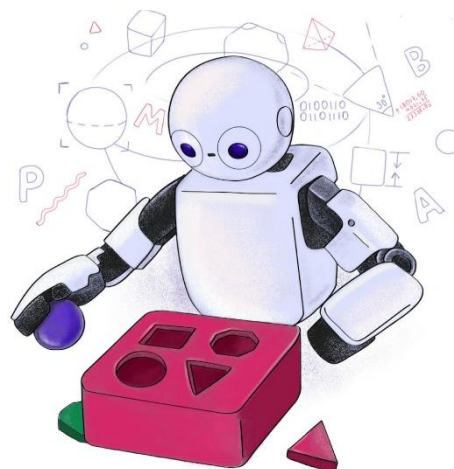


Sensoriamento Espectral e Simulação de Ocupação de Espectro Utilizando Redes Neurais Artificiais



Inatel

Luiz Renault Leite Rodrigues
luiz.rodrigues@dtel.inatel.br

Conceitos

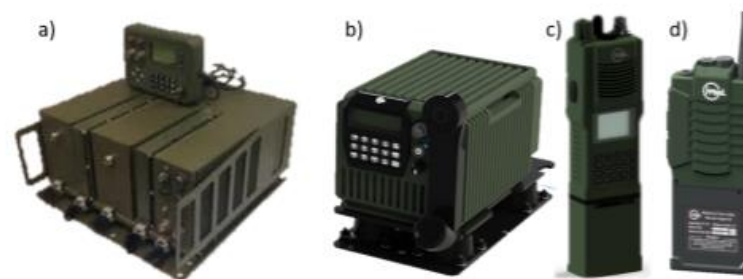
- *Rádio Cognitivo*: É um Rádio Definido por Software capaz de realizar funções relacionadas à “etiqueta de uso” do espectro de radiofrequências (isto é, sensoriar para respeitar as regras que moderam o uso do espectro).
- *Sensoriamento Espectral*: É a funcionalidade responsável pelo sensoriamento que embasará as decisões relacionadas ao uso do espectro.

Exemplo: Um rádio cognitivo que opera em caráter secundário deve evitar interferências na operação de um rádio operando em caráter primário.

- *Forma de Onda*: No contexto de Rádios Definidos por Software, é o nome dado ao software que roda no Rádio

Relevância do Tema: Sensoriamento Espectral

- O tema se torna relevante no contexto de modernização de diversos sistemas de telecomunicações
- O crescente avanço do paradigma de Rádios Definidos por Software possibilita a incorporação do sensoriamento espectral às Formas de Onda dos equipamentos



Equipamentos RDS para comunicações militares com diversas FOs em desenvolvimento, as quais o sensoriamento espectral pode ser incluído

Relevância do Tema: Simulação

- Dados e de modelos de ocupação espectral são escassos, sobretudo para aplicações mais restritas (militares, segurança pública)
- Capacidade de simulação a partir de dados coletados experimentalmente utilizando modelos com parâmetros ajustados torna-se relevante
- A exploração de algoritmos de aprendizado de máquina no sensoriamento espectral demanda grandes datasets rotulados para serem usados nos processos de treinamento

Redes Neurais Artificiais

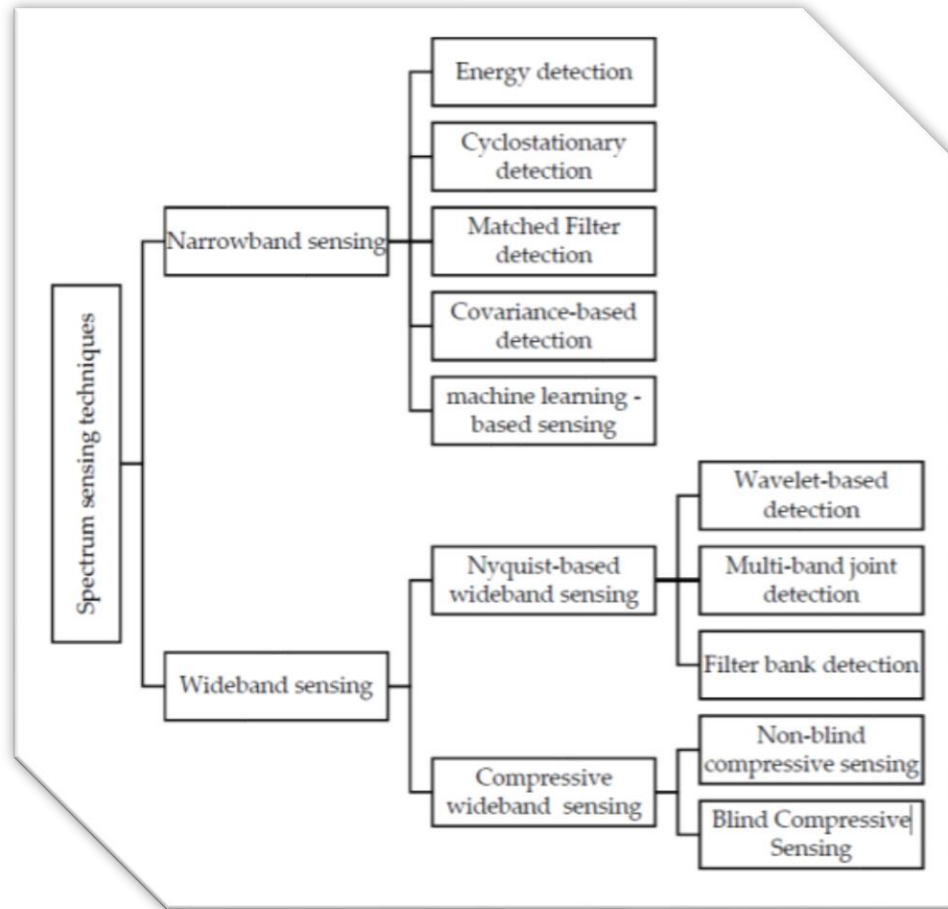
Este é um trabalho de pesquisa e experimentação sobre o emprego de *Redes Neurais Artificiais (RNA)* e *Aprendizado de Máquina* para a modelagem de uso do espectro eletromagnético, no âmbito do sensoriamento espectral para Rádios Cognitivos

