

Sensoriamento Espectral Cooperativo sob Diferentes Intensidades de Ruído nos Receptores

Roberto C. D. V. Bomfin, Lucas dos S. Costa, Dayan A. Guimarães e Rauley A. A. de Souza

Resumo—Neste artigo analisa-se o desempenho do sensoriamento espectral cooperativo e o tráfego no canal de controle na fusão de amostras (FAM), decisões (FDE) e autovalores (FAV), e na fusão ponderada de amostras (FAMP) e de autovalores (FAVP), sob variação do nível de ruído (VNR) entre os rádios cognitivos. Na maioria dos trabalhos considera-se a VNR nula, o que torna os resultados bastante imprecisos quando comparados ao modelo mais realista. Ainda, a fim de melhorar o desempenho do sensoriamento no caso de VNR não nula, foram propostos dois esquemas de ponderação, FAMP e FAVP, que resultam em alto ganho de desempenho.

Palavras-Chave—Sensoriamento espectral, rádio cognitivo.

Abstract—In this paper we analyze the cooperative spectrum sensing performance and the control channel traffic in the decision fusion, and in the weighted and non-weighted sample and eigenvalue fusion schemes, under variable noise levels among the cognitive radios. Most of the works do not consider variations in the noise level, yielding inaccurate results when compared to the more realistic model. Besides taking into account these variations, two weighting schemes are proposed to produce high performance gains to the sample and eigenvalue fusion.

Keywords—Cognitive radio, spectrum sensing.

I. INTRODUÇÃO

A demanda por novos serviços de telecomunicações é o principal motivador das pesquisas sobre novas tecnologias, ainda mais agora com o início das pesquisas envolvendo a quinta geração (5G) dos sistemas de comunicações sem fio e a Internet das coisas, IoT (*internet of things*). Dentre os problemas mais discutidos está a escassez de faixas espectrais para acomodar o enorme número previsto de transmissores e receptores. No entanto, pesquisas mostram que, apesar da escassez, o espectro de radiofrequências está subutilizado, dado que em boa parte do tempo há faixas espectrais ociosas [1].

Na política padrão de alocação fixa de banda, o direito de ocupação é dado apenas ao usuário contratante, também chamado usuário licenciado ou primário (UP). Na nova política de alocação dinâmica de banda, admiti-se que um usuário não licenciado, ou usuário secundário (US), utilize uma faixa licenciada. Neste modelo, as transmissões US, podem ser feitas tanto de forma simultânea às do UP, desde que não causem interferências prejudiciais, quanto de forma não sobreposta, aproveitando oportunidades de transmissão, que consistem em

identificar faixas ociosas (buracos espectrais). Neste contexto surgiram os rádios cognitivos (RCs), dispositivos inteligentes que, por meio do sensoriamento espectral, identificam tais buracos [2].

O sensoriamento espectral pode ser feito por um (não-cooperativo) ou mais RCs (cooperativo). O modelo cooperativo é mais promissor, pois melhora a confiabilidade na detecção do UP frente à ocorrência de desvanecimentos multipercurso, sombreamento e incerteza do receptor [2].

Neste artigo considera-se o sensoriamento cooperativo centralizado, no qual os RCs enviam suas informações de sensoriamento (decisões, autovalores ou amostras) por um canal de controle a um centro de fusão (CF), onde tais informações são combinadas (fundidas) para que se tome a decisão final sobre o estado de ocupação da banda sensoriada. Apresentam-se aqui os resultados de uma análise envolvendo desempenho, volume de dados no canal de controle e complexidade computacional em cenários nos quais os RCs estão sujeitos a diferentes níveis de ruído, concordando com um cenário prático [3], [4]. O teste de razão de verossimilhança generalizado, GLRT (*generalized likelihood ratio test*) foi adotado como técnica de detecção nos RCs, por ser adequada à situação em que os RCs não possuem conhecimento das potências de ruído em suas entradas [5]. Se há diferenças entre as potências de ruído nos RCs, o desempenho da técnica GLRT é afetado e, por consequência, afeta-se o desempenho global do sensoriamento. No entanto, tais diferenças irão afetar de formas distintas as regras de fusão adotadas. Neste contexto são analisadas a fusão de amostras (FAM) com teste GLRT, a fusão de autovalores (FAV) com o teste GLRT modificado e a fusão de decisões (FDE) com as lógicas de decisão OU, E e voto majoritário (MAJ). Três cenários de variação de nível de ruído (VNR) entre os RCs foram avaliados: i) VNR nula, ou seja, potências de ruído idênticas nos RCs; ii) VNR moderada, na qual as diferenças entre as potências de ruído nos RCs não são muito grandes; e iii) VNR alta, na qual essas diferenças são mais elevadas. Além disso, a fim de melhorar os desempenhos sob VNR não nula, foram propostos e analisados os esquemas de fusão de amostras ponderada (FAMP) e fusão de autovalores ponderada (FAVP). Assim, a principal contribuição do trabalho é a análise de desempenho do sensoriamento espectral para as três, bem conhecidas e comparadas, técnicas de fusão, FAM, FAV e FDE pelas regras de decisão OU, AND e MAJ, mas agora sob VNR não nula, e às propostas para os esquemas ponderados.

