

Um Mecanismo Cooperativo Com Relays Cognitivos Híbridos Para Compartilhamento Espectral em Redes Heterogêneas

George Alex F. Gomes, Ronaldo M. Salles, José F. de Rezende e David F. C. Moura

Resumo— As tecnologias Rádio Cognitivo e *In-band Full-Duplex* têm se mostrado promissoras para o desenvolvimento de sistemas heterogêneos de comunicações. Neste trabalho, exploramos a cooperação entre usuários primários e secundários (PU-SU) através de relays cognitivos híbridos (HD/FD), como uma nova abordagem para compartilhamento espectral, caracterizando a interferência agregada do sistema e solucionando o Problema da Divisão do Tempo de Locação. Nossos resultados revelam que, com níveis baixos de interferência agregada, o modo FD é capaz de superar o modo HD para promover a cooperação PU-SU no *uplink* primário, atendendo requisitos para que os recursos do sistema sejam compartilhados de forma justa.

Palavras-Chave— Rádio cognitivo, full-duplex, comunicação cooperativa, relay, interferência agregada.

Abstract— Cognitive Radio and In-band Full-Duplex technologies have proven to be promising for the development of heterogeneous communications systems. In this work, we explored cooperation between primary and secondary users (PU-SU) through hybrid cognitive relays (HD/FD), as a new approach to spectral sharing, characterizing system aggregated interference and solving the Leasing Time Problem. Our results show that, under low aggregated interference, FD mode is able to overcome HD mode to promote PU-SU cooperation in the primary uplink, meeting system requirements for fairly resource sharing.

Keywords— Cognitive radio, full-duplex, cooperative communication, relay, aggregated interference.

I. INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios para a evolução dos atuais sistemas de comunicações sem fio em direção aos da próxima geração está na suposta escassez de espectro e engloba a identificação de soluções práticas e flexíveis para utilização desse estimado recurso precioso. A associação de tecnologias PHY/MAC e de compartilhamento de espectro tem sido uma alternativa com resultados efetivos para aprimorar a Eficiência Espectral (*Spectrum Efficiency* – SE) dos sistemas, proporcionando conexões simultâneas e altas taxas de dados, sem a necessidade de adicionar novas faixas de frequências. Para tanto, é necessário que sejam introduzidos novos mecanismos capazes de estimular o compartilhamento e simplificar a implantação, a operação e o gerenciamento de arquiteturas multicamadas em grande escala, tratar o aumento de interferência agregada e otimizar dinamicamente a alocação de recursos entre usuários com prioridades de acesso distintas.

Diferentes tecnologias têm sido projetadas e analisadas com essa finalidade. Entre as mais promissoras encontram-se a dos Rádios Cognitivos [1] e da Comunicação *In-band Full-Duplex* (FD) [2]. Em particular, a comunicação FD se tornou recentemente uma proposta factível para o desenvolvimento dos sistemas de comunicações. Essa tecnologia possibilita a

transmissão e a recepção simultânea em uma mesma frequência, o que, teoricamente, produz condições para duplicar a SE em relação à comunicação Half-Duplex (HD), tradicionalmente empregada. Quando integradas, as tecnologias Rádio Cognitivo e *In-band FD* geram soluções inovadoras para esquemas cooperativos de sensoriamento e de retransmissões (*relaying*), capazes de aprimorar o compartilhamento dos recursos espectrais e o desempenho de sistemas de comunicações heterogêneos. Todavia, como as redes possuem interesses e limitações distintas, é necessário que requisitos mínimos sejam atendidos previamente para haver cooperação e, com isso, os recursos restantes sejam distribuídos de forma equilibrada e oportuna, para não inviabilizar o processo de compartilhamento. Saber como balancear adequadamente os ganhos entre os dois lados envolvidos na cooperação é, portanto, uma questão crucial para alcançar compartilhamento espectral eficiente.

Neste trabalho, estudamos o emprego de relays cognitivos, capazes de operar nos modos HD e FD, como um novo mecanismo de cooperação entre redes primárias e secundárias (PU-SU) para compartilhamento de espectro eletromagnético em sistemas heterogêneo de comunicações. Especificamente, analisamos o potencial de cada modo de operação, com os protocolos Amplifica-e-Encaminha (*Amplify-and-Forward* – AF) e Decodifica-e-Encaminha (*Decode-and-Forward* – DF), sem superposição de sinais, para promover cooperação PU-SU durante o *uplink* de usuários primários em um cenário de baixa interferência agregada. Identificamos que o modo FD é capaz de proporcionar resultados mais favoráveis, em relação ao modo HD, para ocorrência da cooperação PU-SU.