RNA:

- ✓ capacidade de modelar complexidades não lineares
- ✓ geração de dados realísticos
- ✓ extrapolação em novos domínios
- ✓ transferência de conhecimento/aprendizado
- ✓ adaptabilidade a mudanças temporais
- ✓ maior acurácia e eficiência em previsões
- ✓ capacidade de lidar com grandes dados

Trabalhos Relacionados

A referência [1] traz um resumo das principais técnicas de sensoriamento espectral, classificando-as nas categorias:

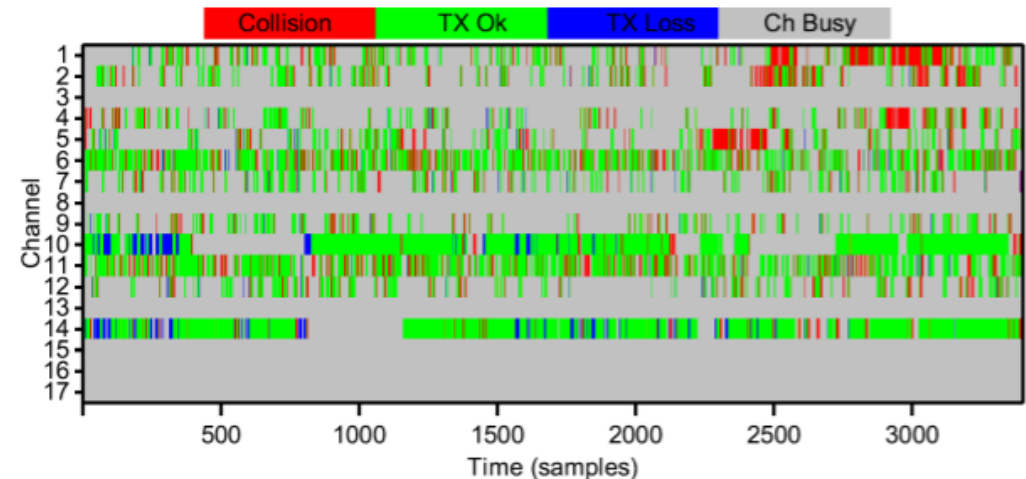


- Nenhum método em [1] cita ser capaz de gerar amostras realistas de ocupação espectral de banda estreita ou larga para uso em simulações de sistemas de rádios cognitivos
- Foco principal é a detecção (cooperativa ou individual) da ocupação ou de ataques cibernéticos relacionados ao sensoriamento espectral

Trabalhos Relacionados: NS-HMM e HBMM

Modelos de Markov Escodidos Não Estacionários (NS-HMM)/
Modelos Bivariados de Markov Escondidos (HBMM):

- A referência [2] mostra o emprego destes modelos na detecção e predição da ocupação espectral utilizando dados reais obtidos durante as Olimpíadas Rio 2016
- Parâmetros são estimados a partir de uma sequência de treinamento que posteriormente são empregados para definir as políticas de uso secundário do espectro.
- Capacidade dos modelos:
 - ✓ Estimação em tempo real a ocupação em banda-estreita
 - ✓ Previsão da duração do estado de ocupação dado o estado atual
 - ✓ Produção de amostras simuladas com características estatísticas similares as dos dados reais modelados



Trabalhos Relacionados: NS-HMM e HBMM

Extensão da aplicação de NS-HMM e HBMM para sensoriamento espectral de banda larga:

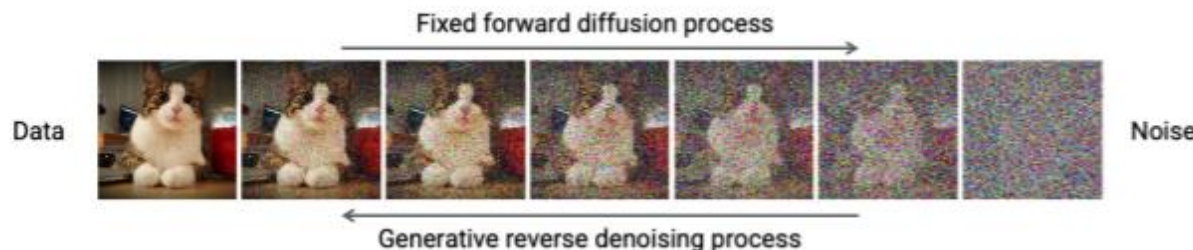
- Aplica-se o modelo individualmente a cada canal da banda
- Eficaz porém ineficiente: aumento considerável de custo computacional, não faz uso de informações de relação estatísticas entre os canais adjacentes