II. MODELO DO SISTEMA

O sensoriamento espectral pode ser visto como um teste binário de hipóteses para o qual definem-se a hipótese nula

Roberto C. D. V. Bomfin, Lucas dos S. Costa, Dayan A. Guimarães e Rauley A. A. de Souza, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí - MG - Brazil (Tel:+55 (35) 3471 9227, e-mail: roberto@gee.inatel.br, lucass@inatel.br, dayan@inatel.br, rausley@inatel.br). Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fapemig, CNPq contrato No. 305467/2014-0 e pela Finep, com recursos do Funntel, contrato No 01.14.0231.00, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil.

\mathcal{H}_0 (transmissor do UP desativado) e a hipótese alternativa \mathcal{H}_1 (transmissor do UP ativo). O desempenho do sensoriamento é comumente medido por meio da probabilidade de detecção, $P_d = \Pr\{T > \gamma | \mathcal{H}_1\}$ e falso alarme, $P_{fa} = \Pr\{T > \gamma | \mathcal{H}_0\}$, em que $\Pr\{\cdot\}$ é a probabilidade de ocorrência de um evento qualquer, T , a estatística de teste proveniente de alguma técnica de detecção (GLRT neste artigo) e γ , o limiar de decisão. O desempenho global do sensoriamento é tipicamente avaliado a partir de curvas ROC (*receiver operating characteristic*), nas quais P_d é plotado em função de P_{fa} .

Considere que há M RCs cada um equipado com J antenas, e que N amostras do sinal recebido são coletadas em cada antena. As vantagens de se ter mais de uma antena por rádio se dão pela diversidade espacial obtida, resultando em um melhor desempenho do sensoriamento espectral [6]. Os dados coletados pelo m -ésimo RC, $m = 1, 2, \dots, M$, são arranjados na matriz $\mathbf{Y}_m \in \mathbb{C}^{J \times N}$ dada por

$$\mathbf{Y}_m = \mathbf{h}_m \mathbf{x}^T + \mathbf{V}_m, \quad (1)$$

em que o j -ésimo elemento do vetor de ganhos do canal $\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^{J \times 1}$ representa o ganho do canal entre o UP e a j -ésima antena do m -ésimo RC, com $j = 1, 2, \dots, J$, e T denota a operação transposição. O sinal do UP é organizado no vetor $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$. Sem perda de generalidade admite-se que o ganho médio de potência do canal é unitário, ou seja, $\mathbb{E}\{\|\mathbf{h}_m\|^2\} = 1$, em que $\mathbb{E}\{\cdot\}$ denota o valor esperado e $\|\cdot\|$ é a norma Euclidiana. A matriz $\mathbf{V}_m \in \mathbb{C}^{J \times N}$ contém amostras do ruído AWGN (*additive white Gaussian noise*) de média zero e variância σ_m^2 . Note que genericamente os RCs operam sob potências de ruído diferentes e que as antenas do m -ésimo RC estão sujeitas ao mesmo nível de ruído.

