

# Impacto da Interferência de Múltiplos Usuários Primários sobre o Desempenho de Outage de Redes Cooperativas-Cognitivas Full Duplex

Silvio César Vicentim Dourado e Edgar Eduardo Benitez Olivo

**Resumo**— Neste artigo, o efeito da interferência gerada por múltiplos transmissores primários sobre o desempenho de uma rede cooperativa-cognitiva, que usa a técnica de compartilhamento de espectro *underlay* e explora a diversidade cooperativa usando seleção de *relays*, é avaliado em termos da probabilidade de *outage*. A rede secundária consiste de uma fonte, um cluster de *relays* decodifica-e-encaminha do tipo *full duplex* e um destino, os quais operam sob a restrição da potência tolerada no receptor primário e a interferência causada por múltiplos transmissores primários. Quatro critérios de seleção de *relay* são considerados: um critério ótimo, que explora o estado de todos os enlaces da rede, e três critérios subótimos, os quais são baseados, respectivamente, nos enlaces entre fonte e *relay*, entre *relay* e destino e nos enlaces de auto interferência dos *relays full duplex*. Simulações exaustivas de Monte Carlo são usadas para avaliar o desempenho do sistema.

**Palavras-Chave**— Decodifica-e-encaminha, *full duplex*, interferência, rádio cognitivo.

**Abstract**— In this paper, the impact of the interference coming from multiple primary transmitters on the performance of a cognitive relaying network, which uses an *underlay* spectrum-sharing technique and exploits the cooperative diversity using relay selection, is evaluated in terms of the outage probability. The secondary network consists of a source, a cluster of full-duplex decode-and-forward relays, and a destination, all operating under the tolerated-power constraint at the primary receiver and the interference caused by multiple primary transmitters. Four relay selection criteria are considered: one optimal criterion, which exploits the channel state information of all links of the network, and three suboptimal criteria, which are based, respectively, on the links between source and relay, between relay and destination, and on the autointerference links at the full duplex relays. Exhaustive Monte Carlo simulations are used to evaluate the network performance.

**Keywords**— Cognitive radio, decode-and-forward, full duplex, interference.

## I. INTRODUÇÃO

As redes cooperativas-cognitivas são consideradas uma solução promissora para mitigar o problema da escassez de espectro, visto que este é um dos principais desafios para o advento da quinta geração de comunicações móveis [1]. Por meio do uso combinado das técnicas de rádio cognitivo e comunicações cooperativas, é possível aumentar a eficiência espectral, extensão de cobertura e confiabilidade da rede, simultaneamente. No contexto de redes cognitivas com compartilhamento do tipo *underlay*, poucos trabalhos relacionados têm considerado o efeito da interferência proveniente da rede primária sobre o desempenho da rede secundária, além da

Silvio César Vicentim Dourado e Edgar Eduardo Benitez Olivo, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de São João da Boa Vista-SP, Brasil. E-mails: silvioevdourado@gmail.com, edgar.olivo@unesp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Reitoria/UNESP e pelo CNPq (421850/2018-3).

restrição de temperatura de interferência imposta pelo receptor primário, que é inerente à técnica *underlay* [2], [3]. Por exemplo, em [2], considerou-se o impacto das transmissões de um usuário primário sobre uma rede cooperativa-cognitiva com um único *relay* do tipo amplifica-e-encaminha, que opera no modo *half duplex*. Nesse trabalho, o desempenho de uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral *underlay*, composta por uma fonte, um destino e múltiplos *relays* que operam em modo *full duplex* (FD), sob o protocolo decodifica-e-encaminha, é avaliado em termos da probabilidade de *outage*. Para tanto, considera-se o impacto dos seguintes parâmetros-chave do sistema: potência interferente gerada por múltiplos transmissores primários, limiar de potência de interferência tolerada pelo receptor primário (a chamada de temperatura de interferência), potência máxima disponível nos nós secundários e auto interferência nos *relays* FD.

## II. MODELO DO SISTEMA

A Fig. 1 ilustra o modelo do sistema, em que a rede secundária é composta por uma fonte S, um *cluster* de *relays*  $R_n$ , para  $n = 1, \dots, N$ , e um destino D. A rede primária é composta por múltiplos transmissores  $Tx_m$ , para  $m = 1, \dots, M$ , e por um receptor P.