Trabalhos Relacionados: RNG, Modelos de Difusão

- Redes Neurais Generativas (RNG) podem ser utilizadas na melhoria da simulação empregando modelos HBMM [3]
- RNGs geram dados realistas a partir de distribuições estatísticas aprendidas a partir de dados de referência

Aplicações típicas: síntese de imagens realistas, geração de textos coerentes, geração de fala replicando vozes reais, etc

Diferentes arquiteturas: Redes Generativas Adversárias, Auto Codificadores Variacionais e as baseadas em **Modelos de Difusão**



- Ruído é adicionado a um conjunto de dados de interesse, amostras ruidosas são geradas
- Rede é treinada para “observar” o processo de difusão do ruído até a completa corrupção dos dados originais
- Rede aprende a realizar o processo inverso e estimar dados puros a partir de amostras ruidosas

Escopo e Objetivos Propostos

O problema tratado neste projeto é o *sensoriamento espectral de banda larga* com o objetivo de:

- (i) Detectar o uso do espectro de radiofrequência
- (ii) Realizar previsões sobre o uso futuro baseado no estado presente e passado
- (iii) Gerar amostras de ocupação espectral utilizando um modelo treinado a partir de amostras reais de uso do espectro

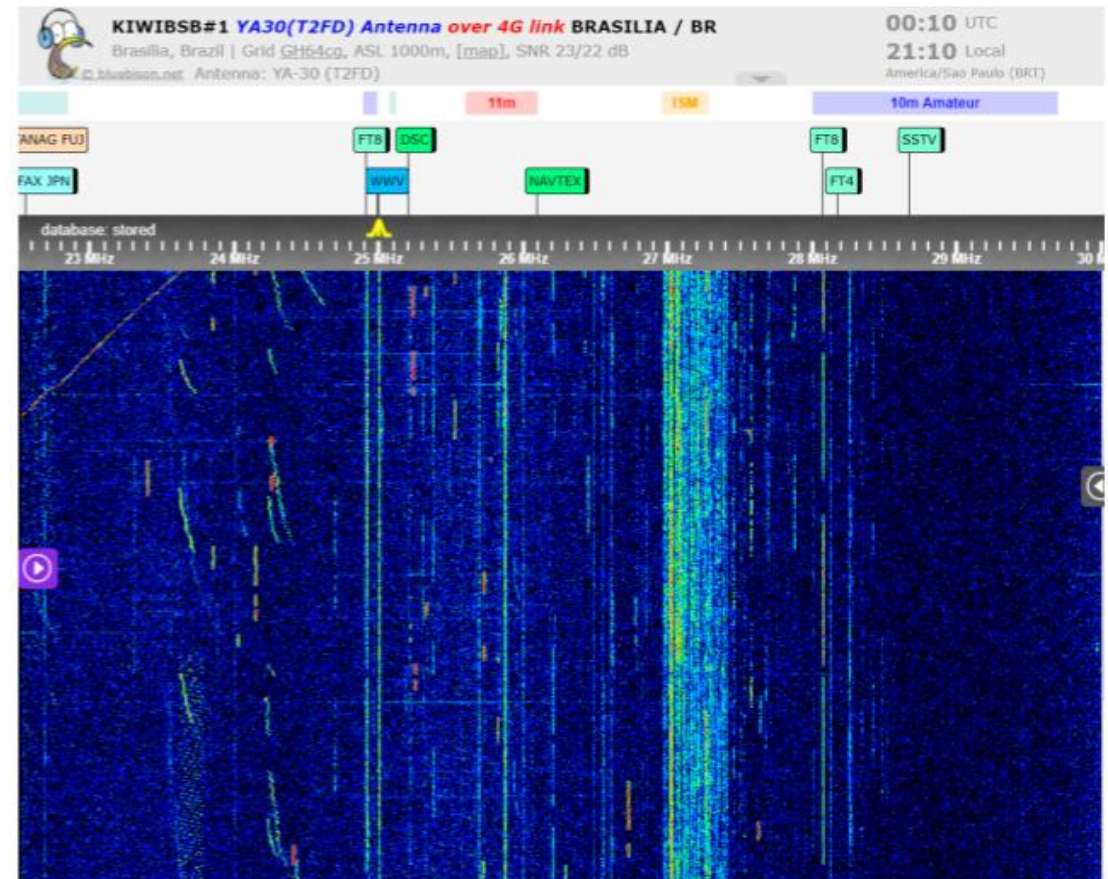
Escopo e Objetivos Atingidos

O problema tratado neste projeto é o *sensoriamento espectral de banda larga* com o objetivo de:

