

# Análise de Desempenho do Sensoriamento Espectral por Detector de Energia no Canal $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$

Vanessa Mendes Rennó, Rauley A. A. de Souza e Michel Daoud Yacoub

**Resumo**—Este artigo investiga o desempenho da técnica de sensoriamento espectral pelo método de detecção de energia quando o canal de sensoriamento é modelado pela distribuição  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ . Os resultados revelam que o desempenho da técnica de sensoriamento espectral é drasticamente afetado pelos parâmetros de desvanecimento  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\kappa$  e  $\mu$ . Por outro lado, observa-se que tanto o desbalanceamento de *clusterização* quanto o de razão entre a potência da componente dominante e a potência do sinal espalhado de fase e quadratura pouco afeta o desempenho global. Todas as formulações foram verificadas por várias simulações de Monte Carlo admitindo um canal de comunicação com desvanecimento  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ .

**Palavras-Chave**—Sensoriamento espectral, detector de energia, modelo de desvanecimento  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ .

**Abstract**—This paper investigates the performance of the spectral sensing technique by the energy detection method when the sensing channel is modeled by the  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  distribution. The results show that the performance of the spectral sensing technique is drastically affected by fading parameters  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\kappa$  e  $\mu$ . On the other hand, it is noted that both the clustering and the ratio of the power of the dominant component to the power of the scattered and quadrature scattering signal affect little the overall performance. The formulations are validated via various Monte Carlo numerical performance evaluations assuming  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  fading communication channels.

**Keywords**—Spectrum sensing, energy detector,  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  fading model.

## I. INTRODUÇÃO

Com o aumento exponencial da demanda por serviços de comunicações móveis, o espectro eletromagnético de radiofrequências tende a se tornar cada vez mais congestionado. As agências reguladoras têm utilizado a política de alocação fixa de banda, em que o recurso é alocado por tipo de serviço e os usuários adquirem o direito de explorar determinada banda. Essa política de gerenciamento resulta na subutilização do recurso, visto que o detentor do direito de utilizar determinada banda pode não o fazer em todo o tempo e em toda a área em que o serviço é oferecido. Como consequência, tem-se um cenário contraditório em que o recurso é ao mesmo tempo escasso e subutilizado, gerando um grande desafio para as futuras tecnologias de comunicações móveis, por exemplo a 5G. Nesse contexto, surge o conceito de rádio cognitivo

(RC) [1] que propõe, entre outras funcionalidades, o uso oportunista do espectro. Para realizar essa tarefa, o RC realiza o sensoriamento espectral [1], que consiste em coletar amostras de um sinal em uma determinada largura de faixa para inferir sobre sua disponibilidade. Caso a banda em questão esteja sendo ocupada pelo detentor do direito de uso, chamado de usuário primário (UP), o RC deve procurar outra banda disponível ou limitar sua potência de transmissão a um nível de interferência aceitável pelo UP. Caso a banda analisada esteja ociosa, o RC a utiliza de forma oportunista.

Um dos elementos em um sistema de transmissão sem fio que naturalmente afeta o desempenho do sensoriamento espectral é o canal de comunicação. No que diz respeito à análise do desvanecimento de curto prazo, o modelo complexo baseado em parâmetros físicos denominado  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  [2] leva em consideração todos os fenômenos importantes de pequena escala atualmente conhecidos. Especificamente, o modelo leva em conta os fenômenos de não linearidade do meio de transmissão, a potência das ondas espalhadas, a potência das componentes de onda dominante, e os chamados chamados *clusters* de multipercurso. De forma a imprimir algum grau de correlação entre fase e quadratura, desbalanceamentos diversos entre esses dois componentes são inseridos [2]. Alguns estudos teóricos ou de cunho prático já têm sido publicados na literatura com foco no modelo  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  [3]–[5]. Também, algoritmos já têm sido propostos para a geração de amostras decorrelacionadas  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  [5].

Este artigo investiga o desempenho do sensoriamento espectral por meio da técnica de detecção de energia para o canal de sensoriamento descrito pela envoltória do modelo  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ . Admite-se sincronismo de fase. Portanto, a análise constitui-se um limitante superior de desempenho do detector de energia para o canal  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ .

O restante do artigo está assim organizado: na Seção II é feita uma breve revisão do modelo de desvanecimento  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ . A Seção III descreve o modelo do sistema adotado para sensoriamento espectral assim como a métrica de desempenho adotada. Os resultados numéricos e suas interpretações são detalhados na Seção IV. Por fim, a Seção V apresenta as conclusões deste trabalho.

