

# Protocolo de Retransmissão Incremental Híbrido em Sistemas Cooperativos Cognitivos de Dois Saltos com Compartilhamento Espectral

Jéssica de Paulo Rodrigues, Daniel Benevides da Costa, Rafael Timóteo de Sousa Jr. e Flávio Elias G. de Deus

**Resumo**— Neste artigo, o desempenho de sistemas cooperativos cognitivos de dois saltos com compartilhamento espectral é investigado assumindo um protocolo de retransmissão incremental híbrido no nó relay. Empregando um combinador por razão máxima no terminal destino e considerando desvanecimento Rayleigh, uma expressão exata e em forma fechada para a probabilidade de outage fim-a-fim é obtida e validada através de simulação Monte Carlo. Resultados numéricos são apresentados com o intuito de avaliar o efeito da perda de percurso, distância entre nós e o limiar de interferência da rede primária no desempenho sistêmico.

**Palavras-Chave**— Comunicação cooperativa, sistemas rádio cognitivo, compartilhamento espectral, protocolo incremental híbrido, probabilidade de outage.

**Abstract**— In this paper, the performance of dual-hop cooperative cognitive systems with spectrum sharing is investigated assuming an incremental hybrid protocol at the relay node. Employing a maximal-ratio combining technique at the destination and considering Rayleigh fading, an exact closed-form expression for the end-to-end outage probability is derived and validated through Monte Carlo simulation. Numerical results are shown with the aim to evaluate the effects of the loss path coefficient, distance between nodes, and interference threshold of the primary network, in the system outage performance.

**Keywords**— Cooperative communication, cognitive radio systems, spectrum sharing, incremental hybrid protocol, outage probability.

## I. INTRODUÇÃO

Devido ao crescente aumento dos serviços sem fio, cada vez mais o uso do espectro torna-se necessário. Porém, dentro do atual quadro de regulamentação espectral, todas as bandas de frequência devem ser exclusivamente alocadas para serviços específicos e nenhuma violação por parte de usuários não-licenciados é permitida. Pesquisas recentes sobre a utilização do espectro feita pela Comissão Federal de Comunicações têm indicado que o atual espectro licenciado é pouco utilizado em boa parte do tempo e espaço. Porém, a utilização eficiente do espectro pode ser significativamente melhorada caso um usuário seja permitido utilizar a banda licenciada a um outro

usuário se este não estiver a ocupando. Rádio cognitivo tem sido proposto para este fim, ou seja, para prover o uso eficiente do espectro. Monitorando o ambiente e adaptando dinamicamente os parâmetros do sistema, rádio cognitivo é capaz de preencher os espaços vazios e servir seus usuários sem causar interferência ao usuário licenciado [1]. Diversidade cooperativa é uma outra tecnologia emergente que traz importantes benefícios para os sistemas sem fio, tais como aumento da confiabilidade na detecção do sinal, da cobertura, da eficiência espectral e da vazão do sistema. Estes benefícios são obtidos sem a necessidade de altos níveis de potência transmitidos e múltiplas antenas nos terminais [2]. Tal tecnologia explora a natureza *broadcast* do canal sem fio, de forma que sinais transportando a mesma informação atingem o terminal destino através de múltiplos canais descorrelacionados oriundos dos diversos relays. O destino então combina estes sinais, criando diversidade espacial. Vários trabalhos na literatura têm investigado o uso conjunto destas duas tecnologias promissoras, e alguns destes artigos são discutidos brevemente na sequência.

O desempenho de sistemas cooperativos com compartilhamento espectral foi estudado em [3]–[8]. Mais especificamente, considerou-se as seguintes suposições: em [3]: restrições de potência média (e não a de pico) de interferência nos receptores primários; em [4]: o uso de técnicas de cancelamento de interferência oportunística na rede secundária; em [5], [6]: canais com desvanecimento Nakagami- $m$ , a ausência de *link* direto entre os terminais fonte-destino, e protocolos decodifica-e-encaminha (DF, do inglês *decode-and-forward*) e amplifica-e-encaminha (AF, do inglês *amplify-and-forward*), respectivamente; em [7], [8]: *link* direto, combinação por seleção no terminal destino para combinar os sinais da fonte e do relay, e o protocolo DF.