III. TÉCNICAS DE FUSÃO

A. Fusão de amostras (FAM)

Na fusão de amostras, os RCs enviam as amostras em \mathbf{Y}_m para o CF, onde é formada a matriz $\mathbf{Y}_{CF} \in \mathbb{C}^{JM \times N}$ dada por

$$\mathbf{Y}_{CF} = [\mathbf{Y}_1^T \quad \mathbf{Y}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{Y}_M^T]^T. \quad (2)$$

O CF estima a matriz de covariância $\mathbf{R} = \frac{1}{N} \mathbf{Y}_{CF} \mathbf{Y}_{CF}^\dagger$, com $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{JM \times JM}$ e \dagger denotando complexo conjugado. Em seguida o CF calcula JM autovalores de \mathbf{R} , $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{JM}$. Admitindo que o CF não tem conhecimento dos níveis de ruído σ_m^2 nos RCs, a estatística de teste para a técnica de detecção GLRT [5] será

$$T_{FAM} = \frac{JM \lambda_1}{\sum_{i=1}^{JM} \lambda_i}. \quad (3)$$

A partir da realização de exaustiva análise computacional (ver exemplos na Seção IV), foi observado que a técnica FAM tem seu desempenho radicalmente reduzido quando os RCs apresentam VNR elevada. Este fato motivou o desenvolvimento da técnica de fusão de amostras ponderada (FAMP), na qual a matriz \mathbf{Y}_{CF} definida em (2) é modificada para

$$\mathbf{Y}_{CFp} = [f_1 \mathbf{Y}_1^T \quad f_2 \mathbf{Y}_2^T \quad \dots \quad f_M \mathbf{Y}_M^T]^T, \quad (4)$$

sendo f_m , $m = 1, \dots, M$, os fatores de ponderação calculados por $f_m = 1/\sqrt{P_m}$, em que $P_m = \frac{1}{NJ} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J |Y_{m,n,j}|^2$

é a potência estimada do sinal recebido pelo m -ésimo RC, sendo $Y_{m,n,j}$ o elemento na n -ésima linha e j -ésima coluna da matriz \mathbf{Y}_m . Depois de formar a matriz \mathbf{Y}_{CFp} , os autovalores da matriz de covariância $\mathbf{R}_p = \frac{1}{N} \mathbf{Y}_{CFp} \mathbf{Y}_{CFp}^\dagger$ são computados e em seguida a estatística de teste T_{FAMP} é calculada usando (3). Note que os valores de f_m fornecem informação sobre os diferentes níveis de ruído, pois a longo prazo a potência do sinal recebido em cada RC é a mesma, já que no modelo (1) admitiu-se que tanto $\mathbb{E}\{\|\mathbf{h}_m\|^2\}$ quanto a potência de transmissão do sinal do UP são constantes. Assim, na matriz \mathbf{Y}_{CFp} as amostras dos RCs com maior potência de ruído (maior valor de P_m) serão desfavorecidas frente àquelas dos RCs com menor potência de ruído.

B. Fusão de autovalores (FAV)

Nesta técnica, cada RC calcula a matriz de covariância $\mathbf{R}_m = \frac{1}{N} \mathbf{Y}_m \mathbf{Y}_m^\dagger$, com $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{J \times J}$, da qual são calculados os J autovalores $\lambda_{1,m} > \lambda_{2,m} > \dots > \lambda_{J,m}$. Os MJ autovalores de todos os RCs são então enviados via canal de controle para o CF. Admitindo novamente que o CF não tem conhecimento sobre o nível de ruído de cada RC, a estatística de teste é calculada por meio da técnica GLRT modificada proposta em [7, eq. (14)] e aqui particularizada para portadora única:

$$T_{FAV} = \frac{J \sum_{m=1}^M \lambda_{1,m}}{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \lambda_{j,m}}. \quad (5)$$

Assim como na FAM, na FAV também pode-se aplicar um esquema de ponderação, denominado fusão de autovalores ponderada (FAVP), a fim de dar maior peso aos autovalores oriundos dos RCs com menor nível de ruído. A FAVP consiste em multiplicar os autovalores do m -ésimo RC, na equação (5), pelo fator de ponderação $g_m = 1/\sum_{j=1}^J \lambda_{j,m}$, gerando $T_{FAVP} = (J \sum_{m=1}^M g_m \lambda_{1,m}) / (\sum_{m=1}^M g_m \sum_{j=1}^J \lambda_{j,m})$. Após simplificação, a estatística de teste resulta em

$$T_{FAVP} = \frac{J}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\lambda_{1,m}}{\sum_{j=1}^J \lambda_{j,m}}. \quad (6)$$

O cálculo de g_m a partir do inverso da soma dos autovalores de cada RC na FAVP segue raciocínio análogo àquele utilizado no cálculo de f_m na FAMP. Os RCs que possuírem a maior soma de seus autovalores serão aqueles com maior nível de ruído, considerando a mesma potência de sinal primário para todos os RCs [8]. Portanto ao ponderar os autovalores dos RCs por g_m , dá-se preferência aos RCs com menor nível de ruído, aumentando assim o desempenho da técnica.