## II. O MODELO DE DESVANECIMENTO $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$

Nesta seção, é feita uma breve revisão do modelo de desvanecimento  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  e de suas principais estatísticas devido ao fato de esta ser uma proposta razoavelmente nova na literatura. O modelo de desvanecimento  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  baseado na envoltória do sinal inicialmente proposto em [2] abrange todos os mais

Vanessa M. Rennó e Rauley Adriano Amaral de Souza, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí - MG - Brasil (Tel:+55 (35) 3471 9227, e-mail: vanessamendes@get.inatel.br, rausley@inatel.br). Michel Daoud Yacoub, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas - SP - Brasil, e-mail: michel@decom.fee.unicamp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fapemig, CNPq contratos Nos. 308365/2017-8 e 304248/2014-2, e pela Finep, com recursos do Funttel, contrato No 01.14.0231.00, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil.

importantes fenômenos de propagação reportados na literatura, tais como a não linearidade do canal de comunicação sem fio, a potência das ondas espalhadas, a potência das ondas dominantes e os chamados *clusters* de multipercursos.

A envoltória  $R$  do modelo  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  é definida como [2]

$$R^\alpha = \sum_{i=1}^{\mu_x} (X_i + \lambda_{x_i})^2 + \sum_{i=1}^{\mu_y} (Y_i + \lambda_{y_i})^2 \quad (1)$$

em que (i)  $\alpha > 0$  denota a não linearidade do meio de transmissão; (ii)  $X_i$  e  $Y_i$  são processos Gaussianos mutuamente independentes; (iii)  $\mathbb{E}(X_i) = \mathbb{E}(Y_i) = 0$ , sendo  $\mathbb{E}(\cdot)$  o operador esperança matemática; (iv)  $\mathbb{E}(X_i^2) = \sigma_x^2$  e  $\mathbb{E}(Y_i^2) = \sigma_y^2$ ; (v)  $\lambda_{x_i}$  e  $\lambda_{y_i}$  são, respectivamente, o valor médio das componentes em fase e em quadratura do  $i$ -ésimo *cluster* de multipercursos; (vi)  $\mu_x$  e  $\mu_y$  representam o número de *clusters* de multipercursos das componentes em fase e em quadratura, respectivamente. Seja a definição dos seguintes parâmetros (i)  $\lambda_x^2 = \sum_{i=1}^{\mu_x} \lambda_{x_i}^2$ ; (ii)  $\lambda_y^2 = \sum_{i=1}^{\mu_y} \lambda_{y_i}^2$ ; (iii)  $X = \sum_{i=1}^{\mu_x} (X_i + \lambda_{x_i})^2$ ; e  $Y = \sum_{i=1}^{\mu_y} (Y_i + \lambda_{y_i})^2$ . Logo  $R^\alpha = X + Y$ . A função densidade de probabilidade (fdp) da envoltória  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  pode ser obtida de forma exata a partir de uma integral simples dada por

$$f_R(r) = \alpha r^{\alpha-1} \int_0^{r^\alpha} f_X(r^\alpha - y) f_Y(y) dy. \quad (2)$$

As fdp's  $f_X(x)$  e  $f_Y(y)$  são dadas por [2]

$$f_W(w) = \frac{w^{\frac{\mu_w}{4} - \frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{w + \lambda_w^2}{2\sigma_w^2}\right) I_{\frac{\mu_w}{2} - 1}\left(\frac{\lambda_w \sqrt{w}}{\sigma_w^2}\right)}{2\sigma_w^2 \lambda_w^{\frac{\mu_w}{2} - 1}}, \quad (3)$$

em que  $W$  representa  $X$ , a componente em fase, ou  $Y$ , a componente em quadratura, descritas em termos dos seus respectivos parâmetros, ou seja  $(\mu_x, \sigma_x, \lambda_x)$  para a variável em fase  $X$  e  $(\mu_y, \sigma_y, \lambda_y)$  para a variável em quadratura  $Y$ . ( $I_\nu(\cdot)$  é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem  $\nu$  [6].) Note que (3) assume a forma de uma fdp não parametrizada  $\kappa$ - $\mu$  na potência com parâmetros  $\kappa_w = \lambda_w^2/(\mu_w \sigma_w^2)$  e  $\mu_w/2$  com os devidos subscritos para denotar as componentes em fase e em quadratura. Esta é a chamada *Raw Parametrization* [2] cujos parâmetros, descritos individualmente pelas componentes (*clusters*) em fase  $X$  e em quadratura  $Y$ , são os seguintes: (i) potências das ondas espalhadas dos *clusters* de multipercursos individuais ( $\sigma_x^2$  e  $\sigma_y^2$ ); (ii) potências das componentes dominantes de todos os *clusters* em fase e em quadratura ( $\lambda_x^2$  e  $\lambda_y^2$ ); e (iii) número de *clusters* de multipercursos ( $\mu_x$  e  $\mu_y$ ). Note que, embora a derivação inicial considere apenas valores inteiros para  $\mu_x$  e  $\mu_y$ , conforme observado em (1), não há nenhuma restrição matemática para esses parâmetros admitirem qualquer valor positivo.