Vale salientar que os trabalhos citados anteriormente consideraram um protocolo de retransmissão fixo no nó relay, de forma que este sempre é utilizado, independente da qualidade dos links, o que pode levar ao seu uso desnecessário em certos instantes de tempo, ocasionando consequentemente um desperdício de recursos da rede. Assim, a fim de melhorar a eficiência espectral de sistemas rádio cognitivo com compartilhamento espectral, alguns trabalhos têm considerado um protocolo de retransmissão incremental no nó relay [9]–[11]. Porém, comum a estes trabalhos é que foi empregado o protocolo DF. Tal hipótese pode implicar em um perda de desempenho, pois sob certas condições o protocolo AF possui desempenho melhor que o protocolo DF. Tendo em vista esse fato, no presente artigo é empregado um protocolo de retrans-

J. de P. Rodrigues e D. B. da Costa, Departamento de Engenharia da Computação, Universidade Federal de Ceará, Sobral-CE, e-mails: {jessicadpaulo@gmail.com, danielbcosta@ieee.org}.

R. T. de Sousa Jr. e F. E. G. de Deus, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, emails: {desousa@unb.br, flavioelias@unb.br}.

Os autores agradecem às Agências brasileiras de pesquisa, desenvolvimento e inovação CAPES (Projeto FORTE 23038.007604/2014-69), FAPDF (Protocolo 11454.54.34054.17052016), e à Secretaria do Orçamento Federal - SOF (Termo de Execução 13/2013) do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, pelo suporte ao presente trabalho.

missão incremental híbrido (IHDAF, do inglês *incremental hybrid decode-amplify-forward*), onde o *relay* retransmite o sinal ora utilizando o protocolo AF, ora o protocolo DF. Em particular, empregando a técnica de combinação por razão máxima (MRC, do inglês *maximal-ratio combining*) no terminal destino e considerando desvanecimento Rayleigh, uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* fim-a-fim é obtida e validada através de simulação Monte Carlo. Resultados numéricos são apresentados com o intuito de avaliar o efeito da perda de percurso, distância entre nós e o limiar de interferência da rede primária no desempenho sistêmico.

*Notações Matemáticas:*  $F_X(\cdot)$  e  $f_X(\cdot)$  representam a função de distribuição acumulada (CDF) e a função densidade de probabilidade (PDF) de uma variável aleatória (VA) arbitrária  $X$ ,  $\bar{X}$  simboliza a média estatística de uma VA  $X$ , e  $\Pr\{\}$  denota probabilidade.

O restante deste artigo está estruturado como segue. Seção II introduz o modelo sistêmico. Seção III realiza uma análise de *outage* do sistema. Neste caso, a derivação de uma expressão para a probabilidade de *outage* é feita. Sessão IV apresenta alguns resultados numéricos e simulações Monte Carlo. Finalmente, Sessão V conclui este artigo.

## II. MODELO SISTÊMICO

Considere uma rede cooperativa cognitiva de dois saltos com compartilhamento espectral consistindo de um nó fonte secundário S, um nó *relay* secundário R, um nó destino secundário D e um receptor primário P, como ilustrado na Fig. 1. Todos os nós são equipados com uma única antena omnidirecional e operam no modo *half-duplex*. Devido a obstáculos ou forte sombreamento, assume-se que o transmissor primário não causa interferência na rede secundária. Além disso, considera-se que os *links* estão sujeitos a desvanecimento Rayleigh. Como os usuários primários e secundários compartilham o mesmo espectro, para não haver interferência com a rede primária, as potências de transmissão de S e R são limitadas por um limiar  $I_p$ , definido como o pico máximo de interferência que o receptor primário P pode tolerar.

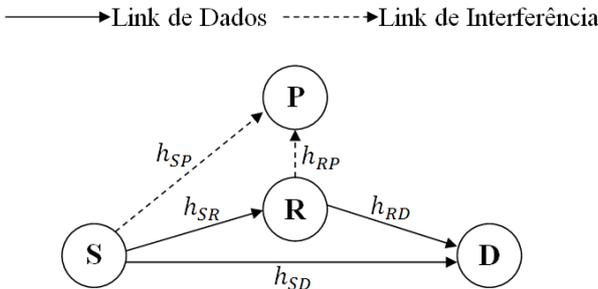


Fig. 1. Modelo sistêmico de uma rede cooperativa cognitiva com compartilhamento espectral.