A. Trabalhos Relacionados

Trabalhos anteriores estudaram a cooperação entre usuários de uma Rede Secundária (SU-SU) para compartilhar recursos espectrais licenciados de uma rede primária sob o ponto de vista tanto da comunicação HD quanto FD [3], [4]. De modo geral, esses estudos tiveram como base o paradigma *underlay* de rádio cognitivo e concentraram-se em mecanismos de alocação de potência na camada PHY. Visaram o desempenho máximo da rede secundária em conformidade com garantias mínimas da rede primária, por intermédio de restrições na potência de transmissão dos SU e no nível de interferência tolerado pelos PU, para coexistirem em uma mesma região geográfica. Apesar de terem sido apresentados resultados promissores, a implantação da cooperação SU-SU em sistemas heterogêneos de comunicações ainda carece de soluções práticas, como, por exemplo, mecanismos para medir e gerenciar a Temperatura de Interferência. Outro aspecto complicador para a cooperação SU-SU está na falta de participação ativa dos PU, que os restringe de se beneficiarem com o compartilhamento de seus recursos e, por isso, não são incentivados a facilitar os acessos secundários. Com esse desequilíbrio de ganho totalmente a favor das redes secundárias, o desempenho proporcionado pela cooperação SU-

George Alex F. Gomes, Ronaldo M. Salles, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro-RJ, Brasil, e-mails: {george.gomes, salles}@ime.br; José F. de Rezende, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro-RJ, e-mail: rezende@land.ufrj.br; David F. C. Moura, Centro Tecnológico do Exército (CTEx), Rio de Janeiro-RJ, e-mail: david.moura@eb.mil.br.

SU fica limitado [4] e o uso dos recursos globais do sistema heterogêneo não é completamente otimizado.

A cooperação entre redes primárias e secundárias (PU-SU), ou cooperação vertical, se enquadra no paradigma *overlay-interweave* de rádio cognitivo e promove a integração e o compartilhamento de recursos de sistemas heterogêneos [5]. Os ganhos obtidos no compartilhamento podem ser distribuídos entre PU e SU, o que estimula a cooperação entre eles. No entanto, para que a cooperação PU-SU ocorra é necessário que haja distribuição apropriada dos ganhos alcançados entre as partes envolvidas, uma vez que possuem necessidades distintas para utilização dos recursos. Grande parte da pesquisa envolvendo a cooperação PU-SU teve uma perspectiva teórica nas camadas física e de enlace, sem levar em conta questões das camadas superiores, tendo a cooperação como uma premissa verdadeira. Exceções ocorreram em alguns poucos trabalhos, como em [6] e [7], para situações específicas com ausência ou limitação de interferência agregada e comunicação direta entre transmissor e receptor. Portanto, os resultados existentes não têm a garantia de que todas as condições necessárias para haver cooperação PU-SU foram realmente satisfeitas.

A cooperação para compartilhamento espectral pode ocorrer com ou sem superposição de sinais, sendo que esta última possibilita soluções mais escaláveis e com melhor desempenho, pois ao fracionar o tempo de acesso aos recursos espectrais, reduz a probabilidade de erros na recepção e também contribui para reduzir o tráfego de sinalização e a interferência agregada do sistema por inteiro. Ainda assim, a cooperação PU-SU sem superposição de sinais foi estudada intensamente apenas para relays cognitivos HD. Com isso, um aspecto crucial para ocorrência da cooperação PU-SU, conhecido como problema da divisão do tempo de locação (*Leasing Time Problem*), deixou de ser analisado sob o paradigma da comunicação FD [7].

Em geral, os estudos sobre relays FD se concentraram na influência da autointerferência residual (*Residual Self Interference* – RSI) sobre o desempenho dos sistemas de comunicação. Apesar do aumento de interferência agregada prejudicar significativamente o desempenho da comunicação FD em redes heterogêneas, nota-se que vários trabalhos ignoraram ou assumiram modelos simplificados para esse efeito, considerando geralmente cenários básicos, com apenas uma rede primária e outra Secundária e reduzido número de usuários [3]. Com isso, deixaram de capturar e explorar características relevantes da interferência agregada para operação dos sistemas da próxima geração. Um importante resultado a ser considerado revela que se o nível de RSI for superior ao do ruído, haverá um limite para a interferência agregada, a partir do qual a comunicação FD sempre será superior à comunicação HD [8].