É também importante reescrever (3) em termos de parâmetros físicos comumente encontrados na literatura. Os seguintes parâmetros são então utilizados: (i)  $\kappa_w > 0$ , definido como a razão entre a potência total das componentes dominantes e a potência das ondas espalhadas, i.e.  $\kappa_w = \lambda_w^2/(\mu_w \sigma_w^2)$ ; (ii)  $\hat{r}_w^2 > 0$ , definido como o valor esperado  $\mathbb{E}(W)$ , que é a soma da potência dos *clusters* de multipercursos e a potência das componentes dominantes, i.e.  $\hat{r}_w^2 = \mu_w \sigma_w^2 + \lambda_w^2$ .

Resolvendo essas equações para  $\lambda_w$  e  $\sigma_w$ , obtém-se  $\lambda_w = \hat{r}_w \sqrt{\kappa_w/(1 + \kappa_w)}$  e  $\sigma_w = \hat{r}_w/(\sqrt{\mu_w(1 + \kappa_w)})$ . Realizando as devidas substituições, a correspondente fdp na potência de (3) pode ser reescrita como

$$f_W(w) = \frac{\mu_w(1 + \kappa_w)^{\frac{\mu_w + 2}{4}} w^{\frac{\mu_w - 2}{4}} I_{\frac{\mu_w}{2} - 1}\left(\frac{\mu_w \sqrt{\kappa_w(1 + \kappa_w)w}}{\hat{r}_w}\right)}{2\kappa_w^{\frac{\mu_w - 1}{2}} \hat{r}_w^{\frac{\mu_w}{2} + 1} \exp\left(\frac{\kappa_w \mu_w}{2}\right) \exp\left(\frac{\mu_w(1 + \kappa_w)w}{2\hat{r}_w^2}\right)}. \quad (4)$$

Esta é a chamada *Local Parametrization* [2]. Agora, nota-se claramente que (4) assume a forma de uma fdp  $\kappa$ - $\mu$  na potência com parâmetros  $\kappa_w$ ,  $\mu_w/2$  e  $\hat{r}_w$ , com os devidos subscritos.

Adicionalmente, a fdp da envoltória pode ser parametrizada na chamada *Global Parametrization* [2]. Sejam os seguintes parâmetros a serem utilizados: (i)  $\hat{r}^\alpha > 0$ , definido como o valor esperado  $\mathbb{E}(R^\alpha)$ , i.e.  $\hat{r}^\alpha = \mu_x \sigma_x^2 + \lambda_x^2 + \mu_y \sigma_y^2 + \lambda_y^2$ ; (ii)  $\kappa > 0$ , definido como a razão entre a potência total das componentes dominantes e a potência total das ondas espalhadas, i.e.  $\kappa = (\lambda_x^2 + \lambda_y^2)/(\mu_x \sigma_x^2 + \mu_y \sigma_y^2)$ ; (iii)  $\eta > 0$ , definido como a razão entre a potência total do *cluster* de multipercursos em fase e a potência total do *cluster* de multipercursos em quadratura, i.e.  $\eta = \mu_x \sigma_x^2/(\mu_y \sigma_y^2)$ ; (iv)  $q > 0$ , definido como a razão entre duas razões: a primeira, a razão entre as potências das componentes dominantes, e a segunda, a razão entre as potências das ondas espalhadas, ambas referentes às componentes em fase e em quadratura, i.e.  $q = \lambda_x^2 \mu_y \sigma_y^2/(\lambda_y^2 \mu_x \sigma_x^2)$ ; (v)  $p > 0$ , definido como a razão entre o número de *clusters* de multipercursos das componentes em fase e em quadratura, i.e.  $p = \mu_x/\mu_y$ ; (vi)  $\mu > 0$ , definido como o número total de *clusters* de multipercursos, i.e.  $\mu_x + \mu_y = 2\mu$ . Resolvendo estas equações para  $\hat{r}$ ,  $\eta$ ,  $\kappa$ ,  $\mu$ ,  $q$ , e  $p$ , obtém-se,  $\mu_x = 2p\mu/(1 + p)$ ,  $\mu_y = 2\mu/(1 + p)$ ,  $\lambda_x = \sqrt{\eta \kappa \hat{r}^\alpha/((\kappa + 1)(\eta q + 1))}$ ,  $\lambda_y = \sqrt{\kappa \hat{r}^\alpha/((\kappa + 1)(\eta q + 1))}$ ,  $\sigma_x = \sqrt{\eta(p + 1)\hat{r}^\alpha/(2(\eta + 1)(\kappa + 1)\mu p)}$ , e  $\sigma_y = \sqrt{(p + 1)\hat{r}^\alpha/(2(\eta + 1)(\kappa + 1)\mu)}$ . Semelhantemente,  $\kappa = (\kappa_x \mu_x \sigma_x^2 + \kappa_y \mu_y \sigma_y^2)/(\mu_x \sigma_x^2 + \mu_y \sigma_y^2)$ ;  $\eta = (1 + \kappa_y) \hat{r}_x^2/((1 + \kappa_x) \hat{r}_y^2)$ ;  $q = \kappa_x/\kappa_y$ ;  $\hat{r}^\alpha = \hat{r}_x^2 + \hat{r}_y^2$ . Equivalentemente,  $\hat{r}_x = \sqrt{\eta(1 + q)(\eta + \kappa + \eta \kappa)} \hat{r}^\alpha/((1 + \eta)(1 + \kappa)(1 + q\eta))$ ;  $\hat{r}_y = \sqrt{(1 + \kappa + \eta(q + \kappa))} \hat{r}^\alpha/((1 + \eta)(1 + \kappa)(1 + q\eta))$ ;  $\kappa_x = (1 + \eta)q\kappa/(1 + q\eta)$ ;  $\kappa_y = (1 + \eta)\kappa/(1 + q\eta)$ . Os parâmetros  $\mu_x$  e  $\mu_y$  são aqueles anteriormente obtidos.