Fig. 2 ilustra o modo de operação do protocolo de retransmissão IHDAF. Assumindo um esquema de acesso múltiplo por divisão no tempo, a comunicação secundária ocorre em duas fases [12]. Na primeira fase, S envia o sinal em *broadcast*

para R e D simultaneamente com potência de transmissão  $P_S$ . A partir de um limiar pré-estabelecido  $\gamma_{th}$ , o terminal destino decide se é capaz de decodificar corretamente a mensagem enviada pela fonte. Em particular, caso a razão sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) instantânea do *link* S-D exceda o limiar, D consegue decodificar corretamente a mensagem enviada pela fonte e R permanece em silêncio; então S envia uma nova mensagem na segunda fase. Caso contrário, a retransmissão torna-se necessária e, na segunda fase, R avalia a qualidade do sinal recebido da fonte com base no limiar  $\gamma_{th}$ . Neste caso, se a SNR do *link* S-R exceder  $\gamma_{th}$ , R decodifica corretamente a mensagem recebida e encaminha a mesma para D. Caso contrário, R comuta para o modo AF com o intuito melhorar o desempenho sistêmico diante das condições ruins do canal S-R. A retransmissão ocorre com potência  $P_R$ . No terminal destino, os sinais resultantes do *link* direto e do *link* auxiliar são combinados por meio da técnica MRC [12].

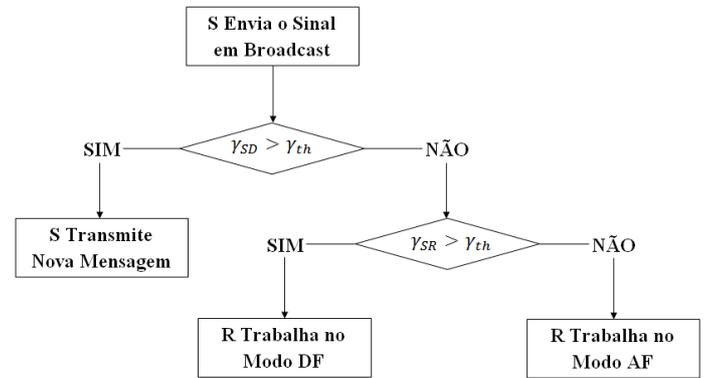


Fig. 2. Fluxograma do protocolo de retransmissão IHDAF.

As potências  $P_S$  e  $P_R$  são determinadas, respectivamente, como

$$\begin{aligned} P_S &= \frac{I_p}{|h_{SP}|^2}, \\ P_R &= \frac{I_p}{|h_{RP}|^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

em que  $I_p$  corresponde a interferência de pico máxima que P pode tolerar e,  $h_{SP}$  e  $h_{RP}$  denotam os coeficientes de canal dos *links* S-P e R-P, respectivamente. Baseado em (1), as SNRs instantâneas dos *links* S-D, S-R e R-D são expressas, respectivamente, como

$$\gamma_{SD} = \frac{\bar{\gamma}|h_{SD}|^2}{|h_{SP}|^2}, \quad (2)$$

$$\gamma_{SR} = \frac{\bar{\gamma}|h_{SR}|^2}{|h_{SP}|^2}, \quad (3)$$

$$\gamma_{RD} = \frac{\bar{\gamma}|h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2}, \quad (4)$$

onde  $h_{SD}$ ,  $h_{SR}$  e  $h_{RD}$  correspondem aos coeficientes de canal dos *links* S-D, S-R e R-D, respectivamente, e  $\bar{\gamma} = \frac{I_p}{N_0}$ , em que  $N_0$  representa a variância do ruído. Assumindo desvanecimento Rayleigh, a PDF de  $z_i = |h_i|^2$  ( $i \in \{SR, RD, SD, SP, RP\}$ ) é dada por

$$f_{z_i}(z) = \frac{1}{z_i} e^{-\frac{z}{z_i}}. \quad (5)$$

## III. PROBABILIDADE DE OUTAGE

Nesta seção uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* fim-a-fim de uma rede cooperativa cognitiva de dois saltos com compartilhamento espectral e usando o protocolo de retransmissão IHDAF será derivada. Como é sabido, a probabilidade de *outage* fim-a-fim é definida como a probabilidade da SNR instantânea em D estar abaixo de um certo limiar  $\gamma_{th}$ . Baseado na funcionalidade do protocolo IHDAF descrito na seção anterior, a probabilidade de *outage* do sistema em estudo pode ser matematicamente formulada como

$$P_{out} = \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} \} \\ + \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{DAF} < \gamma_{th} \}, \quad (6)$$

em que  $\gamma_{DDF}$  e  $\gamma_{DAF}$  correspondem as SNRs fim-a-fim para o caso em que o *relay* utiliza os protocolos DF e AF, respectivamente, sendo expressas como:  $\gamma_{DDF} = \gamma_{RD} + \gamma_{SD}$  e  $\gamma_{DAF} = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}} + \gamma_{SD}$ . Perceba que (6) é composta da soma de duas parcelas. Na sequência, expressões em forma fechada para cada uma destas parcelas serão determinadas analiticamente.