II. MODELAGEM DO SISTEMA

A. Arquitetura

Consideramos um sistema de comunicações heterogêneo, de duas camadas, em larga escala. A primeira camada é composta por uma rede celular primária (PU), cujos nós são Estações Base Primárias (*Primary Base Stations* – PBS) e Equipamentos de Usuários Primários (*Primary User Equipments* – PUE), que operam exclusivamente no modo HD, com reuso universal de frequências ortogonais para *uplink* (f_{UL}) e *downlink* (f_{DL}). Emprega-se um esquema de associação no qual os PUE se conectam apenas à PBS mais próxima. Com isso, a área de

cobertura das PBS pode ser geometricamente representada por células de um Diagrama de Voronoi. Os recursos espectrais são acessados sincronamente, de forma que as PBS em operação tenham apenas um PUE associado para cada f_{UL} e f_{DL} , o que previne interferências primárias intracelulares. Regiões de exclusão também são aplicadas em torno das PBS para garantir que seus serviços não sejam interrompidos por interferências geradas em células primárias adjacentes. Na segunda camada, existem pequenas redes secundárias (SU), que tentam acessar oportunisticamente, por meio de sensoriamento ou comunicação cooperativa, recursos espectrais primários subutilizados, como forma de aprimorar os serviços prestados a seus usuários. Cada uma dessas redes é composta por uma única Estação Base Secundária (*Secondary Base Station* – SBS), capaz de operar como um relay cognitivo híbrido, e por vários Equipamentos de Usuários Secundários (*Secondary User Equipment* – SUE), que funcionam apenas no modo HD. Mesmo operando com baixa potência, as redes secundárias geram interferência agregada, por não possuírem mecanismos de coordenação. Assume-se ainda que a transmissão direta entre SUE não é possível, ou por causa de características do canal ou por limitação na potência de transmissão. Portanto, um SUE se comunicará com outro SUE apenas por intermédio de uma SBS. As distribuições espaciais dos nós das redes primária e secundárias são caracterizadas por Processos Pontuais de Poisson Homogêneos (HPPP) estacionários e independentes Φ , com densidades λ . Assim, $\Phi_{PU} = \Phi_{PBS} \cup \Phi_{PUE}$ e $\Phi_{SU} = \Phi_{SBS} \cup \Phi_{SUE}$, com $\lambda_{PBS} \ll \lambda_{PUE}$ e $\lambda_{SBS} \ll \lambda_{SUE}$, à luz do que ocorre na prática [9].

B. Camada Física

O estado dos canais (*Channel State Information* – CSI) é estimado com base na reciprocidade e no uso de sinais pilotos no início de cada bloco de transmissão. Por se tratar de um cenário de baixa interferência agregada e visando simplicidade de implementação, não consideramos mecanismos para controle de potência e definimos que todos os nós – Equipamentos de Usuários e Estações Base – transmitem com potências constantes. As SBS podem operar tanto com o protocolo AF quanto o DF. O ruído na recepção é considerado gaussiano branco aditivo (AWGN), com valor médio igual a N_0 . Os canais experimentam desvanecimento segundo o modelo de Rayleigh, em blocos (*block fading*). Com isso, os coeficientes de ganho de canal $|h|^2$ são variáveis aleatórias exponenciais independentes e identicamente distribuídas que, por definição, possuem média unitária ($E[|h|^2] = 1$). A perda de percurso (*path loss*) é caracterizada por $l(r) = r^{-d}$, onde $d \geq 2$. As SBS possuem antenas distintas e isoladas, que permitem a transmissão e a recepção simultâneas de sinais. Os níveis de RSI são calculados pelo produto $RSI = P_{SBS} \cdot \gamma_{RSI}$, onde P_{SBS} é a potência de transmissão da SBS e $\gamma_{RSI} = |h_{RSI}|^2$, uma constante que representa o ganho de canal entre as antenas da SBS. Todas as transmissões ocorrem com sinalização gaussiana, o que permite tratar o sinal em banda base da interferência agregada como ruído [9].

C. Capacidade Média de Transmissão

Definimos a capacidade de transmissão C_{ij} , medida em bit/s/Hz (ou bps/Hz), como sendo a eficiência espectral da comunicação direta entre um transmissor i , que opera com potência P_i , e um receptor j a uma distância r_{ij} . Aplicando a versão generalizada da Inequação de Jensen [10], encontramos um limite superior para o valor médio de C_{ij} , dado por:

$$\overline{C}_{ij} \leq m_{oper} \cdot \log \left(1 + \frac{P_i r_{ij}^{-d}}{\overline{RSI}_j + \overline{I}_{ag_{ij}} + N_0} \right) \quad (1)$$

onde m_{oper} é uma constante que define o modo de operação (i.e., 1 para o modo FD, ou 1/2, para o modo HD), \overline{RSI}_j é diferente de zero apenas se o receptor j for uma SBS operando como relay FD e $\overline{I}_{ag_{ij}}$ é a interferência agregada média gerada pelas redes primária e secundárias.