Em [2], são apresentadas outras formas da fdp  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  baseada na envoltória, diferentes de (2). Por exemplo, a equação (8) de [2] é a fdp conjunta envoltória-fase do modelo complexo na *Global Parametrization*, bastando-se apenas integrar em relação à fase para se obter a fdp da envoltória. A equação (28) de [2] descreve a fdp da envoltória  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ , também na *Global Parametrization*, porém agora em sua representação em série de potência. O leitor poderá encontrar em [2] expressões das fdp's em outras formas para todas os tipos de parametrização.

Um grande número de distribuições largamente utilizadas na literatura pode ser derivado como casos particulares do modelo baseado na envoltória  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ . Entre esses, citam-se as distribuições com três parâmetros de desvanecimento ( $\alpha$ - $\kappa$ - $\mu$  e  $\alpha$ - $\eta$ - $\mu$ ), aquelas com dois parâmetros ( $\alpha$ - $\mu$ ,  $\eta$ - $\mu$ ,  $\kappa$ - $\mu$  e Beckmann ( $\eta$ - $\kappa$ )), aquelas com parâmetro único tais como Nakagami- $m$ , Weibull, Hoyt, e Rice, e, finalmente, aqueles modelos que não possuem parâmetro específico descritivo

do desvanecimento, tais como Rayleigh, semi-Gaussiana, e exponencial negativa. Um maior detalhamento dos casos particulares e suas relações podem ser encontradas em [2, Seção VI].

### III. DETECTOR DE ENERGIA E MÉTRICA DE DESEMPENHO

O modelo discreto no tempo para o teste de hipóteses associado ao sensoriamento espectral pode ser escrito como:

$$y(n) = \begin{cases} w(n) & \text{sob hipótese } \mathcal{H}_0 \\ rx(n) + w(n) & \text{sob hipótese } \mathcal{H}_1. \end{cases} \quad (5)$$

Em (5),  $\mathcal{H}_0$  denota a hipótese do canal estar livre e  $\mathcal{H}_1$  denota a condição de canal ocupado,  $y(n)$  é a  $n$ -ésima amostra,  $n = 1, \dots, N$ , do sinal recebido coletado pelo RC durante o intervalo de sensoriamento,  $x(n)$  é uma amostra do sinal transmitido pelo UP, e  $r$  representa a envoltória do canal com desvanecimento, admitido aqui ser plano (*flat fading*) e lento (estático) durante o intervalo de sensoriamento. A variável  $w(n)$  indica uma amostra do ruído térmico Gaussiano de média nula e variância  $\sigma^2 = N_0B$ , medida em uma banda  $B$  com densidade espectral de potência unilateral  $N_0$ , gerada na entrada do receptor do RC. Admite-se a correta estimação da potência do ruído pelo RC.

