficiente.

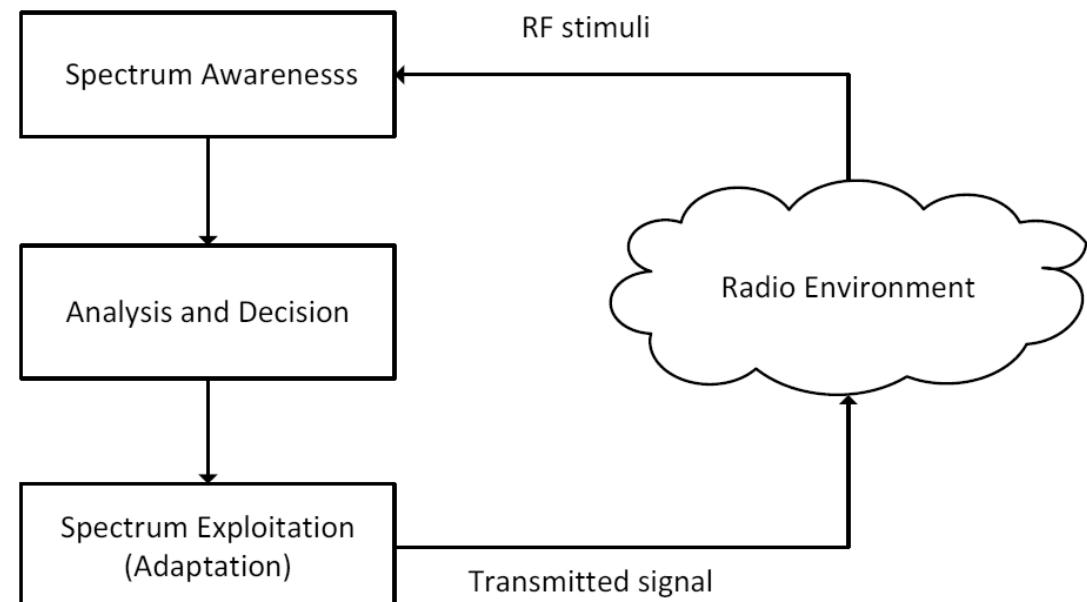


Figure 2: Um ciclo cognitivo simplificado

INTRODUCTION

▶ Buracos espectrais

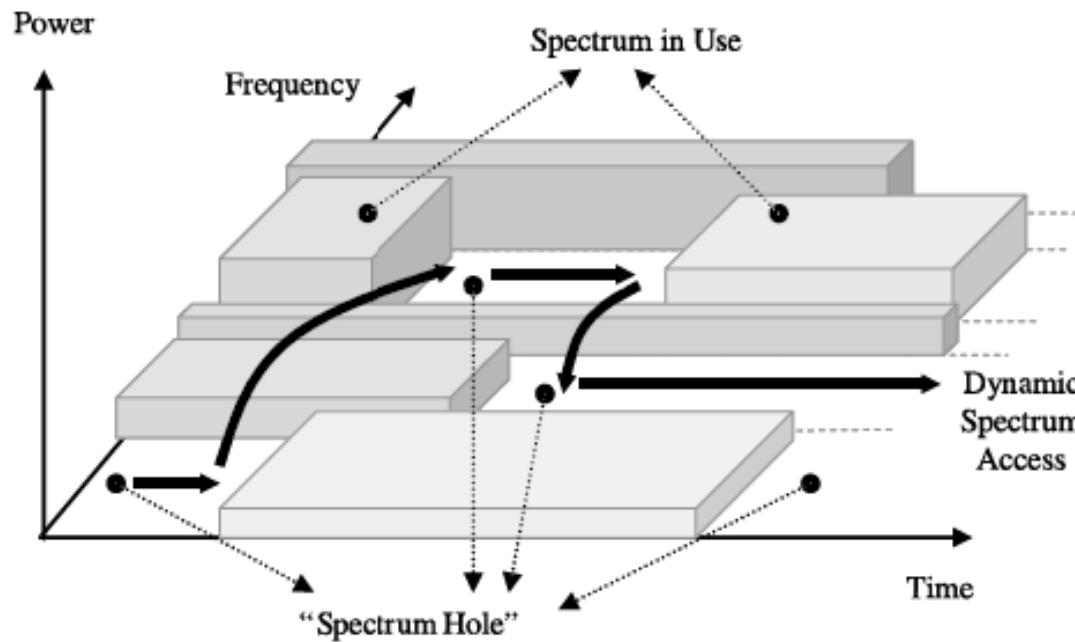
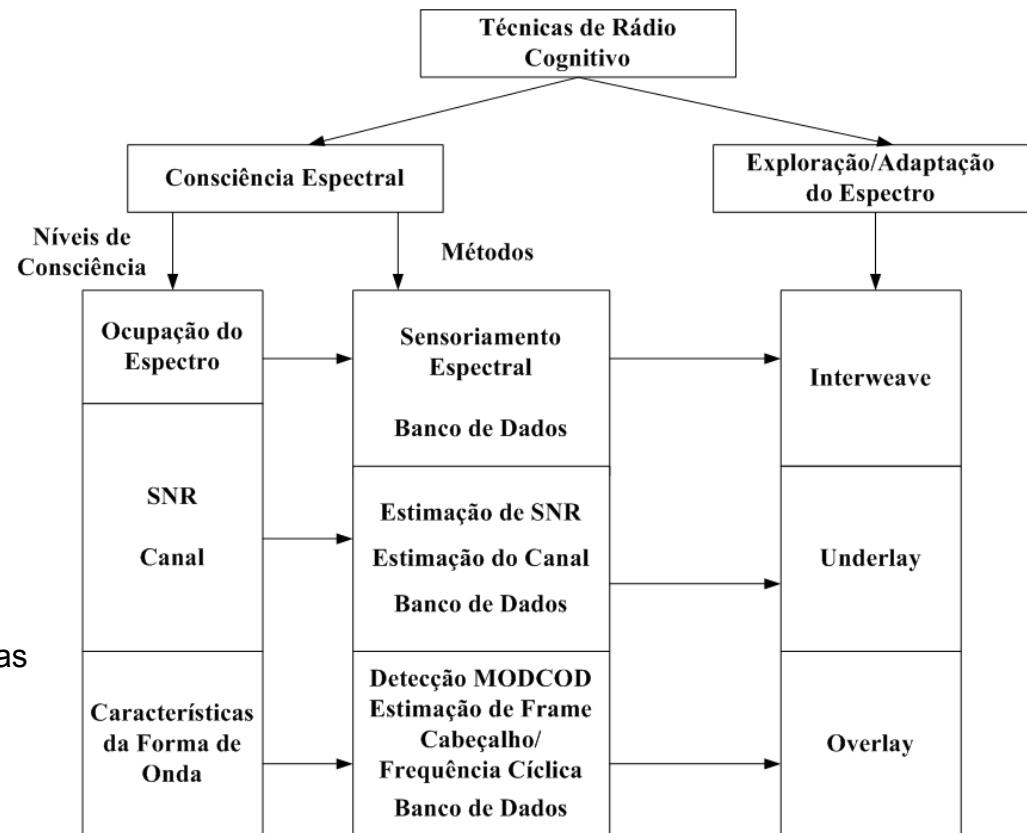