Mantendo essa abordagem e considerando os princípios apresentados em [11], também obtemos limites superiores para a capacidade fim-a-fim média da comunicação entre um transmissor i e um receptor j , com a cooperação de uma SBS, tanto para o protocolo AF, quanto o DF:

$$\overline{C}_{SBS_{AF}_i} \leq m_{oper} \cdot \log \left(1 + \frac{\overline{SINR}_{i,SBS} \cdot \overline{SINR}_{SBS_j}}{\overline{SINR}_{i,SBS} + \overline{SINR}_{SBS_j} + 1} \right) \quad (2)$$

$$\overline{C}_{SBS_{DF}_i} \leq m_{oper} \cdot \log [1 + \min(\overline{SINR}_{i,SBS}, \overline{SINR}_{SBS_j})] \quad (3)$$

Esses limites são suficientes para incorporar os efeitos da interferência agregada ao nosso estudo, sem ter que recorrer a cálculos de alta complexidade.

D. Interferência Agregada

A interferência agregada média $\overline{I}_{ag_{ij}}$, produzida por PU e SU, em um receptor j durante a comunicação com um transmissor i , pode ser escrita como $\overline{I}_{ag_{ij}} = \overline{I}_{ag_{PU_{ij}}} + \overline{I}_{ag_{SU_{ij}}}$. A parcela $\overline{I}_{ag_{PU_{ij}}}$ está associada a limitações dos mecanismos primários para controle de interferência. É proveniente de um conjunto homogêneo de interferidores $\Phi_{I_{ag_{PU_{ij}}}}$, que possui um único tipo de PU, isto é, PBS para o *downlink* e PUE, para *uplink*. Por sua vez, a parcela $\overline{I}_{ag_{SU_{ij}}}$ advém de um conjunto heterogêneo de interferidores secundários $\Phi_{I_{ag_{SU_{ij}}}}$, composto ao mesmo tempo por SBS e SUE que realizam transmissões distribuídas e descoordenadas indevidas, resultantes de falhas no sensoriamento para acesso espectral oportunístico.

Considerando que a rede primária emprega o esquema de reuso universal de frequências e zonas de guarda Z_g ao redor de suas PBS, em forma de coroa circular com raios $r_p < r_{g_p}$, aplicamos um modelo similar ao proposto em [12] e definimos o conjunto de interferidores primários para um receptor j a uma distância $0 \leq r \leq r_p$ de uma PBS como sendo $\Phi_{I_{ag_{PU_{ij}}}} = \Phi_{I_{ag_{PU_{ij}}}}(r) = \Phi_{PU \setminus B_j}(r_p + r_{g_p} - r)$. Ou seja, são todos os transmissores primários externos à região circular centrada em j , com raio $r_p + r_{g_p} - r$ e que utilizam concorrentemente os recursos espectrais do receptor j . A partir do Teorema de Campbell [9], verificamos que:

$$\overline{I}_{ag_{PU_{ij}}} = \overline{I}_{ag_{PU_{ij}}}(r) = \frac{2\pi \cdot (\lambda P)_{\Phi_{I_{ag_{PU_{ij}}}}(r)} \cdot (r_p + r_{g_p} - r)^{2-d}}{d-2} \quad (4)$$

Para o cálculo de $\overline{I}_{ag_{SU_{ij}}}$, consideramos que se trata de uma interferência entre camadas (*cross-tier interference*) de grande intensidade, uma vez que os elementos de $\Phi_{I_{ag_{SU_{ij}}}}$, apesar de operarem com baixa potência, possuem λ mais elevados e distribuem-se geograficamente por toda região de operação da PBS, sem levar em conta as zonas de guarda Z_g . De acordo com

[12], caracterizamos essa situação aplicando regiões de exclusão com raio $r_{g_s} \ll r_{g_p}$, suficiente para evitar que os interferidores coincidam com o receptor j , o que leva a $\Phi_{I_{ag_{SU_{ij}}}}(r) = \Phi_{I_{ag_{SU}}} \setminus B_j(r_{g_s})$. Assim, aplicando o Teorema de Campbell, verificamos que a componente secundária de $\overline{I}_{ag_{ij}}$ torna-se independente da localização do receptor j , com:

$$\overline{I}_{ag_{SU_{ij}}} = \frac{2\pi \cdot (\lambda P)_{\Phi_{I_{ag_{SU_{ij}}}} \cdot r_{g_s}^{2-d}}{d-2} \quad (5)$$

Em ambas as expressões (4) e (5), $(\lambda P)_{\mathcal{K}} = \sum_{\mathcal{K}} \lambda_k \cdot P_k$, sendo que λ_k é a densidade do HPPP que descreve a distribuição espacial dos interferidores do conjunto \mathcal{K} e P_k é a respectiva potência de transmissão.