- (i) Detectar o uso do espectro de radiofrequência
- ~~(ii) Realizar previsões sobre o uso futuro baseado no estado presente e passado~~
- (iii) Gerar amostras de ocupação espectral utilizando um modelo treinado a partir de amostras reais de uso do espectro

Descrição do Problema

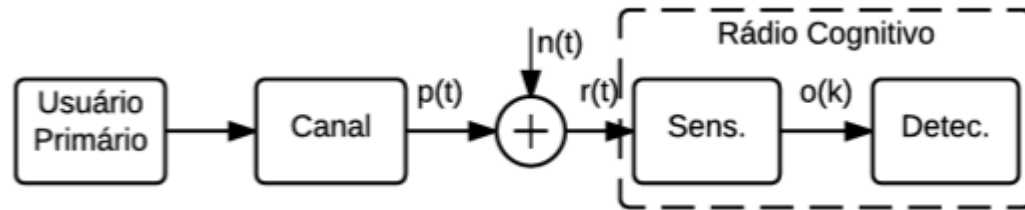
- Um Rádio Cognitivo que queira fazer o uso secundário de uma frequência deve ser capaz de transmitir apenas quando não há outros usuários ocupando a frequência desejada
- É necessário que o RC infira sobre o estado de ocupação da frequência desejada e sobre o tempo que estará disponível para uso
- Para isso, é necessário guardar informações prévias sobre o uso dos canais, o que normalmente não ocorre em aplicações práticas



Um espectrograma obtido por RDS possibilita a visualização da ocupação dos canais na faixa de frequências ao longo do tempo

Sensoriamento e Detecção do Uso Primário

A detecção de energia define o **estado de ocupação** do canal:



A etapa de sensoriamento consiste em operações de recepção, filtragem, seleção de faixa/canal, amostragem e conversão A/D para apresentação do sinal ao detector de potência.

$$r(t) = \begin{cases} n(t), & \text{Hipótese } H_1: \text{não há outro sinal} \\ p(t) + n(t), & \text{Hipótese } H_2: \text{há outro sinal.} \end{cases}$$

Em banda larga, $r(t)$ é substituído por $r(t, f)$, onde f é a frequência.

Solução Proposta Inicialmente

- Utilização de RNG no aprendizado da distribuição latente da ocupação espectral em uma determinada faixa do espectro
- Uso de U-NET* para a solução de:
 - (i) Detectar o uso do espectro de radiofrequência
- Uso de Modelos de Difusão para a solução de (ii) e (iii):
 - (ii) Realizar previsões sobre o uso futuro baseado no estado presente e passado
 - (iii) Gerar amostras de ocupação espectral utilizando um modelo treinado a partir de amostras reais de uso do espectro

*U-NET é um modelo empregados na segmentação e classificação semântica de imagem, com adaptação para redes generativas

Utilização dos Modelos – Proposta Inicial

- Dados de treinamento: imagens bidimensionais coloridas de espectrograma, se atendo à aplicação original dos modelos
- Saídas esperadas:
 - Modelo de Difusão: imagens espectrais sintetizadas
 - U-NET: imagens segmentadas com classes definidas para a ocupação espectral

Em uso conjunto, uma estimativa de espectrograma alimenta a geração de segmentação em classes para utilização na tomada de decisão de uso secundário do espectro.

Uso alternativo dos Modelos:

Dados de treinamento são vetores unidimensionais representando amostras complexas no domínio do tempo. Necessárias adaptações relacionadas aos dados de entrada.

Solução Encontrada

- ~~Utilização de RNG no aprendizado da distribuição latente da ocupação espectral em uma determinada faixa do espectro~~

- Uso de U-NET* para a solução de:
 - (i) Detectar o uso do espectro de radiofrequência

Segmentação Semântica Espectral

Adaptação da U-Net em [4]

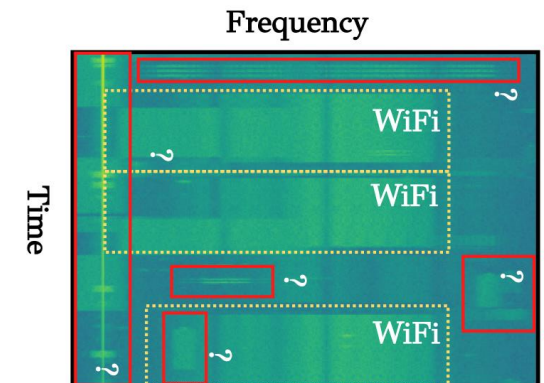
*U-NET é um modelo empregado na segmentação e classificação semântica de imagem, com adaptação para redes generativas

- ~~Uso de Modelos de Difusão para a solução de (ii) e (iii):~~

- ~~(ii) Realizar previsões sobre o uso futuro baseado no estado presente e passado~~
- (iii) Gerar amostras de ocupação espectral utilizando um modelo treinado a partir de amostras reais de uso do espectro

Costurando o espectro

Nova técnica em [4]