Da primeira parcela de (6), observe que  $\gamma_{SD}$  e  $\gamma_{SR}$  não são estatisticamente independentes devido à variável aleatória comum  $|h_{SP}|^2$ . Assim, fazendo uso do método empregado em [7] e utilizando conceitos de estatísticas condicionais [13], seja  $|h_{SP}|^2 = X$  tal que a primeira parcela de (6) pode ser re-expressa como

$$\Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} \} \\ = \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} | x \} f_X(x) dx \\ = \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SR} > \gamma_{th} | x \} \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} | x \} \\ \times f_X(x) dx \\ = \int_0^\infty \underbrace{\Pr \{ \gamma_{SR} > \gamma_{th} | x \}}_{I_1} \underbrace{\Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SD} + \gamma_{RD} < \gamma_{th} | x \}}_{I_2} \\ \times f_X(x) dx. \quad (7)$$

Focando no cálculo de  $I_1$ , segue da teoria de probabilidade [13] que

$$I_1 = \Pr \{ \gamma_{SR} > \gamma_{th} | x \} = 1 - \Pr \{ \gamma_{SR} < \gamma_{th} | x \} \\ = 1 - F_W \left( \frac{\gamma_{th} x}{\bar{\gamma}} \right) = 1 - \int_0^{\frac{\gamma_{th} x}{\bar{\gamma}}} f_W(w) dw = e^{-\frac{\gamma_{th} x}{\bar{\gamma}}}, \quad (8)$$

onde  $W = |h_{SR}|^2$  e utilizou-se (5) para a PDF de  $W$ . Por outro lado,  $I_2$  pode ser escrito como [13]

$$\Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SD} + \gamma_{RD} < \gamma_{th} | x \} \\ = \Pr \left\{ \frac{\bar{\gamma} |h_{SD}|^2}{x} < \gamma_{th}, \frac{\bar{\gamma} |h_{SD}|^2}{x} + \frac{\bar{\gamma} |h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2} < \gamma_{th} | x \right\} \\ = \Pr \left\{ \frac{|h_{SD}|^2}{x} < \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}, \frac{|h_{SD}|^2}{x} + \frac{|h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2} < \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} | x \right\} \\ = \Pr \left\{ \frac{|h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2} < \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} - \frac{|h_{SD}|^2}{x}, \frac{|h_{SD}|^2}{x} < \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} | x \right\}. \quad (9)$$

Seja  $|h_{RD}|^2 = \phi$ ,  $|h_{RP}|^2 = \psi$  e  $Z = \frac{|h_{RD}|^2}{|h_{RP}|^2} = \frac{\phi}{\psi}$ . Fazendo uso novamente dos conceitos de teoria de probabilidade [13], a PDF e a CDF de  $Z$  podem ser determinadas como

$$f_Z(z) = \int_0^\infty \psi f_\psi(\psi) f_\phi(\psi z) d\psi = \int_0^\infty \psi \frac{1}{\psi} e^{-\frac{\psi}{\bar{\psi}}} \frac{1}{\phi} e^{-\frac{\psi z}{\bar{\phi}}} d\psi \\ = \frac{1}{\bar{\psi}\bar{\phi}} \int_0^\infty \psi e^{-\psi \left( \frac{1}{\bar{\psi}} + \frac{z}{\bar{\phi}} \right)} d\psi = \frac{1}{\bar{\psi}\bar{\phi} \left( \frac{1}{\bar{\psi}} + \frac{z}{\bar{\phi}} \right)^2}, \quad (10)$$

$$F_Z(\gamma) = \int_0^\gamma f_Z(z) dz = \int_0^\gamma \frac{1}{\bar{\psi}\bar{\phi} \left( \frac{1}{\bar{\psi}} + \frac{z}{\bar{\phi}} \right)^2} dz = \frac{\bar{\psi}\bar{\gamma}}{\bar{\phi} + \bar{\psi}\bar{\gamma}}. \quad (11)$$