III. PROBLEMA DA DIVISÃO DO TEMPO DE LOCAÇÃO

Sem perda de generalidade, consideramos o contexto em que uma PBS deseja compartilhar temporariamente seus recursos espectrais com uma SBS, em troca de cooperação para a comunicação de um de seus PUE. Essa cooperação é realizada em duas fases, ao longo de um período de tempo T padrão, correspondente à transmissão de um bloco básico de dados (*Resource Block*), como, por exemplo, um *subframe* LTE. A primeira fase ocorre no intervalo de tempo $t_{PBS} = \alpha \cdot T$. Durante esse período, a SBS retransmite os dados do PUE, utilizando recursos espectrais primários dedicados para isso. Em contrapartida, no intervalo de tempo restante $t_{SBS} = (1 - \alpha) \cdot T$, ocorre a segunda fase, quando a PBS concede à SBS permissão para continuar acessando, com exclusividade, os recursos utilizados na primeira fase. Com esse benefício, a SBS pode então aprimorar os serviços prestados aos SUE.

Para encontrar o valor ótimo de α , capaz de conciliar justamente as perspectivas contraditórias da PBS e da SBS, em relação aos valores de t_{PBS} e t_{SBS} , e tornar a cooperação PU-SU realizável, utilizamos um Jogo de Barganha (*Nash Bargain Game*) [13] entre dois participantes que negociam um acordo sobre um conjunto G de compensações viáveis (*payoffs*). Sejam S_n e $f_n(S_n)$, respectivamente, o conjunto de estratégias e a função utilidade de um participante $n \in \mathcal{N} = \{PBS, SBS\}$. O Jogo de Barganha é descrito como (G, g_0) , onde $G \equiv \{g = (g_{SBS}, g_{PBS}) : g_n = f_n(S); S \in S_{PBS} \times S_{SBS}\}$ e $g_0 = (g_{0_{PBS}}, g_{0_{SBS}})$ é o vetor de desacordo, cujos componentes $g_{0_{PBS}}$ e $g_{0_{SBS}}$ são as compensações individuais dos dois participantes, caso não haja acordo entre eles. Ou seja, g_0 representa os valores mínimos necessários para que ocorra a cooperação PU-SU. Uma vez que $T = t_{PBS} + t_{SBS}$, definimos $S_n \equiv \{t_n \mid t_{0_n} \leq t_n \leq T\}$ e $g_n = f_n(t_n) = t_n$, resultando em $g_0 = (t_{0_{PBS}}, t_{0_{SBS}})$. Desta forma G é um conjunto compacto e convexo e o jogo terá solução única $g^* = (t_{PBS}^*, t_{SBS}^*) \geq g_0$, dada pela solução do seguinte problema de otimização:

$$\max_{g_{SBS}, g_{PBS}} (t_{PBS} - t_{0_{PBS}}) \cdot (t_{SBS} - t_{0_{SBS}})$$

$$\text{sujeito a:} \quad (t_{PBS}, t_{SBS}) \geq (t_{0_{PBS}}, t_{0_{SBS}}) \quad (6)$$

A formulação logarítmica desse problema proporciona soluções mais justas (*fairness*) para ambos participantes. Procedendo assim, aplicamos as condições de otimalidade de

Karush-Kuhn-Tucker (KKT) e obtemos as seguintes expressões fechadas para t_{PBS}^* e t_{SBS}^* :

$$t_{PBS}^* = \alpha \cdot T = \frac{(T - t_{0SBS})}{2T - (t_{0PBS} + t_{0SBS})} \cdot T \quad (7)$$

$$t_{SBS}^* = T - t_{PBS}^* = (1 - \alpha) \cdot T \quad (8)$$

Para determinar t_{0PBS} , consideramos que esse tempo de locação destinado ao PUE deve ser suficiente para que a quantidade total de dados transmitidos através da cooperação PU-SU seja maior ou igual a que seria obtida na comunicação direta com a PBS, o que leva a seguinte condição:

$$t_{0PBS} = \frac{\overline{C_{PUE PBS}}}{q_{SBS} \cdot \overline{C_{SBS PBS}}_{PUE}} \cdot T \quad (9)$$

onde $\overline{C_{SBS PBS}}_{PUE}$ é a capacidade média de transmissão de dados de PUE alcançada com a cooperação da SBS e q_{SBS} é a probabilidade de $\overline{C_{SBS PBS}}_{PUE} \geq \overline{C_{PUE PBS}}$. Adicionalmente, a SBS precisa ser compensada pelo apoio prestado. Assumimos que os custos decorrentes de sua cooperação sejam predominantemente relacionados à potência de transmissão p_{SBS} , despendida para a comunicação do PUE. Assim, chamando de $\overline{C_{SBS SUE}}$ a capacidade média de transmissão de dados que a SBS consegue proporcionar a seus SUE, utilizando os recursos espectrais concedidos pela PBS, encontramos:

$$t_{0SBS} = \frac{c \cdot p_{SBS}}{\overline{C_{SBS SUE}}} \cdot t_{0PBS} \quad (10)$$

sendo o parâmetro c , expresso em $\left[\frac{Bit/s}{W \cdot Hz} \right]$, uma representação alternativa da eficiência energética (*Energy Efficiency* – EE) da SBS e $p_{SBS_{ger}}$ é a potência gerada pelos circuitos de transmissão, sem considerar os ganhos de antena.