Observe que as técnicas FAV e FAVP demandam o mesmo volume de dados no canal de controle, pois em ambas cada RC envia J autovalores para o CF. No entanto, este volume é N vezes menor do que nas técnicas FAM e FAMP, nas quais JN amostras são enviadas ao CF por cada RC.

C. Fusão de decisões (FDE)

Na FDE, cada RC toma a sua decisão sobre o estado de ocupação do canal sensoriado e a envia para o CF. Como os RCs não têm conhecimento do nível de ruído, a técnica

adotada é a GLRT, para a qual a estatística de teste no m -ésimo RC é calculada por [5]

$$T_{\text{FDE}_m} = \frac{J\lambda_{1,m}}{\sum_{j=1}^J \lambda_{j,m}}. \quad (7)$$

Em seguida a decisão é tomada comparando-se a estatística de teste com o limiar de decisão. Assim a decisão será $u_m = 0$ sob a hipótese \mathcal{H}_0 , e $u_m = 1$ sob a hipótese \mathcal{H}_1 . As decisões binárias de cada RC são então enviadas via canal de controle para o CF. Consequentemente, um total de M decisões serão processadas pelo CF. O CF toma a decisão final baseada nas regras OU, E e MAJ. Na regra OU decide-se em favor de \mathcal{H}_1 se $\sum_{m=1}^M u_m > 0$. Na regra E a decisão final é tomada em favor de \mathcal{H}_1 se $\sum_{m=1}^M u_m = M$. Já na regra MAJ o CF decide em favor de \mathcal{H}_1 se $\sum_{m=1}^M u_m > M/2$. Tipicamente adota-se M ímpar na regra MAJ de forma a evitar a decisão arbitrária que teria que ser tomada em favor de \mathcal{H}_1 ou \mathcal{H}_0 quando $\sum_{m=1}^M u_m = M/2$.

No que se refere ao uso do canal de controle para reporte das decisões locais a FDE é a melhor, pois cada RC precisa enviar apenas um bit para o CF.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados resultados de simulações implementadas em MATLAB, referentes ao desempenho global do sensoriamento espectral em termos de curvas ROC. Resultados de vários experimentos são mostrados para que se verifique a influência de níveis diferentes de ruído nos RCs. Também são apresentadas nesta seção as análises do tráfego no canal de controle e da complexidade computacional necessária à realização dos cálculos pertinentes a cada técnica averiguada.

Adotou-se $M = 3$ RCs em cooperação, $J = 6$ antenas em cada RC e $N = 20$ amostras coletadas em cada antena. A relação sinal-ruído (RSR) média foi ajustada em -10 dB. Foram executados três experimentos, cada um representando uma situação em termos da variação de nível de ruído (VNR) nos RCs. Os correspondentes resultados são mostrados nas partes (a), (b) e (c) da Figura 1. O desvio padrão σ_m do ruído no m -ésimo RC foi configurado de acordo com a Tabela I.

TABELA I

CONFIGURAÇÕES DA VNR PARA OS $M = 3$ RCs NOS EXPERIMENTOS (a), (b) E (c).

VNR	σ_1	σ_2	σ_3
(a) Nula	1,00	1,00	1,00
(b) Moderada	1,16	1,00	0,60
(c) Alta	1,62	1,00	0,35

Os elementos do vetor de sinal transmitido, \mathbf{x} , são amostras complexas independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) com distribuição Gaussiana e variância (potência) dada por $P_{\text{Tx}} = 10^{\text{RSR}/10} (1/M \sum_{m=1}^M \sigma_m^2)$. Desse modo a RSR média é mantida para os casos (a), (b) e (c) identificados na Tabela I. O vetor de canal, \mathbf{h} , é composto por elementos que possuem módulo com distribuição Rayleigh e fase com distribuição uniforme, ou seja, são variáveis aleatórias Gaussianas complexas i.i.d. O canal é considerado lento e, portanto, é constante em um dado período de sensoriamento, variando apenas entre um período e outro. As ROCs foram geradas por simulação

de Monte Carlo com 50.000 realizações do sensoriamento espectral para cada ponto nos gráficos. A atividade do UP foi simulada como uma variável aleatória de Bernoulli, com 50% do tempo ativo, para contabilizar as detecções e 50% do tempo inativo, para a contagem dos falsos alarmes. Admite-se que o canal de controle é perfeito, ou seja, os dados enviados dos RCs para o CF não sofrem erro.