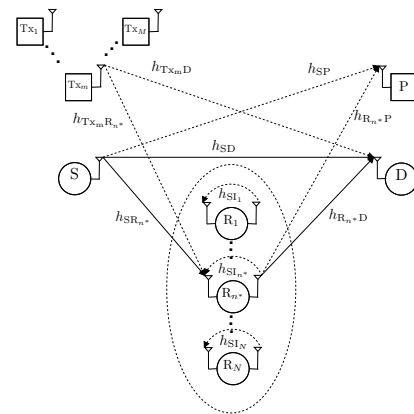


Fig. 1. Modelo do sistema (sinal de interesse: linha sólida; sinal de interferência: linha tracejada).

Todos os nós da rede possuem uma única antena, com exceção dos *relays*, que possuem duas para possibilitar a retransmissão em modo FD. Ainda na Fig. 1,  $h_A$  representa o coeficiente de canal, que segue distribuição de Rayleigh, tal que o ganho de canal  $g_A = |h_A|^2$  segue uma distribuição exponencial com ganho médio  $\Omega_A = E\{|h_A|^2\}$ , em que  $A \in \{SR_n, R_nD, SD, SI_n, SP, R_nP, Tx_mD, Tx_mR_n\}$ . Considerando a rede secundária, a relação sinal-ruído

(SNR) instantânea recebida no  $n$ -ésimo primeiro salto,  $n$ -ésimo segundo salto, enlace direto e  $n$ -ésimo enlace de auto interferência podem ser expressas como  $\gamma_{SR_n} = g_{SR_n} P_S / N_0$ ,  $\gamma_{R_n D} = g_{R_n D} P_{R_n} / N_0$ ,  $\gamma_{SD} = g_{SD} P_S / N_0$  e  $\gamma_{SI_n} = g_{SI_n} P_{R_n} / N_0$ , em que  $P_S$  e  $P_{R_n}$  são as potências transmitidas de S e R, dadas respectivamente por

$$P_S = \alpha \min \left\{ P_t, \frac{I}{g_{SP}} \right\}, \quad P_{R_n} = (1 - \alpha) \min \left\{ P_t, \frac{I}{g_{R_n P}} \right\}, \quad (1)$$

sendo  $P_t$  a potência máxima disponível nos nós secundários,  $I$  a temperatura de interferência, e  $\alpha$  o fator de alocação de potência entre S e  $R_n$ . Além disso,  $N_0$  é a potência do ruído AWGN.

Da rede primária,  $\gamma_{Tx_m D} = g_{Tx_m D} P_{Tx_m} / N_0$  e  $\gamma_{Tx_m R_n} = g_{Tx_m R_n} P_{Tx_m} / N_0$  representam as SNRs recebidas instantâneas no destino a partir do  $m$ -ésimo transmissor primário e no  $n$ -ésimo relay a partir do  $m$ -ésimo transmissor primário, respectivamente, em que  $P_{Tx_m}$  é a potência transmitida de cada transmissor primário. Para esse modelo,  $\gamma_P \triangleq P_t / N_0$  e  $\gamma_I \triangleq I / N_0$  são definidas como a SNR máxima transmitida dos nós secundários e a relação interferência-ruído tolerada pela rede primária, respectivamente.

### III. CRITÉRIO DE SELEÇÃO DE RELAY E PROBABILIDADE DE OUTAGE

O desempenho da rede será avaliado em termos da probabilidade de *outage*, definida como a probabilidade da SNR fim-a-fim do sistema,  $\gamma$ , cair abaixo de um certo limiar  $\tau$ . O sinal recebido em D é resultado da combinação dos sinais transmitidos por S e pelo relay escolhido, por meio da técnica *joint decoding*, tal que a SNR fim-a-fim recebida instantânea pode ser expressa como

$$\gamma = \min \left\{ \frac{\gamma_{SR_{n^*}}}{1 + \gamma_{SI_{n^*}} + \sum_{m=1}^M \gamma_{Tx_m R_{n^*}}}, \frac{\gamma_{R_{n^*} D} + \gamma_{SD}}{1 + \sum_{m=1}^M \gamma_{Tx_m D}} \right\} \quad (2)$$

em que  $n^*$  se refere ao relay selecionado de acordo com algum dos critérios citados a seguir: (i) critério oportunista (ORS, *opportunistic relay selection*), que seleciona o relay que maximiza a SNR fim-a-fim,  $\gamma$ , sendo assim necessário o conhecimento do estado de todos os enlaces da rede; (ii) critério parcial do primeiro salto (PRS-1H, *partial relay selection-first hop*), que seleciona o relay que maximiza a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR) do primeiro salto (lado esquerdo do operador mínimo em (2)); (iii) critério parcial do segundo salto (PRS-2H), que escolhe o relay que maximiza a SINR do segundo salto (lado direito do operador de mínimo em (2)); e (iv) critério parcial do enlace de auto interferência (PRS-SI), que seleciona o relay que minimiza a SNR de auto interferência,  $\gamma_{SI_n}$ .

### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção, resultados numéricos baseados em simulações exaustivas de Monte Carlo são apresentados, considerando uma topologia de rede bidimensional em que o ganho médio de canal é determinado pela perda de percurso, ou seja,  $\Omega_A = d_A^{-\eta}$ , sendo  $\eta = 4$  o expoente de perda de percurso.

Assim, as posições de S,  $R_n$ , D,  $Tx_m$  e P são dadas por (0; 0), (0,5; 0), (1; 0), (0; 1) e (0,25; 1), respectivamente. Além disso, considera-se que  $\tau = 0$  dB,  $\Omega_{SI_n} = -10$  dB,  $\gamma_I = 20$  dB e  $\alpha = 0,5$ . A Fig. 2 apresenta o impacto da interferência gerada pelos usuários primários no desempenho da rede secundária, mantendo o número de relays em  $N=2$  e variando o número de transmissores primários para  $M=1$  e 3. Para todos os critérios, observa-se uma degradação no desempenho de *outage* ao aumentar  $M$ , como esperado, já que a SINR de cada salto em (2) e, conseqüentemente, a SINR recebida fim-a-fim diminuem conforme a potência interferente causada pela rede primária aumenta.

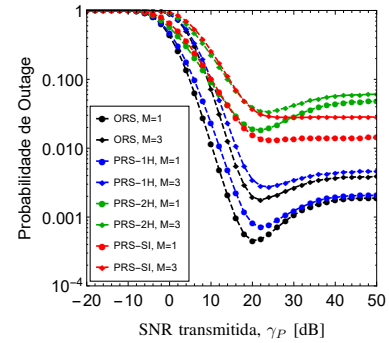


Fig. 2. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida para a rede secundária, considerando  $P_{Tx_m} = 10$  dBm,  $N = 2$  e  $M = 1$  e 3.

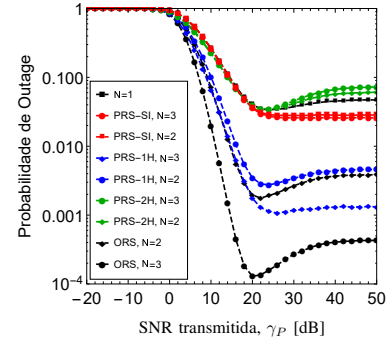


Fig. 3. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida para a rede secundária, considerando  $P_{Tx_m} = 10$  dBm,  $N = 1, 2, 3$  e  $M = 3$ .

Por outro lado, na Fig. 3, note que o efeito deletério da interferência da rede primária no desempenho da rede secundária pode ser compensado pelo ganho de diversidade cooperativa, ao aumentar o número de relays. Observa-se um ganho de desempenho significativo para os critérios ORS e PRS-1H. Contudo, para todos os casos, na região de alta SNR, observa-se patamares de desempenho, causados tanto pela auto interferência inerente ao modo de retransmissão FD dos relays, quanto pela temperatura de interferência do receptor primário.

### REFERÊNCIAS

- [1] M. Amjad, F. Akhtar, M. H. Rehmani, M. Reisslein, and T. Umer, "Full-duplex communication in cognitive radio networks: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2158-2191, Fourthquarter 2017.
- [2] D. P. M. Osorio, E. E. B. Olivo, M. K. Tojeiro, and L. V. Peres, "Impact of primary-user interference on multiuser cognitive relaying networks," *J. Communication and Information Systems*, vol. 33, no. 1, 2018.
- [3] J. A. Hussein, S. Boussakta, and S. S. Ikki, "Performance study of a UCRN over Nakagami- $m$  fading channels in the presence of CCI," *IEEE Trans. Cognitive Commun. Netw.*, vol. 3, no. 4, pp. 752-765, Dec. 2017.