IV. RESULTADOS ANALÍTICOS

Como as principais limitações da comunicação FD ocorrem no *uplink*, deixamos para um trabalho futuro a análise de nossa proposta com o *downlink*. Dado que PUE e PBS comunicam-se diretamente apenas pelo modo HD, obtemos o valor de $\overline{I_{ag PUE PBS}}$ a partir das expressões (4) e (5), fazendo $r = 0$ e recorrendo ao Teorema da Diluição (*Thinning Theorem*) [9] para o cálculo de $(\lambda P)_{\mathcal{K}}$. Ressaltamos que, apesar do conjunto $\Phi_{I_{ag PU ij}}$ não ser estritamente um HPPP devido ao esquema de associação dos PUE às PBS, adotado para a Rede Primária, essa aproximação é possível, conforme indicado em [14].

Em seguida, determinamos $\overline{C_{PUE PBS}}$ de acordo com (1). Semelhantemente, calculamos $\overline{C_{SBS PBS}}_{PUE}$ e $\overline{C_{SBS SUE}}$ por intermédio de (1)-(3). Para $\overline{C_{SBS SUE}}$, assumimos que a comunicação ocorre entre um transmissor SUE_1 e um receptor SUE_2 , localizados na borda da área de cobertura da SBS ($r_{SUE_1 SBS} = r_{SBS SUE_2} = r_s$). Esse posicionamento é mais desafiador para haver cooperação PU-SU e proporciona soluções conservadoras, que estabelecem uma consistente referência para analisar o potencial do mecanismo de compartilhamento espectral proposto. Com os valores obtidos para $\overline{C_{PUE PBS}}$, $\overline{C_{SBS PBS}}_{PUE}$ e $\overline{C_{SBS SUE}}$, calculamos facilmente as componentes de g_0 através de (9) e (10). Aplicando esses resultados a (7) e (8), utilizamos o parâmetro c como critério

para analisar a viabilidade da cooperação PU-SU, para os modos HD e FD, com os protocolos AD e DF. Esse parâmetro pode ser interpretado como a recompensa mínima desejada por SU para cooperar com PU. Assim, existe um $c_{m\acute{a}x}$ para o qual ainda haverá solução $g^* = (t_p^*, t_s^*)$ e, quanto maior for o seu valor, maior também será o tempo de acesso secundário exclusivo aos recursos espectrais licenciados, com a garantia de que os ganhos em termos de vazão da rede primária serão minimamente preservados em relação ao caso sem cooperação. Com isso, mais incentivos haverá para que a cooperação PU-SU ocorra e proporcione ganhos de EE e SE ao sistema de comunicações. A fim de destacar o impacto que as condições (9) e (10) exercem sobre a cooperação PU-SU e possibilitar que nossos resultados sejam comparados com os de trabalhos anteriores, consideramos um cenário de baixa interferência agregada, onde $\overline{I_{ag ij}} \leq \overline{RSI_{SBS}} + \overline{\sigma_{SBS}^2}$. A TABELA I apresenta os valores dos parâmetros utilizados para essa restrição.

TABELA I

PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
d	4	r_s	200 m
p_{SBS}	1 W	r_{gp}	1000 m
$p_{SBS_{ger}}$	0,1 W	r_{gs}	200 m
p_{PUE}	1 W	$(\lambda P)_{\Phi_{I_{ag PU ij}}}$	$8 \cdot 10^{-8}$ W
p_{SUE}	0,1 W	$(\lambda P)_{\Phi_{I_{ag SU ij}}}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$ W
r_p	1000 m	N_0	10^{-10} W