É importante ressaltar neste ponto que o sinal do UP a ser detectado  $x(n)$  faz parte da conhecida classe de ‘sinais determinísticos desconhecidos’ (*unknown deterministic signals*), inicialmente analisada no contexto de sensoriamento espectral em um canal sem desvanecimento em [7] e largamente utilizada em trabalhos posteriores para a análise de desempenho em canais com desvanecimento [8], [9]. Neste modelo, a energia do sinal do UP a ser detectado deve ser determinística, embora desconhecida. Como exemplo, faz parte desta classe os sinais em banda-passante modulados por chaveamento na fase (*phase shift keying*, PSK). Todos os símbolos desta constelação possuem a mesma energia, não existindo qualquer informação na amplitude do sinal. Obviamente outros tipos de sinais poderiam ser adotados neste trabalho, bastando apenas utilizar as corretas expressões de probabilidade de detecção já que apenas esta métrica é influenciada pelo sinal do UP.

A partir do sinal recebido, a estatística de teste para um detector de energia pode ser calculada pela seguinte expressão

$$T = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^N y(n)^2. \quad (6)$$

O número de amostras  $N$  relaciona-se com o intervalo de sensoriamento  $\tau$  e a banda  $B$  via o parâmetro produto banda-tempo  $u = \tau B$ , resultando em  $N = 2\tau B$  [8].

A relação sinal-ruído (RSR) média segue a definição encontrada em [9], ou seja  $\bar{\gamma} = \mathbb{E}[R^2]E_x/N_0$ , sendo a energia média do sinal do UP durante o intervalo de sensoriamento dado por  $E_x = \sum_{n=1}^N x(n)^2/(2B)$  e  $\mathbb{E}[R^2]$  é o segundo momento da envoltória do desvanecimento no modelo  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ . Admitindo  $\mathbb{E}[R^2] = 1$  e usando  $N_0 = \sigma^2/B$ , a RSR média pode ser simplificada para  $\bar{\gamma} = \sum_{n=1}^N x(n)^2/(2\sigma^2)$ . Se o sinal do UP tem potência  $P_x = E_x/T = \sum_{n=1}^N x(n)^2/N$ , a variância (potência) do ruído térmico pode ser determinada a partir da RSR média aplicando a relação  $\sigma^2 = NP_x/(2\bar{\gamma})$ .

O desempenho do sensoriamento é comumente medido por meio da probabilidade de detecção,  $P_d = \Pr\{T > \lambda | \mathcal{H}_1\}$  e falso alarme,  $P_{fa} = \Pr\{T > \lambda | \mathcal{H}_0\}$ , em que  $\Pr\{\cdot\}$  é a probabilidade de ocorrência de um evento qualquer,  $T$  é a estatística de teste do detector de energia em (6) e  $\lambda$  é o limiar de decisão. Essas métricas de desempenho são fundamentais, já que a primeira avalia a probabilidade da correta detecção de um sinal desconhecido, estando este de fato presente na banda sensoriada, e a segunda corresponde à probabilidade de o detector decidir em favor presença do UP, não estando este na banda sensoriada. Elas são usadas para a construção da curva característica de operação do receptor (*receiver operating characteristic*, ROC), dada pela  $P_d$  versus  $P_{fa}$ . Entretanto, neste trabalho é utilizada uma única figura de mérito, calculada a partir da ROC, que pode fornecer um melhor entendimento sobre a capacidade de detecção global do sensoriamento espectral. Esta medida é a área sob a ROC (*area under ROC curve*, AUC), uma métrica alternativa que não leva em conta valores específicos de  $P_d$  e  $P_{fa}$  mas sim a área abaixo da ROC, i.e.

$$A(\gamma) = \int_0^1 P_d(\gamma, \lambda) dP_{fa}(\lambda) \quad (7)$$

em que  $\gamma$  é a RSR instantânea. A AUC média é determinada tomando-se a média de  $A(\gamma)$  sobre a fdp do sinal sob desvanecimento na potência, ou seja

$$\overline{\text{AUC}} = \int_0^\infty A(\gamma) f_\Gamma(\gamma) d\gamma. \quad (8)$$

A fdp do sinal sob desvanecimento na potência  $f_\Gamma(\gamma)$  pode ser escrita em diversos formatos. Um dos possíveis formatos é obtido a partir de (2) aplicando-se a transformação de variáveis  $\Gamma = \bar{\gamma}R^2$ , resultando em

$$f_\Gamma(\gamma) = \frac{\alpha\gamma^{\frac{\alpha-2}{2}}}{2\bar{\gamma}^\alpha} \int_0^{\left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^{\frac{\alpha}{2}}} f_X\left(\left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^{\frac{\alpha}{2}} - y\right) f_Y(y) dy. \quad (9)$$