Figure 3. Ilustração de buracos espectrais

SPECTRUM AWARENESS TECHNIQUES

- Nível de consciência e métrica necessária para fins de exploração do espectro - diferentes métodos de consciência espectral podem ser empregados, como mostrado na Figura 4.



SPECTRUM AWARENESS TECHNIQUES

- 1. Banco de dados:** O banco de dados de localização geográfica é uma abordagem alternativa de conscientização do espectro para obter o conhecimento do ambiente de rádio e pode ser usado para consultar vários níveis de informações requeridos pelo CR.

Os parâmetros de uso do espectro do sistema primário, como o local, tempo, frequência, etc., são armazenados em um banco de dados centralizado.

Pode conter também informações sobre os históricos com métodos de predição, para tornar a operação mais eficiente. Esta abordagem tem que receber manutenção constante na base de dados, i.e., com informações sobre o uso do espectro regional (localização), parâmetros e tecnologias do rádio, etc.

SPECTRUM AWARENESS TECHNIQUES

2. Sinais de beacon: Este método de conscientização é baseado nos sinais de beacon da radiodifusão regional nos canais de sinalização apropriados dos sistemas primários.

Os sinais de beacon (localização) podem conter informações sobre o uso do espectro do PU, tendências de tráfego e uso futuro de frequências, etc.

Essa abordagem exige um acordo entre os operadores do sistema primário e secundário, a fim de compartilhar as informações de uso do espectro da rede primária em tempo real.

SPECTRUM AWARENESS TECHNIQUES

3. **Sensoriamento do Espectro:** SS é um mecanismo importante para a aquisição de informações de ocupação do espectro pelo PU.

Visa explorar os buracos espectrais em vários domínios, como tempo, frequência, espaço, polarização e angular.

O transmissor secundário (ST) é equipado com uma cadeia de RF de detecção, com capacidade para detectar a presença ou ausência de PUs, aplicando técnicas de processamento de sinal.

Dependendo do mecanismo de processamento de sinal a ser empregado, existem várias técnicas de SS.

SPECTRUM SENSING TECHNIQUES

1. **Detecção de Energia** : ED é a abordagem mais comum de SS devido à sua baixa complexidade computacional e simples implementação.

Permite a detecção do sinal do PU comparando a saída de um detector de energia com um limiar predeterminado que depende do ruído de fundo do ambiente.

Tem desvantagens, como a incapacidade de diferenciar a interferência de PUs e o ruído, principalmente, com pobre desempenho sob baixos valores de SNR.

2. **Detecção baseada em Filtro Casado**: A filtragem casada é reconhecida como o método ideal para detecção de PUs quando o sinal transmitido é conhecido.

A principal vantagem do filtro casado é que ele requer menos tempo para atingir certa probabilidade de falso alarme ou probabilidade de detecção incorreta, em comparação com outros métodos, devido à sua funcionalidade coerente.

Mas tem as seguintes desvantagens: necessidade de um receptor dedicado para cada tipo de PU; requer sincronização entre o transmissor e o receptor.

SPECTRUM SENSING TECHNIQUES

3. Detecção baseada em Autovalores: Foram introduzidas diversas técnicas de otimização, como técnicas cooperativas e com sobreamostragem, de antenas múltiplas, para melhorar a eficiência de SS em canais sem fio com fading.

Na maioria desses métodos, as propriedades dos autovalores da matriz de covariância do sinal recebido são consideradas utilizando os avanços recentes da Teoria das Matrizes Aleatórias.

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.

SPECTRUM EXPLOITATION PARADIGMS

Com base no nível de conhecimento dos sinais de transmissão dos PUs, as técnicas existentes de exploração do espectro podem ser classificadas em técnicas de interweave, underlay e overlay.

1. **Interweave**: Abordagem de coexistência espectral incorpora a prevenção de interferência ou técnicas oportunistas no objetivo de permitir que os rádios cognitivos se comuniquem oportunisticamente usando buracos espectrais no espaço, tempo e frequência que não são ocupados pelas PUs.

O ambiente circundante deve ser constantemente monitorado e identificado para prever a subutilização de cada fração do espectro, a fim de ser acessado por SUs até a inatividade do PU.

As dimensões de polarização e as angulares também podem ser consideradas como dimensões adicionais para fins de exploração do espectro por *interweave*.