Esses parâmetros representam uma rede primária operando em plena carga, com 10 células secundárias dentro de sua região de cobertura. Definimos que as SBS operam sempre no modo FD para comunicação de seus SUE e possuem taxa de falha de sensoriamento igual a 10%. Também normalizamos o período de tempo T com valor unitário. A Figura 1 apresenta os valores de $c_{m\acute{a}x}$ dentro da faixa de γ_{RSI} considerada adequada para a comunicação FD ($<1E-10$ ou $-100dB$). As curvas foram construídas para esquemas formados pelas combinações entre os modos de operação HD e FD com os protocolos AF e DF e diferentes posicionamentos relativos entre PBS, SBS e PUE. Para $r_{PBS SBS}$, consideramos os valores $0,80r_p$, $0,60r_p$ e $0,40r_p$, ou seja, SBS a 80%, 60% e 40% da borda da área de cobertura da PBS. De forma semelhante, procedemos para o distanciamento entre SBS e PUE, com $r_{SBS PUE}$ igual a $0,10r_s$ e $0,90r_s$. As legendas indicam todas essas informações na seguinte ordem: esquema de cooperação e posicionamento relativo (PBS-SBS; SBS-PUE; PUE-PBS). A cooperação PU-SU somente é viável nos pontos do gráfico onde há soluções para $g^* = (t_{PBS}^*, t_{SBS}^*)$, que correspondem às regiões inferiores às curvas de $c_{m\acute{a}x}$, com $0 \leq c \leq c_{m\acute{a}x}$. Assim, regiões mais extensas indicam possibilidades de ganhos maiores para PU e SU e condições melhores para haver cooperação. O ponto P1, na Figura 1 (A), esclarece isso, indicando que, para γ_{RSI} igual a $5E-11$ e c , 28 bps/W-Hz, a cooperação PU-SU ocorrerá apenas com o esquema FD-DF e posicionamento (0,40rp; 0,90rs; 0,58rp). Especificamente para o modo HD, apresentamos apenas os resultados obtidos com o protocolo DF, uma vez que foram sempre superiores aos do esquema HD-AF. Além disso, não houve soluções viáveis para o modo HD em pequenas distâncias

SBS-PUE ($r_{SBS\ PUE} = 0,10r_s$). Nos demais casos, o modo HD proporcionou resultados sempre inferiores aos do modo FD em posicionamentos correspondentes. Para um mesmo esquema do modo FD, quanto mais próximo a SBS se encontrava da PBS e o PUE, distante da SBS ($r_{SBS\ PUE} = 0,90r_s$), maiores foram os valores de $c_{m\acute{a}x}$, sendo que os resultados com o protocolo DF superaram os obtidos com o protocolo AF.

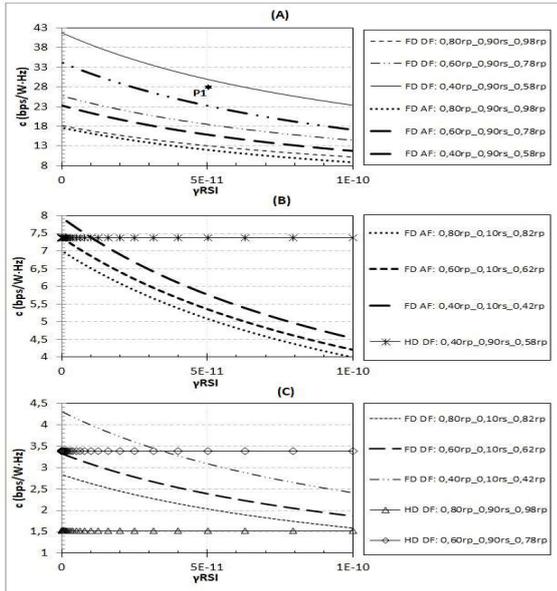


Fig. 1. Valores do parâmetro $c_{m\acute{a}x}$ na faixa de operação FD

À medida que a distância PBS-SBS aumentou, as variações em $c_{m\acute{a}x}$ decorrentes da distância SBS-PUE se tornaram menores, indicando uma tendência de que $r_{PBS\ SBS}$ seja mais determinante do que $r_{SBS\ PUE}$ na região próxima da borda da área de cobertura da PBS. Nota-se também que, independentemente da distância PBS-SBS e do modo de operação, para PUE próximos à SBS ($r_{SBS\ PUE} = 0,10r_s$), os valores de $c_{m\acute{a}x}$ sofreram pequenas alterações para um mesmo tipo de protocolo, sendo que o AF proporcionou resultados maiores do que o DF. Em suma, os resultados indicam a superioridade do modo FD em relação ao HD para proporcionar a cooperação PU-SU no *uplink* primário, com as restrições apresentadas, sendo o esquema FD-AF a melhor opção quando o PUE estiver próximo à SBS. Para PUE distantes da SBS, localizadas em regiões intermediárias ou próximas à PBS, a alternativa mais indicada é o esquema FD-DF.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, exploramos uma nova abordagem para compartilhamento de espectro eletromagnético entre usuários primários e secundários de um sistema heterogêneo de comunicações. Para isso, estudamos o problema da divisão do tempo de locação (*Leasing Time Problem*) na cooperação PU-SU, sem superposição de sinais, empregando relays cognitivos híbridos, capazes de operar nos modos HD e FD, os protocolos de encaminhamento AF e DF. Utilizamos princípios e técnicas da Geometria Estocástica, para caracterizar a interferência agregada do sistema, e aplicamos a Teoria dos Jogos, para encontrar soluções justas, sem comprometer os direitos de acesso. Essa construção resultou expressões analíticas fechadas, que revelaram a existência de níveis baixos de interferência agregada, para os quais o modo FD é melhor que o HD para proporcionar a cooperação PU-SU no *uplink* primário, sem a