Na Figura 1(a), em que a potência do ruído é igual para todos os RCs, verifica-se que o desempenho do sistema com fusão de amostras é bastante superior aos demais, seguido da fusão de autovalores e da fusão de decisões com as lógicas OU, MAJ e E, respectivamente. Nota-se também que as fusões com ponderação (FAMP e FAVP) apresentam desempenho levemente inferior às convencionais (FAM e FAV), o que se atribui à imprecisão na estimativa dos níveis de ruído nos RCs.

Observando agora a Figura 1(b), a qual considera o cenário de VNR moderada, pode-se notar a queda de desempenho da FAM, demonstrando a sensibilidade dessa técnica nesse cenário. Para mitigar esse efeito, pode-se utilizar a técnica de FAMP, cujo desempenho é consideravelmente superior. Isso ocorre devido ao fato de amostras oriundas dos RCs com alta RSR terem maior peso no processo de fusão que aquelas com baixa RSR. Percebe-se também que a FAMP neste cenário supera inclusive a própria FAMP no cenário em que o ruído é igual para todos os RCs, Figura 1(a). Ao se analisar a FAVP, observa-se uma melhora de desempenho em relação ao experimento (a), assim como na FAMP. Uma comparação entre a FAVP e a FAMP revela que a FAVP possui ganho de desempenho superior, pois o deslocamento relativo das ROCs é maior na FAVP à medida que a VNR é aumentada.

A FDE, em todas as regras de decisão, no cenário ilustrado pela Figura 1(b) apresentou melhora com relação à Figura 1(a). Esta é uma característica do esquema de fusão de decisões, devido ao fato de que para VNR não-nula os RCs que têm menor potência de ruído decidem corretamente sobre o estado de ocupação do canal sensoriado com mais frequência. Por exemplo, observa-se que nesta situação a regra OU obteve o melhor desempenho dentre as regras de decisão. O motivo é que neste caso basta uma decisão correta em favor de \mathcal{H}_1 para que o CF decida corretamente. Como no cenário (b) alguns RCs possuem menor nível de ruído, esses RCs decidem corretamente com mais frequência, aumentando assim o desempenho do sistema. Vale ressaltar que, como a RSR média foi mantida nos três casos de VNR, pode-se analisar isoladamente o efeito de se ter diferentes níveis de ruído sem se preocupar com o nível absoluto de ruído em cada RC. No entanto, o ganho de desempenho da FDE OU no experimento (b) seria menor se a RSR média não fosse mantida e se $\sigma_3 > 0,60$, (Ver Tabela I), pois o nível de ruído em cada RC afeta individualmente suas decisões, autovalores ou amostras. A FDE MAJ e a FDE E melhoraram com o aumento da VNR, mas com menores saltos, pois na FDE MAJ o número de decisões individuais corretas necessárias para a obtenção de uma decisão conjunta também correta é aumentado. Na FDE E, ao contrário da FDE OU, o CF decide corretamente em favor de \mathcal{H}_0 com mais frequência.

A Figura 1(c) representa o cenário com alta VNR. Nota-se que o desempenho da FAM ficou ainda pior, mas melhorou

nas técnicas FAMP, FAV e FAVP. Neste cenário a vantagem da FAVP sobre a FAMP é evidenciado, uma vez que, devido ao maior deslocamento relativo entre as ROCs, a FAVP possui desempenho praticamente igual ao obtido pela FAMP. Por exemplo, para os casos (a), (b) e (c) e $P_{fa} = 0,1$ os valores aproximados de P_d para a FAMP são respectivamente 0,6250; 0,7750 e 0,9875. Para a FAVP tem-se 0,3875; 0,6125 e 0,9873, o que revela os desempenhos praticamente iguais da FAVP e da FAMP no caso (c). Nota-se que a FDE OU melhorou ainda mais, igualando seu desempenho ao obtido pela FAMP. A FDE MAJ e FDE E também tiveram seus desempenhos melhorados. Especificamente, a FDE MAJ ficou até mesmo superior que a FAV para $P_{fa} \lesssim 0,5$.