SPECTRUM EXPLOITATION PARADIGMS

2. Underlay: As redes em *underlay* são caracterizadas por restrições rigorosas nas interferências que podem ser causadas pelos STs nos PRs.

Nesse paradigma, transmissões cognitivas e não cognitivas simultâneas são permitidas na mesma faixa de frequência, desde que o nível de interferência no PU permaneça aceitável em um nível limite definido.

A comunicação por *underlay* pode ser realizada no ST pelos métodos:

- (i) *beamforming* (conformação do feixe) de antenas;
- (ii) alocação dinâmica de recursos: portadora, potência, etc. no ST;
- (iii) abordagem de *spread spectrum* (espalhamento espectral);
- (iv) usando o princípio da Zona de Exclusão (EZ)

SPECTRUM EXPLOITATION PARADIGMS

3. **Overlay:** Redes Caracterizadas pela mitigação de interferência utilizando estratégias de codificação e transmissão avançadas nos STs, bem como quando o SU está transmitindo simultaneamente com o PU, a interferência causada pelo ST ao PR pode ser compensada usando parte do ST para retransmitir, ao mesmo tempo, a mensagem do PU.

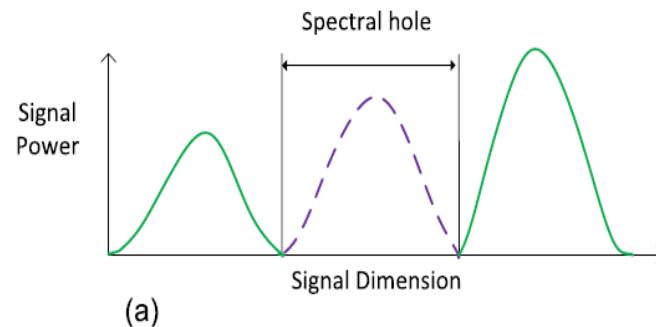
O transmissor cognitivo deve ter conhecimento das codificações e ganhos do canal do PU, bem como, dos protocolos das mensagens.

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.

Possíveis formas de adquirir as características da forma de onda do PU: abordagens de estimativa, como detecção e classificação de MODCOD, estimativa de cabeçalho de quadro, frequências cíclicas, etc.

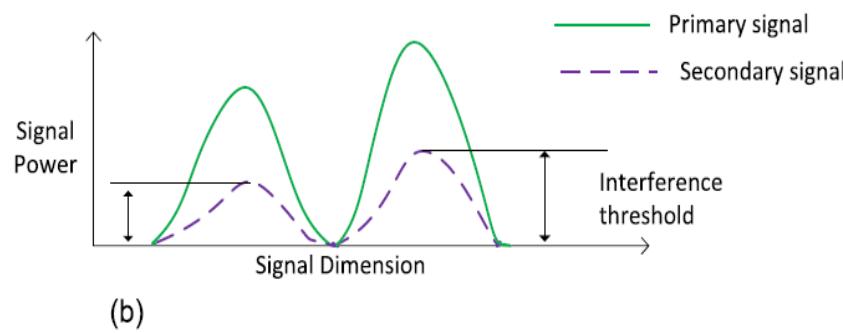
SPECTRUM EXPLOITATION PARADIGMS

Interweave



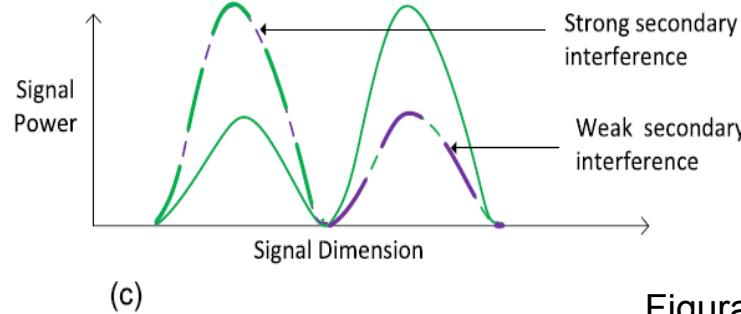
(a)

Underlay



(b)

Overlay



(c)

Figura 5: Esquemas de Exploração

CR MODULATION TECHNIQUES

Para sistemas terrestres, e que já foram extrapolados em estudos para uso em satélites, existem algumas estratégias de modulação empregadas para realizar a coexistência entre o sistema SU e PU e isto é feito de tal forma que os SUs são invisíveis para os PUs.

(O acesso cognitivo de uma banda PU não ocupada é considerado como um paradigma de *interweave*).

A multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) tem sido aplicada como um esquema de modulação de multiportadora adequado em aplicações CR.

CR MODULATION TECHNIQUES

OFDM é bem conhecido como um modo de modulação espectralmente eficiente devido ao seu espectro de portadoras sobrepostas as quais devem ainda permanecerem ortogonais entre si, e fornece uma taxa de bits mais alta em comparação com a transmissão de portadora única.

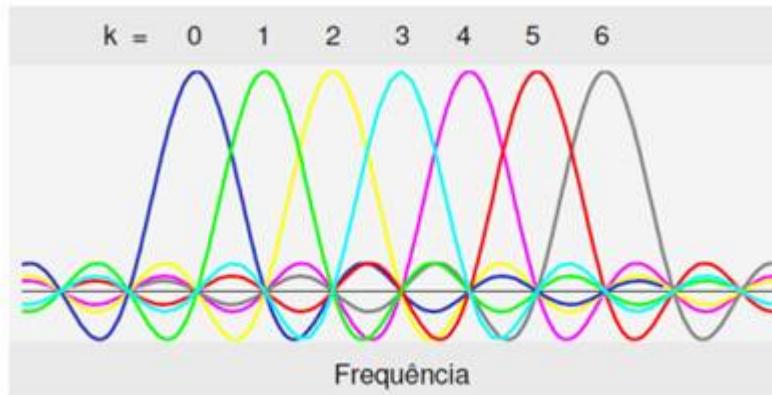


Figura 6: OFDM subportadoras ortogonais

Recentemente, pesquisas foram desenvolvidas para substituir as funções base senoidais do OFDM por bases *wavelet* devido à sua flexibilidade e adaptabilidade que pode ser empregada para satisfazer melhor as demanda de *design* de engenharia. (Técnica multiportadora denominada **MC-WPM**).