necessidade do emprego de alocação ótima de potência. Isto posto, identificamos a prevalência do protocolo AF em situações em que o PUE se encontra próximo da SBS, enquanto o esquema com protocolo DF é mais adequado para PUE distantes da SBS, localizadas em regiões intermediárias ou próximas à PBS. Com isso, condições mais favoráveis podem ser estabelecidas para que recursos espectrais licenciados, outrora restritos, sejam compartilhados efetivamente empregando-se o modo FD em relays cognitivos híbridos. Como trabalhos futuros, expandiremos nosso estudo com cenários de alta interferência agregada, analisaremos os efeitos da alocação de potência no *trade-off* SE-EE da cooperação PU-SU e verificaremos como determinar os melhores usuários para cooperar.

REFERÊNCIAS

- [1] Dr. M. Venkatesan, Dr. Anju. V. Kulkarni, e Dr. R. Menon, "Role of Cognitive Radio in 5G", *HELIX*, vol. 9, no 2, p. 4850–4854, abr. 2019, doi: 10.29042/2019-4850-4854.
- [2] A. H. Gazestani, S. A. Ghorashi, B. Mousavinasab, e M. Shikh-Bahaei, "A Survey on Implementation and Applications of Full Duplex Wireless Communications", *Phys. Commun.*, vol. 34, p. 121–134, jun. 2019, doi: 10.1016/j.phycom.2019.03.006.
- [3] H. Kim, S. Lim, H. Wang, e D. Hong, "Optimal Power Allocation and Outage Analysis for Cognitive Full Duplex Relay Systems", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no 10, p. 3754–3765, out. 2012, doi: 10.1109/TWC.2012.083112.120127.
- [4] E. E. Benitez Olivo, D. P. Moya Osorio, H. Alves, J. C. Silveira Santos Filho, e M. Latva-Aho, "Cognitive Full-Duplex Decode-and-Forward Relaying Networks With Usable Direct Link and Transmit-Power Constraints", *IEEE Access*, vol. 6, p. 24983–24995, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2831664.
- [5] X. Yuan et al., "Beyond Overlay: Reaping Mutual Benefits for Primary and Secondary Networks Through Node-Level Cooperation", *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 16, no 1, p. 2–15, jan. 2017, doi: 10.1109/TMC.2016.2539161.
- [6] G. Zheng, I. Krikidis, e B. om Ottersten, "Full-Duplex Cooperative Cognitive Radio with Transmit Imperfections", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no 5, p. 2498–2511, maio 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.032513.121464.
- [7] Q. Jin, H. Zhang, D. Yuan, J. Xu, e C.-X. Wang, "Energy-Efficient Spectrum Leasing in Cognitive Relay Networks", in 2011 Third International Conference on Communications and Mobile Computing, Qingdao, China, abr. 2011, p. 337–340, doi: 10.1109/CMC.2011.123.
- [8] V. W. S. Wong, Org., *Key technologies for 5G wireless systems*. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2017.
- [9] H. ElSawy, A. Sultan-Salem, M.-S. Alouini, e M. Z. Win, "Modeling and Analysis of Cellular Networks using Stochastic Geometry: A Tutorial", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 19, no 1, p. 167–203, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2624939.
- [10] J. Antezana, P. Massey, e D. Stojanoff, "Jensen's Inequality and majorization", arXiv:math/0411442, nov. 2004, Acessado: ago. 26, 2019. [Online]. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/math/0411442>.
- [11] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, e G. W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no 12, p. 3062–3080, dez. 2004, doi: 10.1109/TIT.2004.838089.
- [12] R. W. Heath e M. Kountouris, "Modeling heterogeneous network interference", in 2012 Information Theory and Applications Workshop, San Diego, CA, USA, fev. 2012, p. 17–22, doi: 10.1109/ITA.2012.6181825.
- [13] Q. Cao, H. V. Zhao, e Y. Jing, "Power Allocation and Pricing in Multi-User Relay Networks Using Stackelberg and Bargaining Games", *ArXiv12013056 Cs Math*, jan. 2012, Acessado: maio 28, 2019. [Online]. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1201.3056>.
- [14] S. Goyal, C. Galiotto, N. Marchetti, e S. Panwar, "Throughput and coverage for a mixed full and half duplex small cell network", in 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, maio 2016, p. 1–7, doi: 10.1109/ICC.2016.7511508.