De forma geral, à média que o limiar de decisão  $\lambda$  varia de  $\infty$  a 0,  $P_{fa}$  e  $P_d$  variam de 0 a 1. A AUC varia de 0.5 a 1. Obviamente, outras métricas de desempenho poderiam ser adotadas tais como a taxa de erro total (*total error rate*) [10] ou o ganho do sensoriamento (*sensing gain*) [11]. Diversos autores já avaliaram o desempenho, numérica ou analiticamente, do sensoriamento espectral da técnica de detecção de energia em termos da AUC sob diversos tipos de canais [1], [12]–[15].

### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados de simulação do desempenho global do sensoriamento espectral de vários cenários são mostrados nesta seção para que se verifique a influência dos principais parâmetros que caracterizam o desvanecimento no modelo  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  além da influência da RSR. O canal de sensoriamento é considerado lento e, portanto, é constante em um dado intervalo de sensoriamento, variando apenas entre um período e outro. O número de amostras coletadas em um dado intervalo de sensoriamento é  $N = 20$ . Dada a definição de RSR adotada neste artigo, ressalta-se que o aumento de  $N$  simplesmente resultará em uma degradação do desempenho global em termos de AUC

conforme já reportado em [13]. Foram geradas  $10^5$  realizações por simulação de Monte Carlo do sensoriamento espectral para a estimação de cada valor de  $P_d$  e  $P_{fa}$  para a construção das ROCs, e ainda 100 AUCs instantâneas para o cálculo de  $\overline{AUC}$ . 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.

Na Fig. 1, são mostradas curvas de AUCs médias em função dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\kappa$ ,  $\mu$ ,  $p$  e  $q$  para diferentes valores de RSR. As linhas (contínua e tracejada) representam os resultados teóricos de [1, Eqn. (27) resolvida numericamente] e os símbolos, os resultados simulados. Para efeito de comparação, também são traçadas curvas de alguns modelos convencionais:  $\alpha$ - $\mu$  [1, Eqn. (48)],  $\eta$ - $\mu$  Formato 1 [1, Eqn. (41)],  $\eta$ - $\kappa$  [1, Eqn. (27)] e  $\kappa$ - $\mu$  [1, Eqn. (29)]. Primeiramente, note que os resultados de simulação a partir da geração de amostras descrita em [5] estão de acordo com os resultados teóricos previstos em [1].

De uma maneira geral, quanto maiores os valores de  $\alpha$  (Fig. 1(a)),  $\kappa$  (Fig. 1(c)) e  $\mu$  (Fig. 1(d)) mais determinísticos os canais se tornam, resultando em uma melhoria no desempenho do sensoriamento, i.e. um aumento da  $\overline{AUC}$ . Esta melhoria de desempenho estará limitada ao caso da avaliação de um sistema sob efeito apenas de ruído térmico. Observando a Fig. 1(b), o desempenho ótimo é atingido em torno de  $\eta = 1$ , e valores mínimos de  $\overline{AUC}$  quando  $\eta \rightarrow 0$  e  $\eta \rightarrow \infty$ . O desempenho global do sensoriamento espectral é mais sensível às variações do parâmetro  $\alpha$ , seguido pelos parâmetros  $\mu$ ,  $\kappa$  e  $\eta$ . Os parâmetros de desbalanceamento  $p$  e  $q$  (Figs. 1(e) e (f)) não alteram a AUC de forma significativa.

Verifica-se de forma clara que a inclusão de parâmetros adicionais do modelo  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  impacta o desempenho do sistema de forma decisiva. Mais especificamente, a inclusão dos parâmetros  $\kappa$  e  $\eta$  no modelo  $\alpha$ - $\mu$ ;  $\alpha$  e  $\kappa$  no modelo  $\eta$ - $\mu$ ;  $\alpha$  e  $\mu$  no modelo  $\eta$ - $\kappa$ ; e  $\alpha$  e  $\eta$  no modelo  $\kappa$ - $\mu$ . Em todos esses casos, a diferença de desempenho entre o modelo  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  e o convencional é maior para maiores valores de RSR. De forma análoga, esta diferença de desempenho é mais acentuada para menores valores de  $\alpha$ ,  $\kappa$  e  $\mu$ , tendendo-se a se anular para altos valores de  $\alpha$ ,  $\kappa$  e  $\mu$  já que neste cenário os dois modelos tendem a se tornar determinísticos. Na comparação dos modelos  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  e  $\eta$ - $\mu$  (Fig. 1(b)), os desempenhos quando  $\eta \rightarrow \infty$  são os mesmos quando  $\eta \rightarrow 0$ , consequência da simetria em torno de  $\eta = 1$  [16].