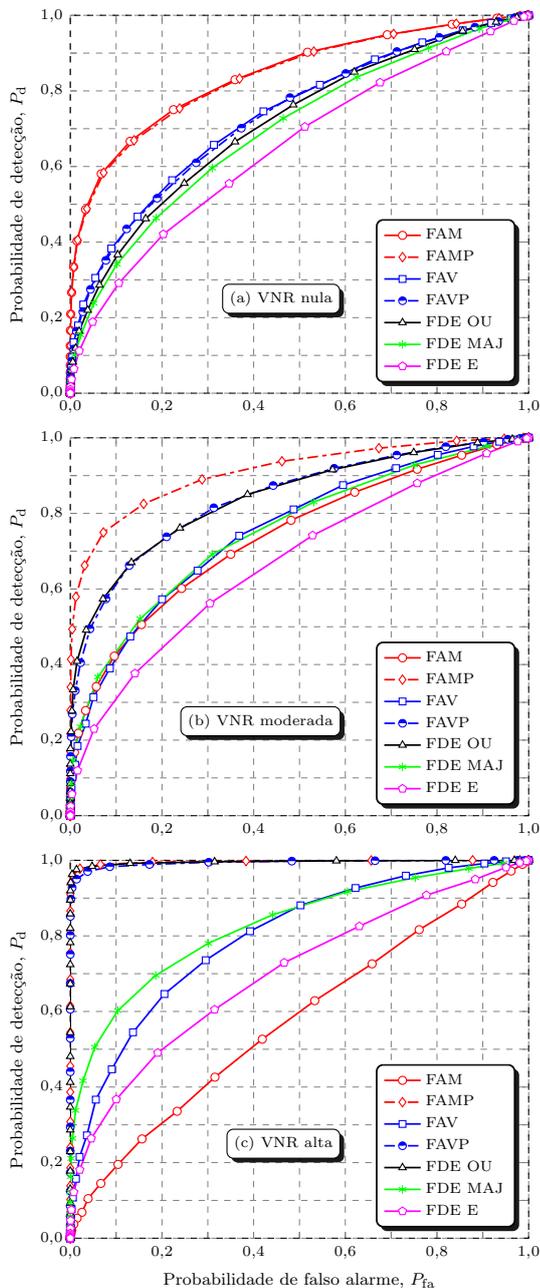


Fig. 1. Desempenho global do sensoriamento espectral com detecção GLRT e fusão convencional e ponderada de amostras (FAM e FAMP), de autovalores (FAV e FAVP) e de decisões (FDE) com lógica OU, E e MAJ, para três variações de nível de potência de ruído, σ_m^2 , entre os RCs: (a) VNR nula, (b) VNR moderada e (c) VNR alta.

As ROCs mostram que para VNR alta a escolha da melhor técnica entre FDE OU, FAMP e FAVP será determinada pelo volume de dados no canal de controle em cada caso, pois em termos de desempenho os resultados são praticamente os mesmos. Com exceção da FDE OU, da FAMP e da FAVP, que agora tem desempenhos praticamente iguais, a FDE MAJ alcança melhor desempenho para $P_{fa} \lesssim 0,5$, seguida pela FAV, FDE E e FAM, respectivamente. Os desempenhos da FAVP, FAMP e FDE OU tiveram melhora mais significativa em relação àquela obtida com os esquemas FAV, FDE MAJ e FDE E, pois elas tiram melhor proveito dos dados dos RCs cujas potências de ruído são baixas, sendo essas situações características do ambiente de alta VNR (ver Tabela I).