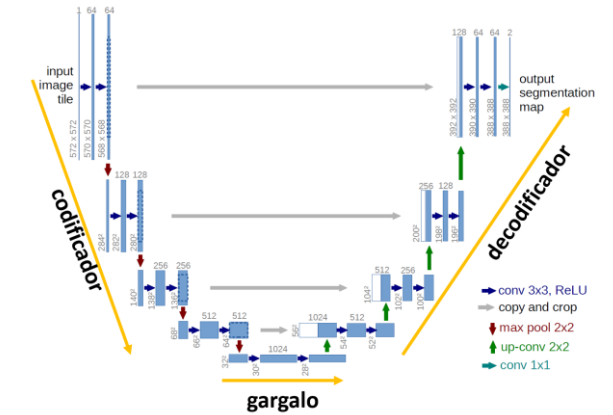
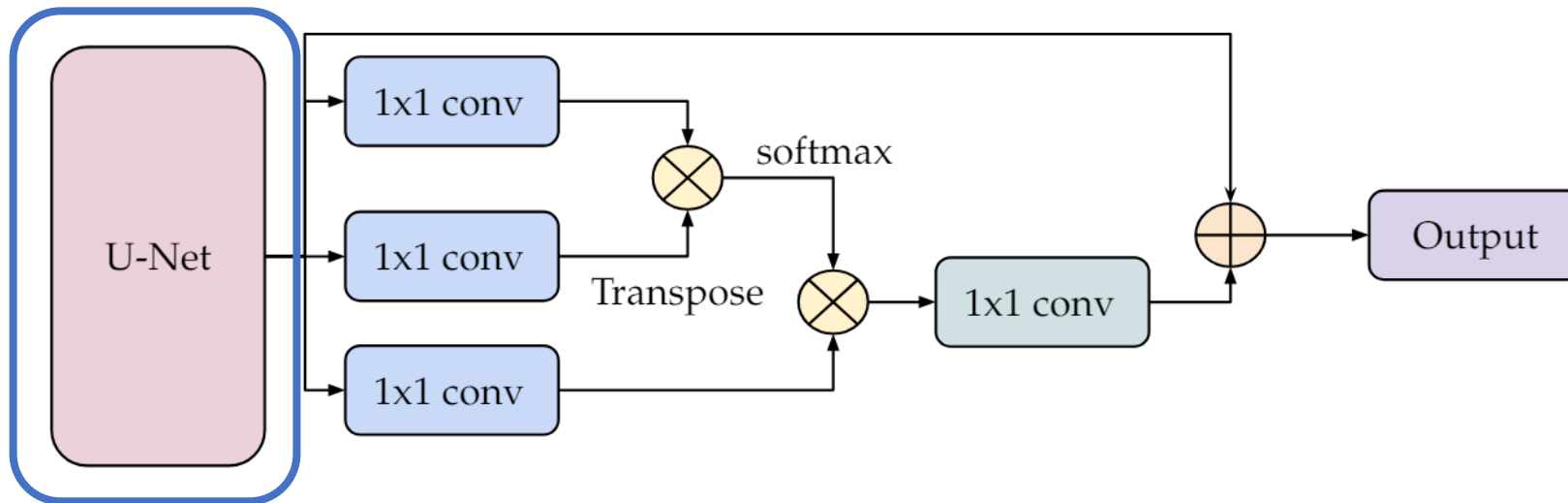
U-Net 1D com bloco não local

Filtros 1x3

Codificador: 5x2 camadas com BN, ReLU e DS

Gargalo e Skip Connections

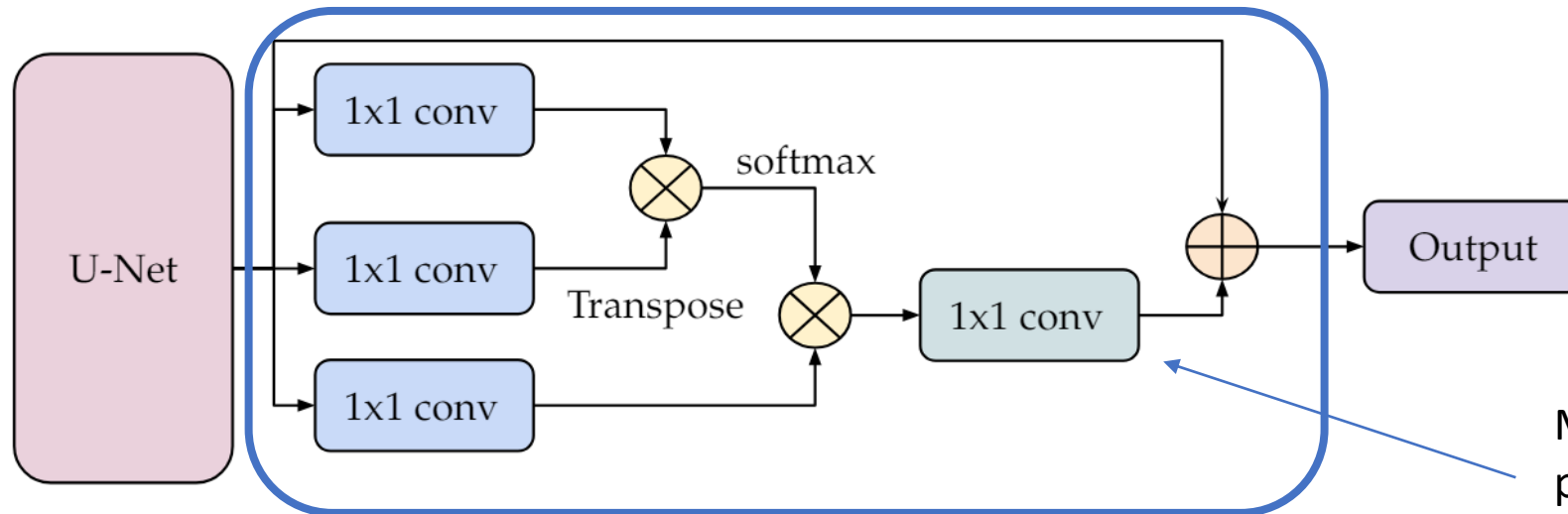
Decodificador: 5x1 camadas com BN, ReLU e US