CR MODULATION TECHNIQUES - OFDM

1. OFDM

Motivação: Um sistema CR precisa de um sensor de espectro em seu ambiente e isso envolve algum tipo de análise espectral por processamento de sinal. Transformada Rápida de Fourier (FFT) pode ser usado para análise espectral e, ao mesmo tempo, atuar como um demodulador OFDM.

OFDM também tem a capacidade de suprimir partes de suas subportadoras que podem corresponder a uma região da banda do PU. Essa flexibilidade OFDM simplifica a aplicação do acesso ao espectro dinâmico em CR.

A técnica de supressão de portadoras OFDM para aplicação em CR é chamada de agrupamento do espectro. As deficiências do OFDM se voltam aos altos lóbulos laterais que resultam em interferência significativa entre as subportadoras originárias de diferentes SUs, ou entre SUs e PUs. Nesse caso, técnicas podem ser empregadas para a supressão de lóbulos laterais nas bandas de interesse.

OFDM

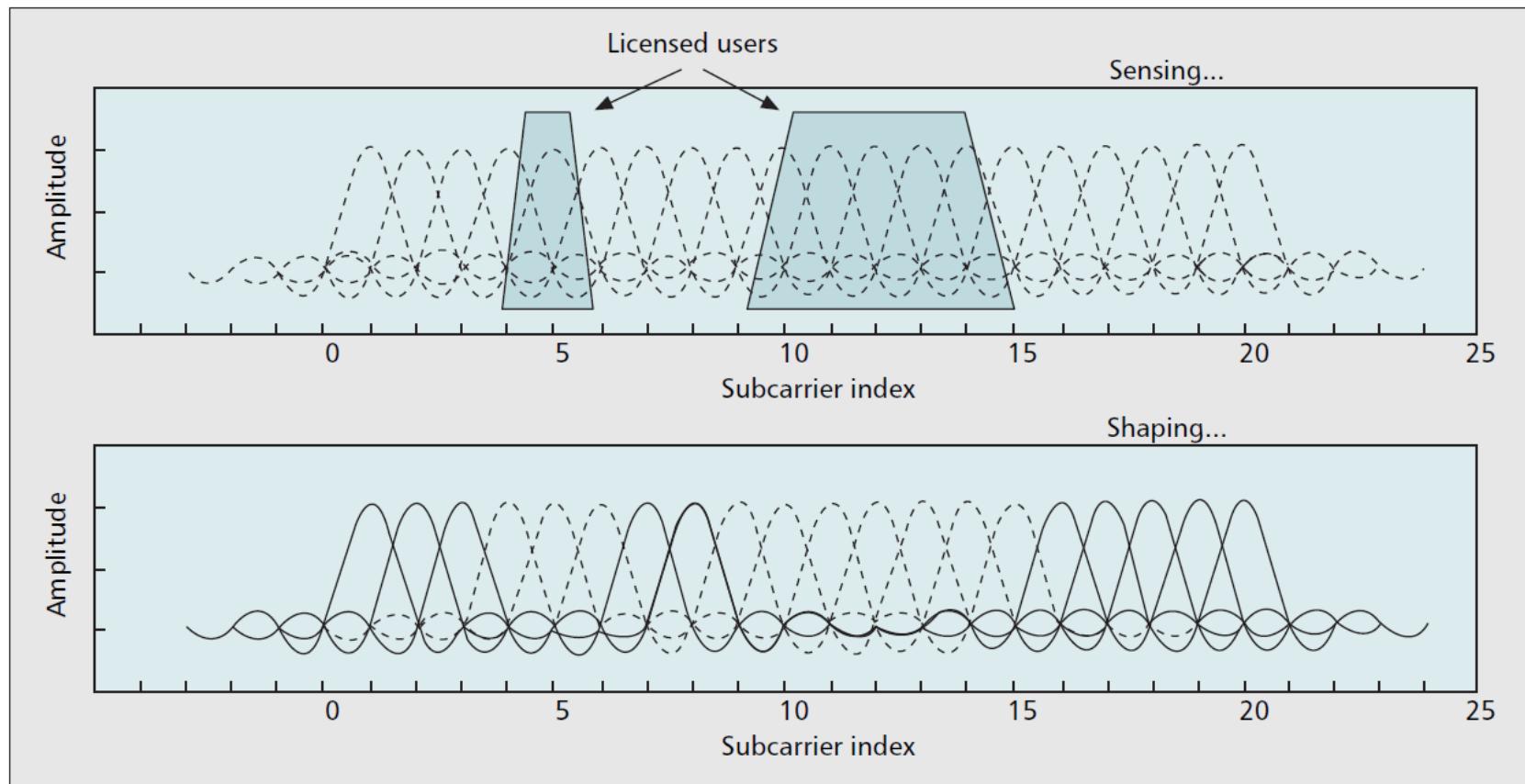


Figure 7: Spectrum sensing and shaping using OFDM

OFDM

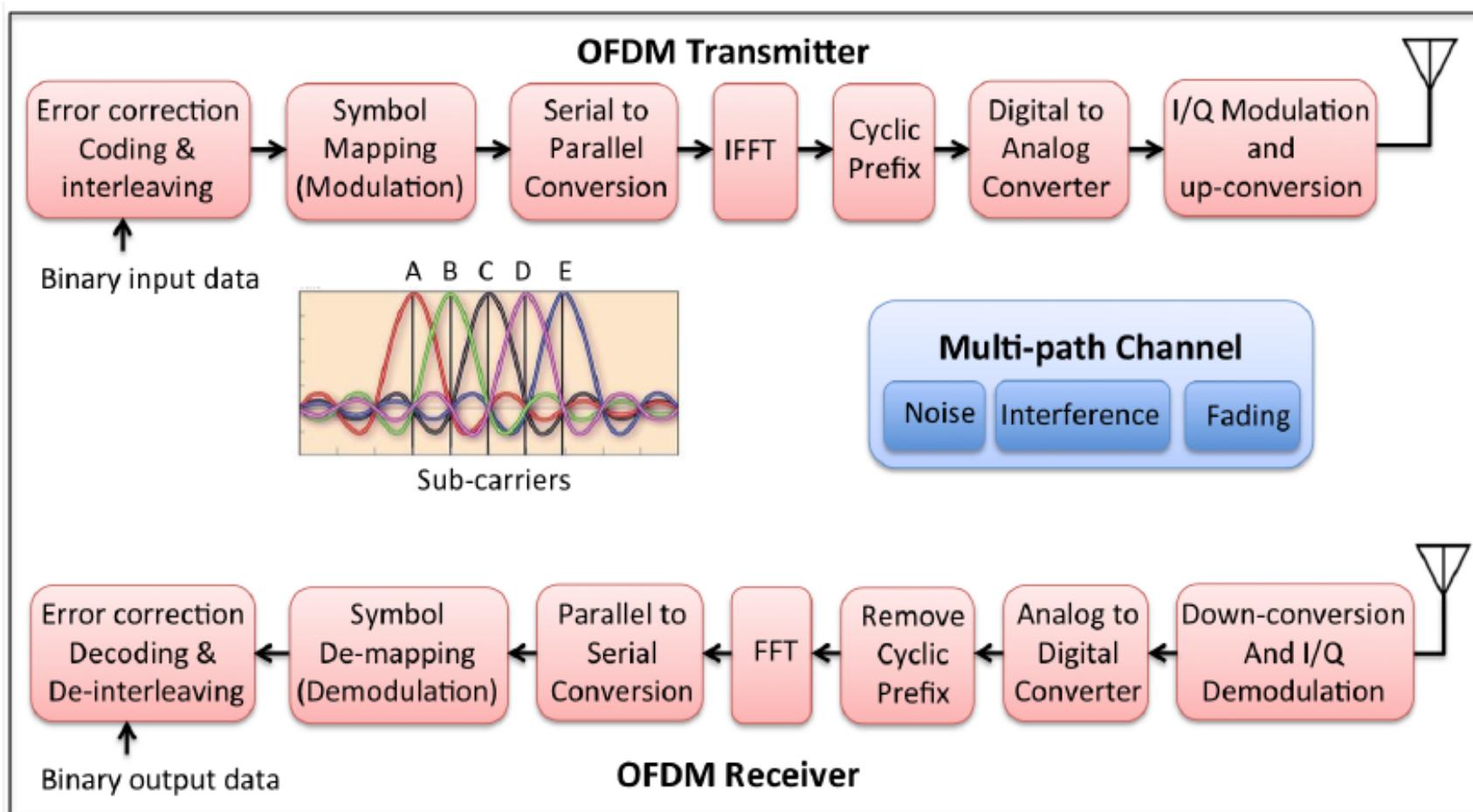


Figura 8: Diagrama de Blocos Funcional

CR-OFDM

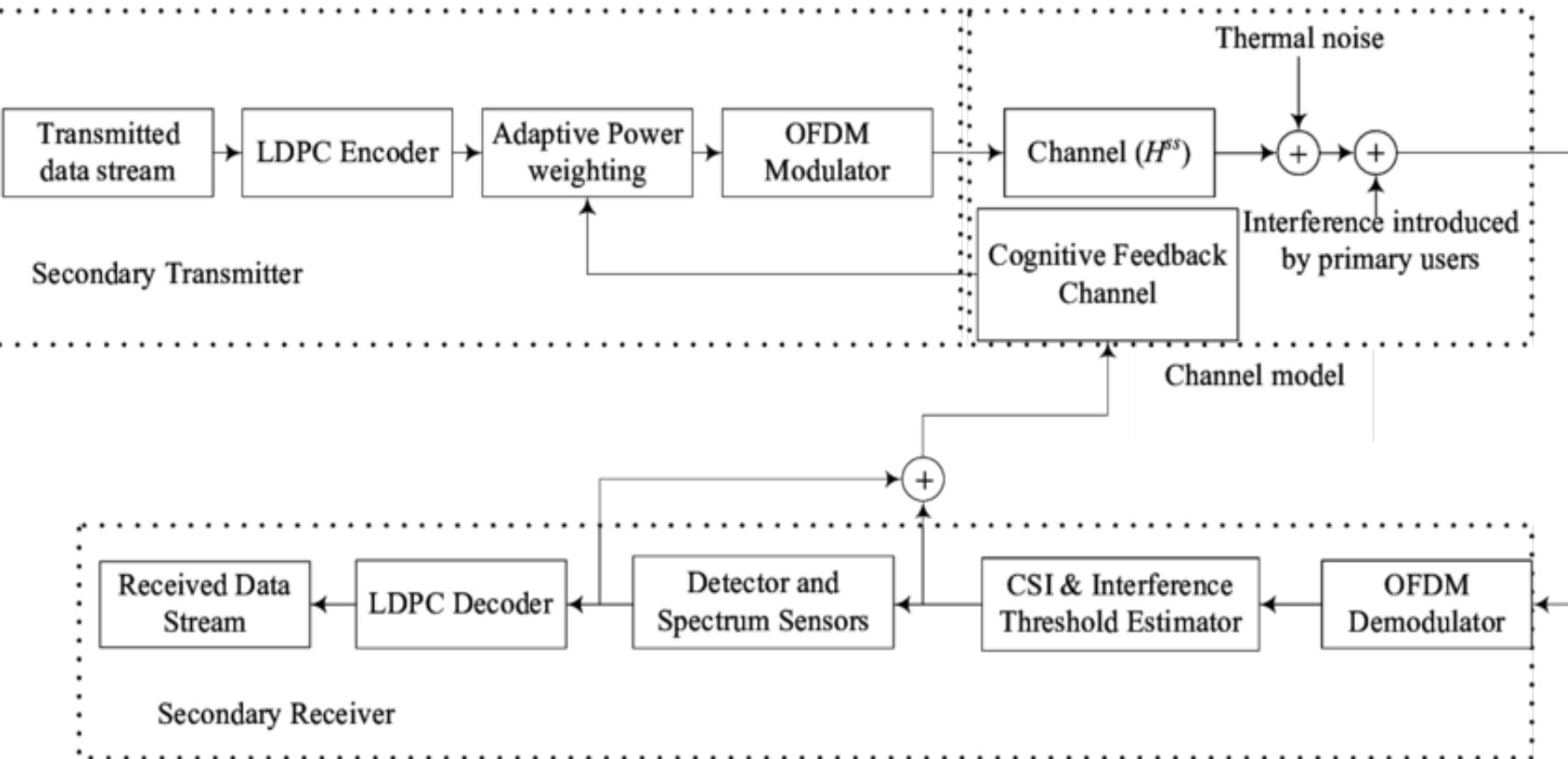


Figura 8: Diagrama de Blocos CR-OFDM

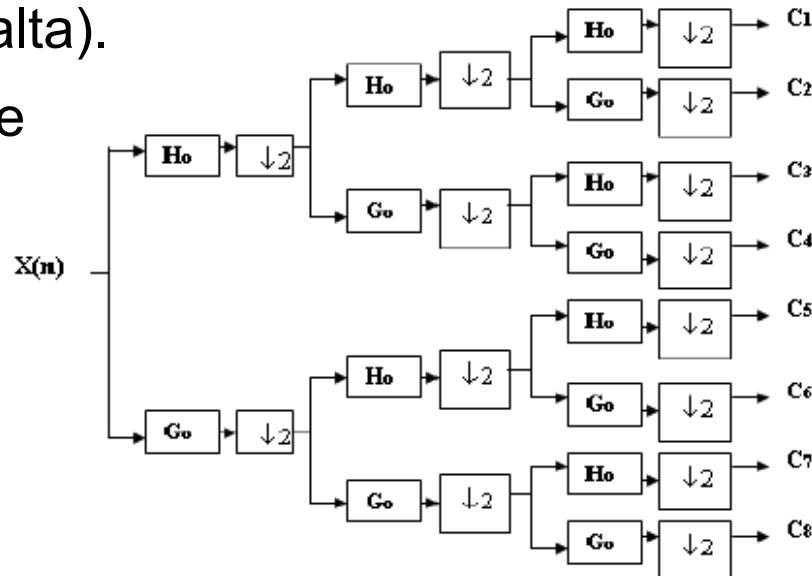
CR MODULATION TECHNIQUES – MC-WPM

2. MC-WPM

Na modulação multiportadora por pacotes *wavelet* (MC-WPM), a transformada de Fourier usada em OFDM é substituída por bases de pacotes *wavelet* ortonormais .

As bases de pacotes *wavelet* possuem bases duais, obtidas da solução de banco de filtros (estruturados em árvore de múltiplos estágios) de resposta ao impulso finito (FIR) de duas bandas (passa baixa e passa alta).

A transformada *wavelet* fornece maior supressão de lóbulos laterais quando comparada com o OFDM regular.



CR MODULATION TECHNIQUES – ACM