Sendo  $Y = \frac{|h_{SD}|^2}{x}$  e utilizando transformação de variáveis, a PDF de  $Y$  é dada por

$$f_Y(y) = x \frac{1}{y} e^{-\frac{xy}{\bar{y}}}. \quad (12)$$

Baseado nos resultados acima, uma expressão em forma fechada para a primeira parcela de (6), que é representada por (7), pode ser determinada como

$$\Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}, \gamma_{DDF} < \gamma_{th} \} = \\ = \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SR} > \gamma_{th} | x \} \int_0^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}} F_Z \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} - y | x \right) f_Y(y) dy \\ \times f_X(x) dx \\ = \int_0^\infty e^{-\frac{\gamma_{th} x}{\bar{\gamma} \bar{w}}} \left( \int_0^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}} \frac{\bar{\psi} \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} - y \right)}{\bar{\phi} + \bar{\psi} \left( \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}} - y \right)} x \frac{1}{y} e^{-\frac{xy}{\bar{y}}} dy \right) \frac{1}{x} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} dx \\ = \bar{\gamma} \bar{x} \bar{\psi} \bar{w}^2 \left[ \frac{\gamma_{th} (\bar{x} \bar{\gamma} \bar{w} \bar{\phi} + \bar{\psi} (\bar{y} \bar{\gamma} \bar{w} + \gamma_{th} \bar{x} (\bar{y} + \bar{w})))}{(\bar{x} \gamma_{th} + \bar{\gamma} \bar{w}) A_1} \right. \\ \left. - \frac{A_2 \log \left[ -\frac{\bar{\psi} (\bar{y} \bar{\gamma} \bar{w} + \bar{x} \gamma_{th} (\bar{y} + \bar{w}))}{\bar{\gamma} \bar{x} \bar{w} \bar{\phi}} \right]}{(\bar{x} \gamma_{th} + \bar{\gamma} \bar{w}) A_1} + \frac{A_2 \log \left[ -\frac{\bar{y} \bar{\gamma} \bar{\psi} \bar{w} + \bar{y} \bar{x} \gamma_{th} \bar{\psi}}{\bar{x} \gamma_{th} \bar{\psi} \bar{w} + \bar{\gamma} \bar{x} \bar{w} \bar{\phi}} \right]}{(\bar{x} \gamma_{th} + \bar{\gamma} \bar{w}) A_1} \right], \quad (13)$$

em que  $A_1 = (\bar{\phi} \bar{\gamma} \bar{x} \bar{w} + \bar{\psi} (\bar{\gamma} \bar{w} \bar{y} + \bar{x} \gamma_{th} (\bar{w} + \bar{y})))^2$  e  $A_2 = \bar{\phi} \bar{\gamma} (\bar{x} \gamma_{th} + \bar{\gamma} \bar{w}) \bar{y}$ .

Considerando agora o cálculo da segunda parcela de (6), de [13] segue que

$$\Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{DAF} < \gamma_{th} \} \\ = \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{DAF} < \gamma_{th} | x \} f_X(x) dx \\ = \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{AF} + \gamma_{SD} < \gamma_{th} | x \} \\ \times f_X(x) dx \\ = \int_0^\infty \Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{AF} < \gamma_{th} - \gamma_{SD} | x \} \\ \times f_X(x) dx \\ = \int_0^\infty \Pr \left\{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}} < \gamma_{th} - \gamma_{SD} | x \right\} \\ \times f_X(x) dx. \quad (14)$$

Seja  $\gamma_{SR}\gamma_{RD} = \theta$ ,  $\gamma_{SR} + \gamma_{RD} = \varphi$  e  $\nu = \frac{\gamma_{SR}\gamma_{RD}}{\gamma_{SR} + \gamma_{RD}} = \frac{\theta}{\varphi}$ . Assim, a PDF de  $\nu$  condicionada a  $X$  pode ser calculada como

$$f_{\nu|x}(\nu) = \int_0^\infty \varphi f_{\varphi|x}(\varphi) f_{\theta|x}(\nu\varphi) d\varphi. \quad (15)$$

Neste caso, a PDF de  $\theta$  condicionada a  $X$  é dada por

$$\begin{aligned} f_{\theta|x}(\theta) &= \int_0^\infty \frac{1}{\gamma_{SR}} f_{\gamma_{SR}|x}(\gamma_{SR}) f_{\gamma_{RD}|x}\left(\frac{\theta}{\gamma_{SR}}\right) d\gamma_{SR} \\ &= \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma_{SR}} e^{-\frac{\gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR}}} e^{-\frac{\theta}{\gamma_{SR}\bar{\gamma}_{RD}}} d\gamma_{SR} \\ &= \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} 2K_0 \left[ \frac{2}{\sqrt{\bar{\gamma}_{SR}}\sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\theta}}} \right] \\ &= \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} 2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \left( \frac{1}{\sqrt{\bar{\gamma}_{SR}}\sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\theta}}} \right)^{2m}, \end{aligned} \quad (16)$$

onde  $K_0(\cdot)$  representa a função de Bessel modificada de ordem zero [14, Eq. (8.432.1)]. A última igualdade de (16) segue da representação em série de *Taylor* para a função  $K_0(\cdot)$  [14, Eq. (8.447.3)]. Além disso, perceba que embora as PDFs de  $\gamma_{SR}$  e  $\gamma_{RD}$  não sigam uma distribuição exponencial, quando condicionamos estas variáveis a  $X$ , suas respectivas PDFs condicionais seguem agora uma distribuição exponencial.