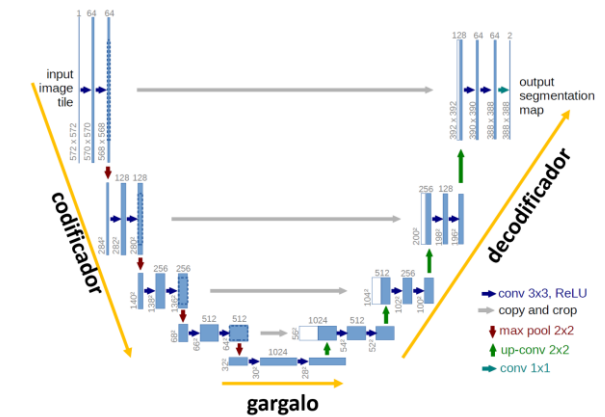
U-Net 1D com bloco não local

Bloco não local: capturar relações de características afastadas espacialmente

$$\text{Attention}(\mathbf{Q}, \mathbf{K}, \mathbf{V}) = \text{softmax}\left(\frac{\mathbf{Q}\mathbf{K}^T}{\sqrt{d}}\right) \mathbf{V}$$



Mapa de segmentação
para cada classe
(sobreposição espectral)



Solução Encontrada

- ~~Utilização de RNG no aprendizado da distribuição latente da ocupação espectral em uma determinada faixa do espectro~~

- Uso de U-NET* para a solução de:
(i) Detectar o uso do espectro de radiofrequência

Segmentação Semântica Espectral

Adaptação da U-Net em [4]

*U-NET é um modelo empregado na segmentação e classificação semântica de imagem, com adaptação para redes generativas

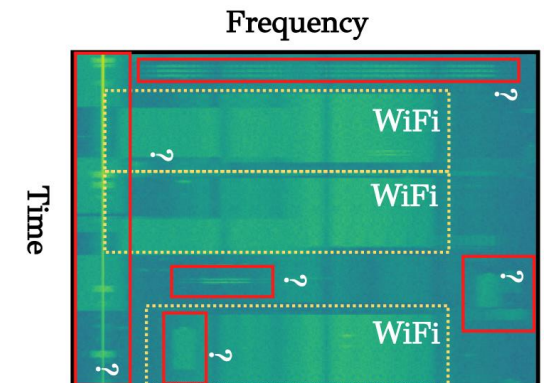
- ~~Uso de Modelos de Difusão para a solução de (ii) e (iii):~~

~~(ii) Realizar previsões sobre o uso futuro baseado no estado presente e passado~~

(iii) Gerar amostras de ocupação espectral utilizando um modelo treinado a partir de amostras reais de uso do espectro