- **Técnica: Adaptive Coding and Modulation (ACM)**

As técnicas avançadas de *downlink* para altas taxas de dados (HDR) baseiam-se no uso adequado de modulação e codificação (MODCOD).

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 Amplitude e Fase (APSK). O APSK LDPC está se tornando o padrão de próxima geração para *downlink* de HDR, sob a padronização DVB-S2 (DVB-S2X).

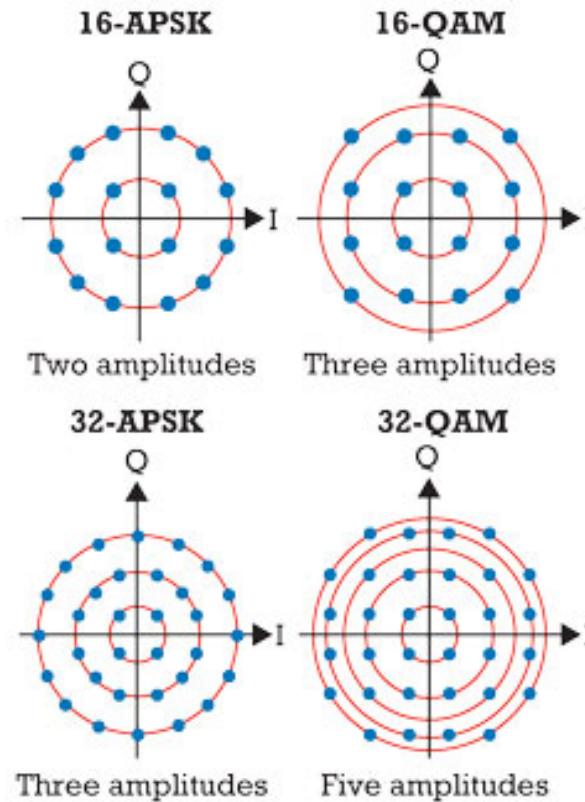
A ideia fundamental dos códigos LDPC é usar um codificador simples capaz de produzir longas *codewords* com propriedades *word-distance* excepcionais e técnicas de baixa complexidade baseadas numa estrutura predefinida do codificador. O parâmetro do sistema a ser controlado pode ser sintetizado como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

A constelação APSK funciona melhor que QAM na presença de distorções não lineares causadas por amplificadores de potência operando na saturação.