Do ponto de vista de volume de dados no canal de controle, o esquema de ponderação não tem influência, ou seja, FAM e FAV são equivalentes à FAMP e FAVP, respectivamente. Na FAM as amostras coletadas pelos RCs são diretamente enviadas ao CF sem nenhum processamento prévio. Neste caso tem-se M RCs, com J antenas cada, em que cada antena coleta N amostras a cada período de sensoriamento. Portanto, o volume de dados no canal de controle será de MJN amostras no total. Como na prática essas amostras são digitalizadas com b bits para a parte real e b bits para a parte imaginária, o número total de bits transmitidos neste caso é $2bMJN$. Na FAV primeiramente cada um dos M RCs computa uma matriz de covariância de ordem $J \times J$, de onde são extraídos os J autovalores que são transmitidos ao CF. Assim, o volume de dados no canal de controle é igual a bMJ bits, representando um volume de dados $2bMJN/bMJ = 2N$ vezes menor do que a FAM. Já na FDE, em todas as regras de combinação, apenas as decisões individuais de cada RC serão enviadas ao CF, sendo este, portanto, o caso em que o volume de dados no canal de controle é o menor. Especificamente, apenas M bits serão transmitidos ao CF, uma redução do volume de dados equivalente a $2bMJN/M = 2bJN$ vezes com relação à FAM e $bMJ/M = bJ$ vezes com relação à FAV. Como exemplo numérico, admita uma digitalização de $b = 4$ bits, com transmissão BPSK (*binary phase-shift keying*) para FAV e FDE, e com transmissão em quadratura QPSK (*quaternary phase-shift keying*) para que cada símbolo transporte um bit da parte real e o outro da parte imaginária na FAM. De acordo com os valores utilizados nas simulações, o canal de controle será usado por $bMJN = 4 \times 3 \times 6 \times 20 = 1.440$, $bMJ = 4 \times 3 \times 6 = 72$ e $M = 3$ símbolos, no total, para a FAM, a FAV e a FDE, respectivamente.

Em termos da complexidade computacional no CF e nos RCs, na FAM a complexidade é maior no CF, dado que o CF terá que processar $2bMJN = 2.880$ bits no total. Neste caso o CF deverá receber todos os dados enviados pelos RCs, calcular a matriz de covariância e gerar $JM = 18$ autovalores, para a posterior formulação da estatística de teste e tomada de decisão. Vale ressaltar que, nesse caso, os RCs possuem pouca complexidade, ou seja, eles devem apenas coletar e enviar as amostras, sem nenhum processamento. Já na FAV a complexidade computacional nos RCs começa a aumentar. Agora, antes de enviar seus dados, cada RC deverá computar $J = 6$ autovalores, os quais serão enviados ao CF, que por sua vez fica mais simples, pois agora serão processados $bMJ = 72$

bits. Foi visto que a FDE é vantajosa em termos do volume de dados no canal de controle. No entanto, este é o caso em que a complexidade computacional nos RCs é a maior. Em outras palavras, na FDE cada RC deverá coletar $JN = 120$ amostras do sinal sob sensoriamento, calcular os $J = 6$ autovalores, gerar as estatísticas de teste e tomar uma decisão.

Diante destes resultados fica claro que o volume de dados no canal de controle e a complexidade computacional dos RCs e do CF pode variar consideravelmente em função da técnica de fusão adotada, o que resulta na necessidade de uma análise em função das limitações impostas pelos dispositivos e da viabilidade de implementação. Sob este ponto de vista, na FAM cada RC atua de fato como um sensor apenas coletando e enviando as amostras provenientes do UP. No caso da FAV e da FDE, cada RC, além de assumir o papel de sensor, terá de possuir funções adicionais para processamento das amostras e tomada de decisão.

Comparando o desempenho e o tráfego no canal de controle, conclui-se que no cenário de VNR nula, a FAM é uma boa candidata a ser utilizada, sendo pouco superior à FAMP e consideravelmente superior às demais. Com VNR moderada, a FAMP ainda possui desempenho melhor que a FDE OU e FAVP, mas com menor diferença em relação ao caso com VNR nula. Note que, embora a FAMP exija elevado volume de dados no canal de controle, seu uso pode ser vantajoso em função do melhor desempenho neste caso. Já para VNR alta as técnicas com melhor desempenho são a FDE OU, a FAMP e a FAVP, sendo que a FDE OU possui desempenho igual à FAMP e ambas são levemente superiores a FAVP. Assim, pode-se concluir que neste caso a escolha da técnica mais apropriada deve ocorrer em função do volume de dados no canal de controle. Uma classificação que leva em conta os parâmetros e situações aqui consideradas é: em 1º lugar a FDE OU, em 2º a FAVP e em 3º a FAMP.