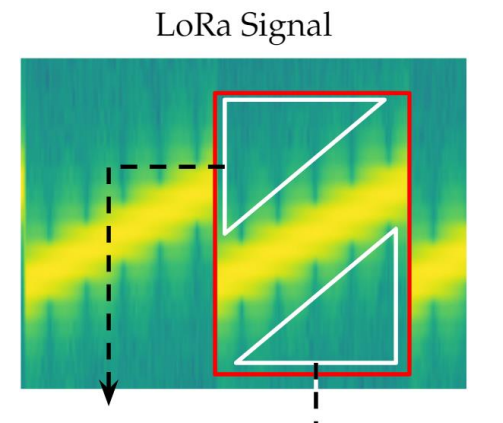
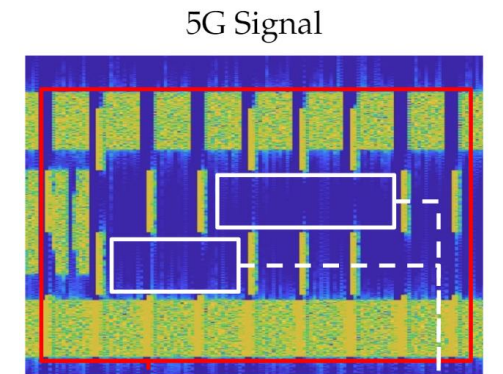
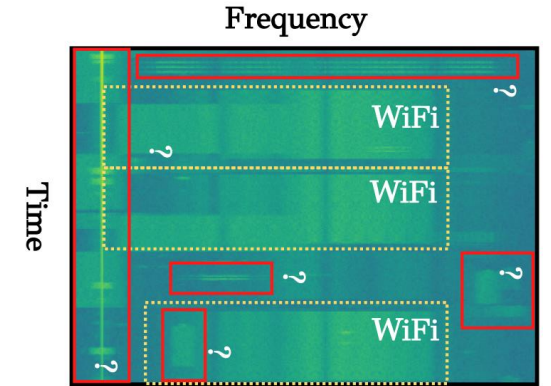
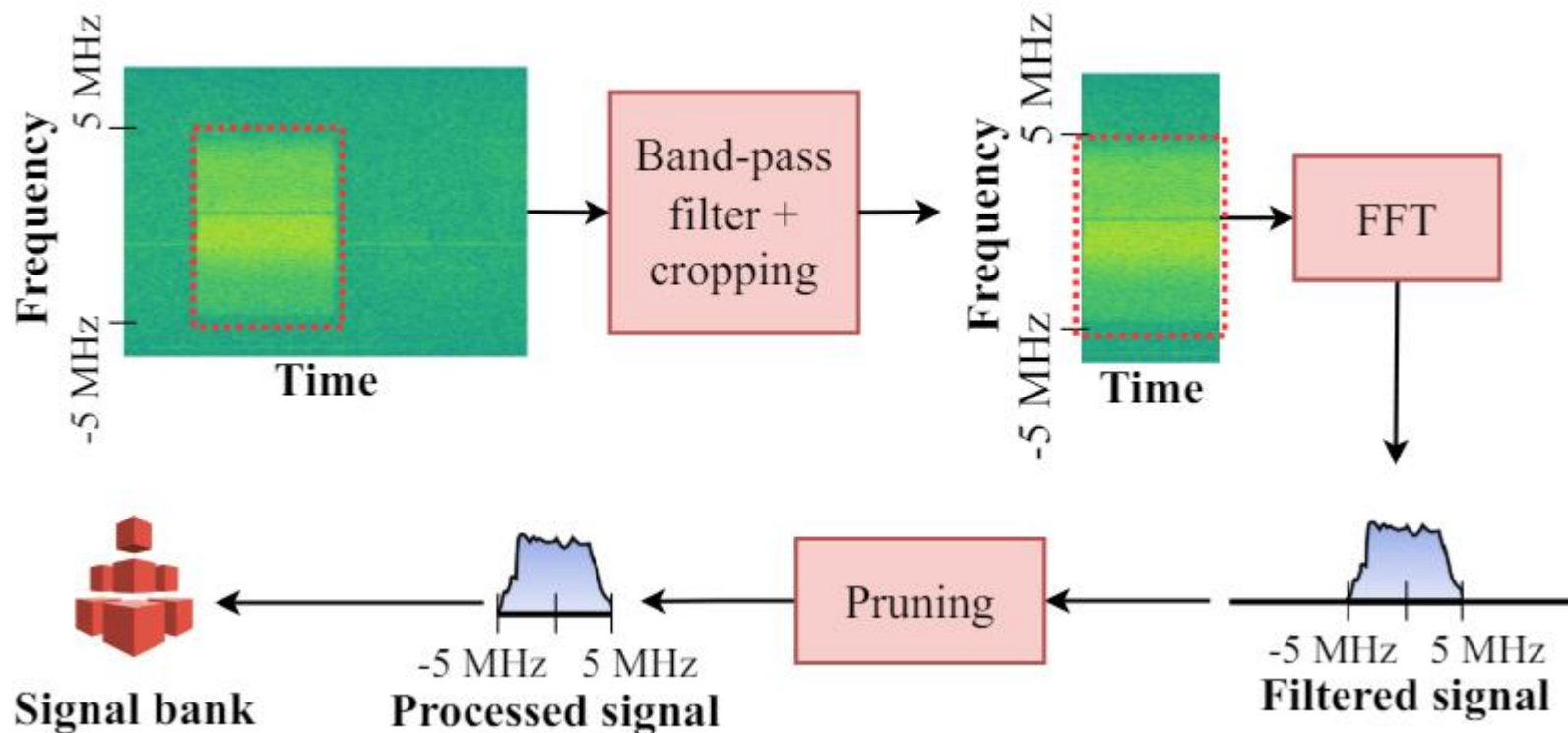
Costurando o espectro

Nova técnica em [4]