CR MODULATION TECHNIQUES – ACM

- Adaptive Coding and Modulation (ACM)**

Constelações APSK funcionam melhor que as QAM na presença de não linearidades.



ACM

Exemplo: DVB-S2

DVB-S2 coding /modulation	efficiency bit/channel symbol	E_S/N_0 for $10^{-7} P(e)$	Percentage of being in this mode (CCSDS)
QPSK 5/6	1.654	5.2	15.0
8PSK 2/3	1.980	6.7	12.5
8PSK 3/4	2.228	8	20.3
8PSK 5/6	2.478	9.4	14.2
16 APSK 3/4	2.966	10.3	25.0
16 APSK 5/6	3.330	11.7	13.0

TABLE I
ACM AS PROPOSED BY CCSDS

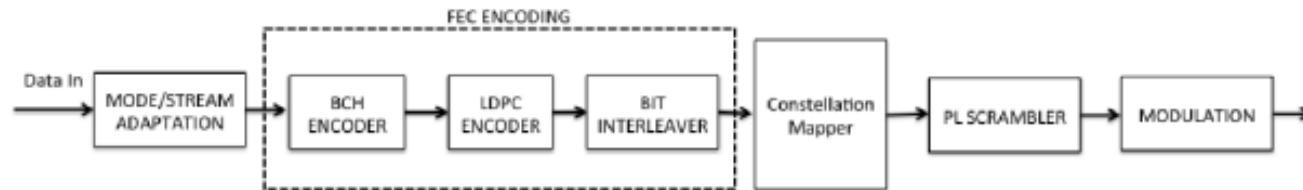


Fig. 2. Functional block scheme of the DVB-S2

ACM

Demonstração do ACM para otimizar a transmissão, permitindo que os parâmetros de transmissão sejam alterados quadro a quadro, dependendo das condições particulares do link de transmissão.

Usando uma combinação de modos de transmissão, como sugerido pelo CCSDS para DVB-S2, conforme a Tabela anterior, para uma taxa de 100 Msymbol, a taxa de informação média é dada por

$$15 \times 1.654 + 12.5 \times 1.980 + 20.3 \times 2.228 + 14.2 \times 2.478 + 25 \times 2.966 + 13 \times 3.330 = 247.4 \text{ Mbps.}$$

Cognition in Satellite Communication

- **SatCom Cognitivo**

Numa visão geral (de acordo com [4]), SatCom Cognitivo é definido como uma tecnologia de comunicação avançada que permite a coexistência espectral entre duas redes diferentes de satélite ou de redes satélite/terrestres, empregando alguma das técnicas adequadas de CR.

Correntemente, SatCom está sendo usado em várias aplicações, como *Direct To Home* (DTH), *Very Small Aperture Terminal* (VSAT), serviços móveis (MobileSat, Iridium, Globstar, etc.), *Satellite News Gathering* (SNG), defesa, radionavegação (GPS, Galileo, GLONASS), observação da terra, serviços marítimos e aeronáuticos, comunicações de socorro em caso de emergência/desastres, redes corporativas e acesso privado à Internet, etc.

Conforme o tipo de serviço, os sistemas satélite podem ser divididos em:

(i) Fixed Satellite Service (FSS), (ii) Mobile Satellite Service (MSS), (iii) Broadcasting Satellite Service (BSS), (iv) Earth Exploration Satellite Service (EESS), (v) Space Research Service (SRS), etc.

Cognition in Satellite Communication – Example

Os principais sistemas relacionados à satélites de telecomunicação são: FSS, MSS e BSS.

- **Ex.: A proposta do CoRaSat [5]:**

O projeto visa estender o trabalho feito em Rádio Cognitivo nos campos terrestres e móveis para serviços de satélite.

Participantes: University of Bologna - Itália; SES - Luxemburgo; Thales Alenia Space - França; University of Luxemburg - Luxemburgo; Newtec Ny - Bélgica, University of Surrey - Reino Unido.

Cenários das bandas de frequencia

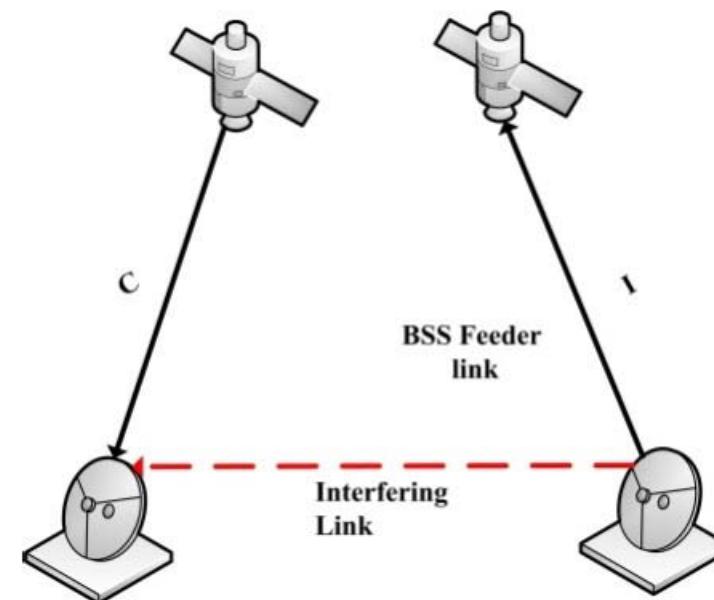
Para os seguintes planos de frequência, diferentes cenários de interferência são definidos no projeto CoRaSat, conforme indicado a seguir.