Por outro lado, a PDF de  $\varphi$  condicionada a  $X$  pode ser determinada como

$$\begin{aligned} f_{\varphi|x}(\varphi) &= \int_0^\infty f_{\gamma_{SR}|x}(\gamma_{SR}) f_{\gamma_{RD}|x}(\varphi - \gamma_{SR}) d\gamma_{SR} \\ &= \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} \int_0^\infty e^{-\frac{\gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR}}} e^{-\frac{\varphi - \gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{RD}}} d\gamma_{SR} \\ &= \frac{e^{-\frac{\varphi}{\bar{\gamma}_{RD}}}}{-\bar{\gamma}_{SR} + \bar{\gamma}_{RD}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Substituindo (16) e (17) em (15), segue que

$$\begin{aligned} f_{\nu|x}(\nu) &= \int_0^\infty \varphi \left( \frac{e^{-\frac{\varphi}{\bar{\gamma}_{RD}}}}{-\bar{\gamma}_{SR} + \bar{\gamma}_{RD}} \right) \\ &\times \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}} 2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \left( \frac{1}{\sqrt{\bar{\gamma}_{SR}}\sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\nu\varphi}}} \right)^{2m} \right) d\varphi \\ &= -\frac{2e^{-\frac{\nu}{\bar{\gamma}_{SR}}} (\bar{\gamma}_{RD})^2 (\bar{\gamma}_{SR} - \nu)}{\bar{\gamma}_{SR}((\bar{\gamma}_{SR})^2 \bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SR}(\bar{\gamma}_{RD})^2)}, \end{aligned} \quad (18)$$

e, conseqüentemente,

$$\begin{aligned} F_{\nu|x}(\gamma) &= \int_0^\gamma f_{\nu|x}(\nu) d\nu \\ &= \int_0^\infty -\frac{2e^{-\frac{\nu}{\bar{\gamma}_{SR}}} (\bar{\gamma}_{RD})^2 (\bar{\gamma}_{SR} - \nu)}{\bar{\gamma}_{SR}((\bar{\gamma}_{SR})^2 \bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SR}(\bar{\gamma}_{RD})^2)} d\nu \\ &= -\frac{2e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}} \bar{\gamma}_{RD} \gamma}{(\bar{\gamma}_{SR})^2 - \bar{\gamma}_{SR}\bar{\gamma}_{RD}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Baseado nos resultados acima, temos que (14) pode ser determinada como

$$\begin{aligned} &\Pr \{ \gamma_{SD} < \gamma_{th}, \gamma_{SR} < \gamma_{th}, \gamma_{DAF} < \gamma_{th} \} \\ &= \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{th}} \int_0^{\gamma_{th}} F_\nu(\gamma_{th} - a|x) f_{\gamma_{SR}|x}(b) db f_{\gamma_{SD}|x}(a) da \\ &\times f_X(x) dx \\ &= \frac{2e^{-2\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{SR}}} \left( -1 + e^{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{SR}}} \right) \bar{\gamma}_{RD} A_3}{(\bar{\gamma}_{SD} - \bar{\gamma}_{SR})^2 (\bar{\gamma}_{SR} - \bar{\gamma}_{RD})}, \end{aligned} \quad (20)$$

em que  $A_3 = -\bar{\gamma}_{SR}\gamma_{th} + \bar{\gamma}_{SD}(\bar{\gamma}_{SR} - e^{(-\frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}})\gamma_{th}} \bar{\gamma}_{SR} + \gamma_{th})$ .

Finalmente, substituindo (13) e (20) em (6), uma expressão em forma exata e em forma fechada para a probabilidade de *outage* fim-a-fim de uma rede cooperativa cognitiva de dois saltos com compartilhamento espectral e usando o protocolo de retransmissão IHDAF é obtida. Vale salientar que tal expressão é fácil de avaliar, sendo computacionalmente muito simples. Até onde os autores estão cientes, é a primeira vez que esta expressão é derivada na literatura, servindo assim como referência para futuros trabalhos.

#### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, com o intuito de avaliar o desempenho do sistema proposto, alguns resultados numéricos serão apresentados e validados por meio de simulação Monte Carlo. Como será mostrado, uma perfeita concordância entre as curvas analíticas e simuladas é obtida. Sem perda de generalidade, para a geração das curvas considerou-se uma topologia plana  $(x, y)$  para todos os nós da rede primária e secundária. Dessa forma, a potência média do canal desvanecido entre um nó M e um nó N foi denotado como  $l^{-\eta}$ , em que  $\eta$  simboliza o expoente de perda de percurso e  $l = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2}$  representa a distância entre M e N. Para a rede secundária, assumiu-se que a localização dos nós S, R e D estão nas coordenadas (0, 0), (1/2, 0) e (1, 0), respectivamente. Assumiu-se também que o limiar de *outage*  $\gamma_{th}$  é igual a 3 dB e que a posição do usuário primário P é variada em relação aos nós secundários. Assim como trabalhos anteriores [6], [7], definiu-se a SNR média do sistema como  $\bar{\gamma} = I_p/N_0$ .

Fig. 3 plota a probabilidade de *outage* versus  $I_p/N_0$  para diferentes valores de coeficiente de perda de percurso, o que implica fisicamente em diferentes regiões de propagação (espaço livre, área urbana ou ambientes domésticos, por exemplo). O nó P foi setado a uma distância de 0,5 de S e R. Como era esperado, o desempenho do sistema piora a medida que o coeficiente de perda de percurso aumenta. Observe também que a ordem de diversidade do sistema não varia com a variação de  $\eta$ , sendo sempre igual a 2.

Figs. 4 e 5 avaliam o efeito da localização do usuário primário em relação aos nós secundários S e R no desempenho sistêmico. Na Fig. 4, o nó P foi mantido a uma distância de 0,5 de R e variou-se a posição de P em relação à S, enquanto que na Fig. 5, manteve-se P e S a uma distância de 0,5 e variou-se a distância entre P e R. Note que o desempenho do sistema melhora à medida que P se afasta da rede secundária. Este

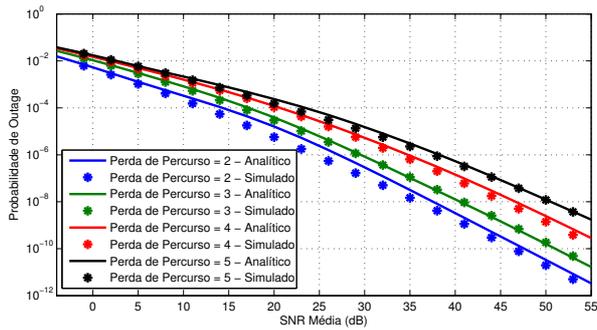


Fig. 3. Probabilidade de *outage* versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com espalhamento espectral para diferentes coeficientes de perda de percurso.

fenômeno ocorre porque quanto mais próximo P se encontra de S e/ou R maior é a interferência causada pela rede secundária.

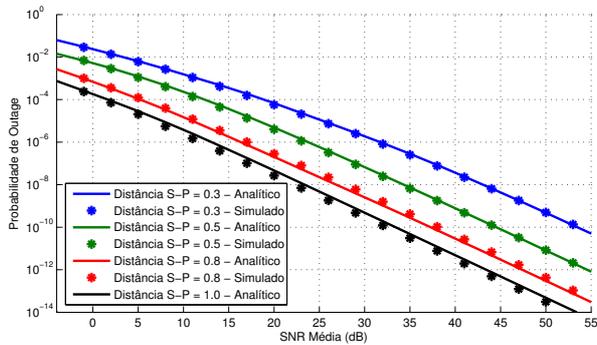


Fig. 4. Probabilidade de *outage* versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com espalhamento espectral para diferentes distâncias entre o usuário primário P e a fonte secundária S.

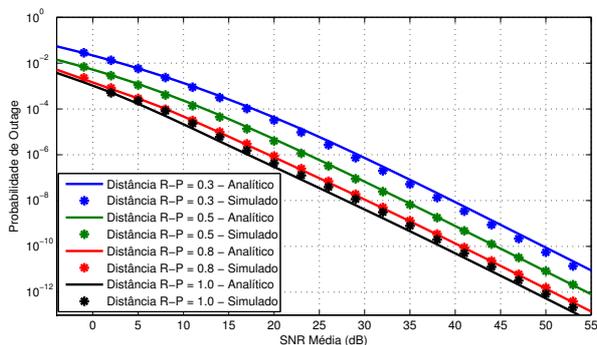


Fig. 5. Probabilidade de *outage* versus SNR média para o protocolo IHDAF em um ambiente com espalhamento espectral para diferentes distâncias entre o usuário primário P e o relay secundário R.