Nas Figs. 1(e) e (f) são representadas curvas para  $\eta = 0.5$  e  $\eta = 2$ . Note a simetria das curvas de desempenho em torno de  $q = 1$  e  $p = 1$ . De maneira geral, para um conjunto de parâmetros  $(\alpha, \eta, \kappa, \mu, p, q)$  tem-se o mesmo desempenho para  $(\alpha, 1/\eta, \kappa, \mu, p, 1/q)$  ou  $(\alpha, 1/\eta, \kappa, \mu, 1/p, q)$ .

## V. CONCLUSÕES

Este artigo contribuiu com o avanço no conhecimento da recentemente proposta distribuição  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ . Objetivou-se mostrar a flexibilidade desta distribuição por meio da análise de desempenho da técnica de sensoriamento espectral por detecção de energia quando o canal de sensoriamento é

modelado pela distribuição  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ . Nesta primeira análise, portanto nos diversos cenários aqui investigados, demonstrou-se o significativo impacto dos parâmetros de desvanecimento  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\kappa$  e  $\mu$ . Por outro lado, observou-se que tanto o desbalanceamento de *clusterização* quanto o de razão entre a potência da componente dominante e a potência do sinal espalhado de fase e quadratura possuem um menor impacto no desempenho global. Adotou-se o modelo de sistema, e consequentemente o modelo de sinal transmitido, utilizado em [7]–[9]. No entanto, baseado nas informações disponíveis sobre o sinal transmitido  $x(n)$ , o receptor pode adotar outros modelos apropriados que serão úteis na análise da distribuição da estatística de teste, como a descrita em (6), sob hipótese  $\mathcal{H}_1$ . Assim, como uma possível extensão deste trabalho, objetivando-se uma abordagem mais ampla, propõe-se analisar outros modelos disponíveis na literatura, tais como os descritos em [17, Section 2.3.1], a fim de fornecer maiores informações e complementar as conclusões aqui apresentadas.

## REFERÊNCIAS

- [1] P. C. Sofotasios, A. Bagheri, T. A. Tsiftsis, S. Freear, A. Shahzadi, and M. Valkama, "A comprehensive framework for spectrum sensing in non-linear and generalized fading conditions," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 10, pp. 8615–8631, Oct. 2017.
- [2] M. D. Yacoub, "The  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  fading model," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 8, pp. 3597–3610, Aug. 2016.
- [3] X. Li, X. Chen, J. Zhang, Y. Liang, and Y. Liu, "Capacity analysis of  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 6, pp. 1449–1452, Jun. 2017.
- [4] A. A. dos Anjos, T. R. R. Marins, R. A. A. de Souza, and M. D. Yacoub, "Higher order statistics for the  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  fading model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, Mar. 2018.
- [5] V. M. Rennó, R. A. A. de Souza, and M. D. Yacoub, "On the generation of  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  samples with applications," in *IEEE 28th Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Oct. 2017, pp. 1–5.
- [6] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, *Tables of Integrals, Series, and Products*. New York: Academic Press, 1980.
- [7] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523–531, Apr. 1967.
- [8] F. F. Digham, M. S. Alouini, and M. K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 1, pp. 21–24, Jan. 2007.
- [9] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Opportunistic spectrum access in fading channels through collaborative sensing," *Journal of Commun.*, vol. 2, no. 2, pp. 71–82, Mar. 2007.
- [10] A. A. Hammadi, O. Alhussien, P. C. Sofotasios, S. Muhaidat, M. Al-Qutayri, S. Al-Araji, G. K. Karagiannidis, and J. Liang, "Unified analysis of cooperative spectrum sensing over composite and generalized fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 9, pp. 6949–6961, Sep. 2016.
- [11] Q. Wang and D. W. Yue, "A general parameterization quantifying performance in energy detection," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 699–702, 2009.
- [12] F. von Glehn and U. S. Dias, "On the AUC analysis in cognitive radio networks over  $\kappa$ - $\mu$  fading channel with noise uncertainty," in *2014 Int. Telecom. Symp. (ITS)*, Aug. 2014, pp. 1–5.
- [13] S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang, "Analysis of area under the ROC curve of energy detection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 3, pp. 1216–1225, Mar. 2010.
- [14] A. Bagheri, P. C. Sofotasios, T. A. Tsiftsis, A. Shahzadi, S. Freear, and M. Valkama, "Area under ROC curve of energy detection over generalized fading channels," in *IEEE 26th Annu. Int. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, Aug. 2015, pp. 656–661.
- [15] S. Kumar, "Performance of ED based spectrum sensing over  $\alpha$ - $\eta$ - $\mu$  fading channel," *Wireless Personal Communications*, Apr. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5677-6>
- [16] M. D. Yacoub, "The  $\kappa$ - $\mu$  distribution and the  $\eta$ - $\mu$  distribution," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 1, pp. 68–81, Feb. 2007.
- [17] S. Atapattu, C. Tellambura, and H. Jiang, *Energy detection for spectrum sensing in cognitive radio*. Springer, 2014.