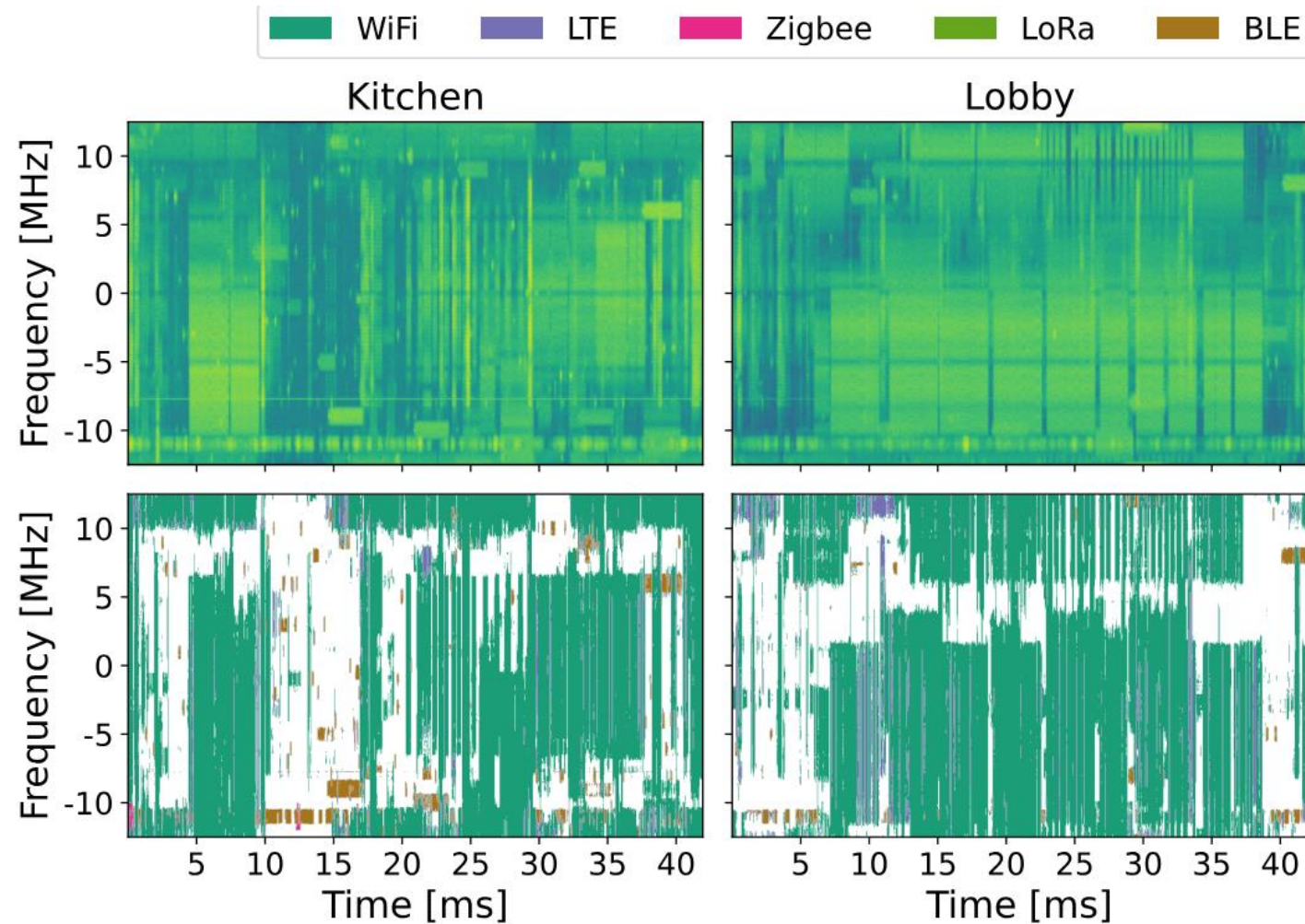


Gerador de dataset como simulador

Captura de amostras isoladas de referência que são pré-processadas para compor um banco de sinais



Resultados Obtidos - Demonstração



Conclusão

- O emprego de redes neurais artificiais foi validado para a detecção da ocupação espectral.
- O modelo U-Net adaptado mostrou-se bastante eficaz e eficiente para a tarefa de classificação semântica espectral, sendo demonstrado inclusive pelo autor original que é possível sua utilização em tempo real através de aceleração computacional usando GPU.
- A técnica avaliada para a geração de amostras de ocupação espectral mostrou que apesar de ser bastante simplificada, é flexível e versátil o suficiente para ser estendida e cumprir a finalidade de simulação com bastante controle sobre o processo.

Trabalhos Futuros

- Aplicação de Modelos de Markov Escondidos (HMM) para modelagem temporal e previsão do uso do espectro utilizando como observações as informações da classificação realizada pela RNA;
- Embarque de informação temporal no modelo U-Net para avaliação de seu desempenho na previsão de uso do espectro;
- Investigação e avaliação do emprego de outras RNA na modelagem temporal e previsão do uso do espectro em substituição aos Modelos Markovianos;
- Investigação e avaliação do desempenho de Redes Neurais Generativas para a geração de amostras de ocupação espectral com a finalidade de simulação;
- Simulação da ocupação oportunística secundária do espectro e comparação do desempenho com outros trabalhos.

Perguntas?

Referências

- [1] Y. Arjoune and N. Kaabouch, “A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions,” *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/126>
- [2] L. R. L. Rodrigues and E. L. Pinto, “Hmm models and estimation algorithms for real-time predictive spectrum sensing and cognitive usage,” XXXV SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS - SBrT 2017, 2017.
- [3] D. Liu, A. Honore, S. Chatterjee, and L. K. Rasmussen, “Powering ‘ hidden markov model by neural network based generative models,” 2020.
- [4] D. Uvaydov, M. Zhang, C. P. Robinson, S. D’Oro, T. Melodia, and F. Restuccia, “Stitching the spectrum: Semantic spectrum segmentation with wideband signal stitching,” 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2402.03465>

Obrigado!