Fig. 6 plota probabilidade de *outage* versus  $1/N_0$  para diferentes valores de  $I_p$ . Como era esperado, observe que o desempenho do sistema melhora à medida que o pico máximo de interferência  $I_p$  suportado por P aumenta.

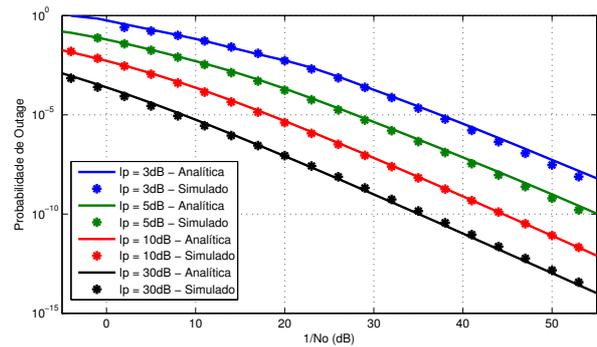


Fig. 6. Probabilidade de *outage* versus  $1/N_0$  para o protocolo IHDAF em um ambiente com espalhamento espectral para diferentes valores de  $I_p$ .

## V. CONCLUSÕES

Neste artigo, o desempenho de sistemas cooperativos cognitivos de dois saltos com compartilhamento espectral foi investigado assumindo um protocolo de retransmissão incremental híbrido no nó *relay*. Uma expressão exata e em forma fechada para a probabilidade de *outage* foi derivada e validada por simulação Monte Carlo. Alguns resultados numéricos foram apresentados com o intuito de mostrar o impacto do coeficiente de perda de percurso, da restrição de potência e da distância entre os nós no desempenho sistêmico.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Mitola, Cognitive Radio: An integral agent architecture for software defined radio, *Ph.D. dissertation*, KTH Royal Inst. Of Technol., Stockholm, Sweden, 2000.
- [2] 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, pp. 3062–3080, Dezembro 2004.
- [3] V. Asghari e S. Aissa, Performance of cooperative spectrum-sharing systems with amplify-and-forward relaying, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 4, pp. 1295–1300, Abril 2012.
- [4] B. Maham, R. Popovski, X. Zhou, e A. Hjoungnes, Cognitive multiple access network with outage margin in the primary system, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, pp. 3343–3353, Outubro 2011.
- [5] C. Zhong, T. Ratnarajah, e K. K. Wong, Outage analysis of decode-and-forward cognitive dual-hop systems with the interference constraint in Nakagami- $m$  fading channels, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 6, pp. 2875–2879, Julho 2011.
- [6] T. Q. Duong, D. B. Costa, M. Elkashlan, e V. N. Q. Bao, Cognitive amplify-and-forward relay networks over Nakagami- $m$  fading, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 5, Junho 2012.
- [7] T. Q. Duong, D. B. Costa, T. A. Tsiftsis, C. Zhong, e A. Nallanathan, Outage and diversity of cognitive relaying systems under spectrum sharing environments in Nakagami- $m$  fading, *IEEE Comm. Lett.*, vol. 16, no. 12, Dezembro 2012.
- [8] T. Q. Duong, V. N. Q. Bao, G. C. Alexandropoulos e H.J. Zepernick, Cooperative spectrum sharing networks with AF relay and selection diversity, *IET Electron. Lett.*, vol. 47, no. 20, pp. 1149–1151, Setembro 2011.
- [9] Y. Chang, Y. Li, Z. Si, Y. Lu e J. Lin, Outage analysis of cognitive incremental DF relay network in Nakagami- $m$  fading channels, *IEEE Veh. Technol. Confer.*, pp. 1–5, Seoul, Korea, Maio 2014.
- [10] K. Tourki, K. A. Qaraqe, e M. S. Alouini, Outage analysis for underlay cognitive networks using incremental regenerative relaying, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 2, Fevereiro 2013.
- [11] W. Jaafar, W. Ajib e D. Haccoun, Incremental relaying transmissions with relay selection in cognitive radio networks, *IEEE Global Commun. Conf.*, pp. 1230–1235, Anaheim, USA, Dezembro 2012.
- [12] Z. Bai, J. Jia e C. Wang, Performance analysis of SNR-based incremental hybrid decode-amplify-forward cooperative relaying protocol, *IEEE Trans. Comm.*, vol. 63, no. 6, Junho 2015.
- [13] A. L. Garcia, Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering, Pearson Prentice Hall, 3ª Edição, 2008.
- [14] I. S. Gradshteyn e I. M. Ryzhik, Table of Integrals, Series, and Products, 6ª edição. Academic, 2000.