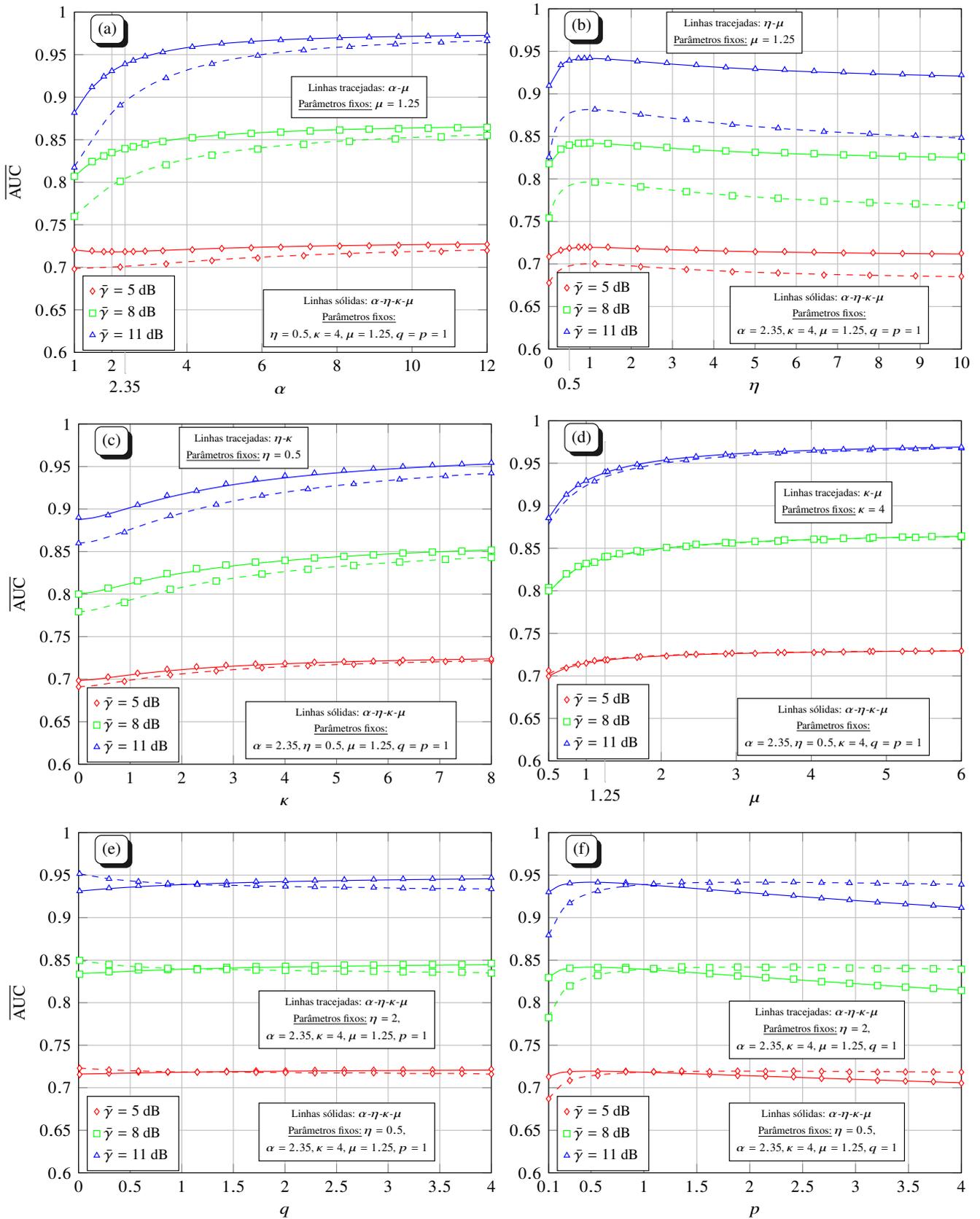


Fig. 1: AUCs do detector de energia em canais com desvanecimento  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  em função de diversos parâmetros de desvanecimento sob diferentes valores de RSR média.