Foram feitas outras simulações com outras configurações para a rede secundária, modificando, por exemplo, o número de RCs, M , e o número de antenas por rádio, J . Neste caso foi visto que à medida que o número de RCs diminui e o número de antenas por RC aumenta, o ganho de desempenho da FAVP fica ainda maior, podendo superar o desempenho da FAMP quando a RSR em cada CR não é muito baixa e a VNR é alta. Isto ocorre devido ao fato de que o número de autovalores calculados por cada CR na FAV e FAVP é igual a J . Assim, à medida que se aumenta o valor de J , aumenta-se também o número de autovalores, melhorando, portanto, a estatística de teste. Em outras palavras, aumentar o valor de J significa que cada RC irá coletar um número maior de amostras do sinal recebido para contribuir com a decisão final obtida no CF, o que também justifica a melhora de desempenho. O número de RCs foi diminuído, quando J foi aumentado, para manter o número total de amostras coletadas, bem como o mesmo número de autovalores calculados na estatística de teste da FAM e FAMP, que corresponde a JM . Se a RSR em cada RC for muito baixa a FAMP permanece superior às demais, mostrando maior robustez frente a situações em que o ambiente de sensoriamento é muito ruidoso. O mesmo acontece com a FDE OU, sendo que o desempenho permanece ligeiramente superior ao da FAVP. Quando M aumenta e J

diminui, a FAMP supera a FDE OU e a FAVP. Estes resultados não foram mostrados devido à necessidade da apresentação de muitos gráficos.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo comparou-se desempenho, volume de dados no canal de controle e complexidade nos RCs e no CF quando os RCs apresentam diferentes níveis de ruído. O esquema de sensoriamento espectral usado é cooperativo, centralizado, baseado em autovalores, com fusão de amostras, fusão de autovalores e fusão de decisões OU, E e voto majoritário (MAJ). Também foi proposto um esquema de ponderação para a fusão de amostras e fusão de autovalores, o que revelou ser de grande importância para os desempenhos do sensoriamento em situações de diferentes níveis de ruído nos RCs.

Foi observado que quando os RCs possuem a mesma potência de ruído, a técnica de fusão de amostras convencional é a melhor indicada para ser usada, embora não o seja em termos de uso do canal de controle. No ambiente com VNR moderada, a FAMP mostrou-se uma solução interessante, pois alcança excelente desempenho, embora não seja atrativa com relação ao uso do canal de controle. A FDE OU mostrou ser a melhor escolha quando a VNR é alta, visto que o uso do canal de controle é bastante reduzido e que o desempenho é o mesmo da FAMP. Conclui-se que é necessário estabelecer uma relação de compromisso em função dos desempenhos, do volume de dados e da complexidade computacional, que atenda os requisitos de viabilidade de implementação.

Em uma extensão deste trabalho poder-se-ia: i) variar J e M ii) incluir a latência na análise de desempenhos, volume de dados e complexidade computacional iii) considerar erros no canal de controle iv) incluir outros testes estatísticos além do GLRT e vi) variar a VNR em cada período de sensoriamento.

REFERÊNCIAS

- [1] M. A. McHenry, P. A. Tenhula, D. McCloskey, D. A. Roberson, and C. S. Hood, "Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal," in *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum*. ACM, 2006, p. 1.
- [2] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, and R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey," *Physical communication*, vol. 4, no. 1, pp. 40–62, 2011.
- [3] K. Kim, Y. Xin, and S. Rangarajan, "Energy detection based spectrum sensing for cognitive radio: An experimental study," in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, Dec. 2010, pp. 1–5.
- [4] B. Shent, L. Huang, C. Zhao, Z. Zhou, and K. Kwak, "Energy detection based spectrum sensing for cognitive radios in noise of uncertain power," in *Communications and Information Technologies, 2008. ISCIT 2008. International Symposium on*, Oct 2008, pp. 628–633.
- [5] B. Nadler, F. Penna, and R. Garello, "Performance of eigenvalue-based signal detectors with known and unknown noise level," in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, June 2011, pp. 1–5.
- [6] A. Singh, M. Bhatnagar, and R. Mallik, "Cooperative spectrum sensing in multiple antenna based cognitive radio network using an improved energy detector," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, Jan. 2012.
- [7] D. A. Guimarães, C. R. N. da Silva, and R. A. A. de Souza, "Cooperative spectrum sensing using eigenvalue fusion for OFDMA and other wide-band signals," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 1–24, 2013.
- [8] J. S. Neto and D. A. Guimarães, "Sensoriamento espectral cooperativo baseado em autovalores para rádios cognitivos," *Revista Telecomunicações*, vol. 14, Jun. 2012.