Cognition in Satellite Communication – CoRaSat

- **No Cenário A** (coexistência entre o downlink de um FSS com o uplink de um BSS em 17,3 GHz - 17,7 GHz, a questão principal é a coordenação dos terminais cognitivos do FSS com o uplink do BSS em operação primária.

Como o número de locais dos alimentadores do BSS é normalmente pequeno e estático, informações precisas sobre eles podem ser facilmente adquiridas. Nesse cenário, técnicas de compartilhamento dinâmico podem ser redundantes. Um mecanismo simples de coordenação baseado em áreas de proteção pode ser implementado para fornecer acesso cognitivo aos terminais FSS.

Figura 9: Cenário A



Cognition in Satellite Communication – CoRaSat

- **In Scenario B** (coexistência entre o downlink de FSS com o link de microondas (FS) em 17,7 GHz - 19,7 GHz), a técnica promissora para evitar interferências prejudiciais no CR é detectar a transmissão dos FS, que normalmente são de número muito grande.

O bancos de dados dos FS podem ser um passo muito útil para reduzir a complexidade do sensoriamento espectral para os terminais FSS em grandes áreas geográficas.

O conhecimento sobre os parâmetros dos links FS, como potência, diretividade e largura de banda, é importante para determinar o limiar de detecção.

Quando um terminal FSS detecta interferência dos transmissores FS, o sistema FSS precisa aplicar as ações cognitivas: alternar para bandas exclusivas, técnicas de alocação de recursos/portadoras, beamforming para atingir a QoS desejada do link FSS cognitivo.

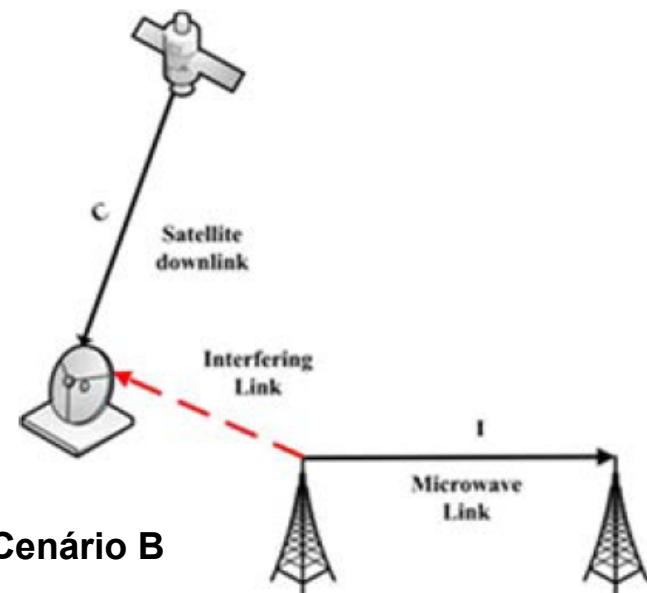


Figura 10: Cenário B

Cognition in Satellite Communication – CoRaSat

- In Scenario C (coexistência entre os *uplinks* FSS com os links FS em 27,5 GHz - 29,5 GHz), a questão principal é a proteção dos receptores FS da transmissão do *uplink* do FSS.

Para gateways FSS que operam nesta banda, o processo de coordenação é atualmente mais simples, já que são poucos.

Para uma demanda futura por capacidade adicional de uplink de um grande número de terminais de usuários do FSS, podem ser adotadas técnicas semelhantes às adotadas para os cenários A e B.

Com base nos mapas de interferência ou nos bancos de dados disponíveis, além de um esquema de alocação de recursos, o EIRP do FSS pode ser controlado para garantir proteção ao FS.

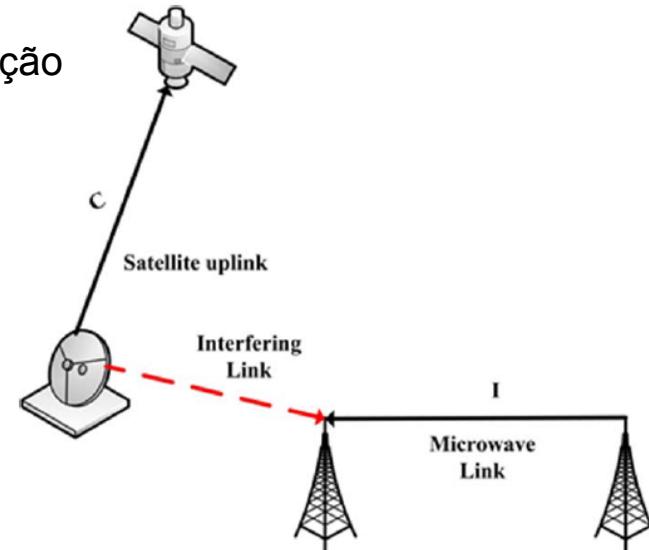


Figura 11: Cenário C

INTRODUÇÃO

□ Referências

1. MITOLA, J. **Cognitive radio-an integrated agent architecture for software defined radio**. Royal Institute of Technology – Sweden, 2000.
2. “ETSI TR 103 263 V1.2.1 (2016-02): Technical Report; System Reference document (SRdoc); **Cognitive Radio Techniques for Satellite Communications Operating in Ka Band**,” ETSI, July 2014, available: <http://www.etsi.org/standards-search>
3. SHARMA, S., K. et al. Cognitive radio techniques under practical imperfections: A survey. **IEEE communications surveys and tutorials**, 2015.
4. SHARMA, S., K.; CHATZINOTAS, S.; OTTERSTEN, B. Cognitive radio techniques for satellite communication systems. In: **Vehicular Technology Conference (VTC Fall)**, 2013 IEEE 78th. IEEE, 2013. p. 1-5.
5. EVANS, B. et al. Extending the usable Ka band spectrum for satellite communications: The CoRaSat project. In: **International Conference on Wireless and Satellite Systems**. Springer, Cham, 2015. p. 119-132. T