

Sistemas de Antenas Fluidas sob Desvanecimento Weibull e Diferentes Modelos de Correlação

Pedro D. Alvim, Paulo R. Moura, Hugerles S. Silva, Ugo S. Dias e Waslon T. A. Lopes

Resumo—O desempenho de sistemas de antenas fluidas (FAS's) é investigado neste artigo por meio da probabilidade de indisponibilidade (OP), considerando diferentes modelos de correlação entre as portas do FAS e o canal de comunicação sujeito ao desvanecimento Weibull. Para tal, expressões inéditas para a função densidade de probabilidade e função de distribuição cumulativa de N variáveis aleatórias Weibull correlacionadas são derivadas. Curvas de OP são traçadas em função do número de portas sob diferentes valores de parâmetros que caracterizam o sistema e o canal. Como referência, o desvanecimento Rayleigh também é analisado.

Palavras-Chave—Desvanecimento Weibull, probabilidade de indisponibilidade, sistemas de antenas fluidas.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de antenas fluidas (FAS's) constituem um relevante e emergente tópico a ser considerado nas atuais e futuras gerações (6G) de comunicações sem fio, dada a flexibilidade que estes sistemas possuem em sua forma e posição. Além disso, mesmo com antenas localizadas muito próximas umas das outras em um pequeno espaço disponível no terminal móvel, é suposto que FAS possa fornecer ganhos de diversidade que só seriam alcançados por sistemas com múltiplas antenas (MIMO). Na literatura, FAS tem ganhado atenção dos pesquisadores e muitos trabalhos tem surgido recentemente [1]–[4].

Neste contexto, Wong *et al.* [1] idealizaram um sistema no qual uma única antena pode mudar de posição instantaneamente num espaço linear e denominou-o de FAS [1, Fig. 2]. No mencionado trabalho, a antena receptora é isotrópica e a sua localização pode ser chaveada entre uma das N possíveis localizações pré-definidas, também chamadas de portas. Em [2], os limites de desempenho do FAS foram estudados. Um trabalho sobre FAS considerando o canal sujeito a desvanecimento Nakagami- m é apresentado em [3]. Em [1]–[3], o mesmo modelo de correlação entre as portas é considerado, que tem a desvantagem de requerer uma porta de referência. Mais recentemente, de modo a solucionar este problema, um modelo mais realístico para a correlação foi apresentado em [4].

Neste trabalho, um estudo sobre FAS considerando o canal sujeito ao desvanecimento Weibull é apresentado. Tem-se como objetivos analisar como a não-linearidade do canal e o coeficiente de correlação entre as portas afetam o desempenho

P. D. Alvim, P. R. Moura, H. S. Silva e U. S. Dias são do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade de Brasília, Brasília/DF, e-mails: pedro.alvim@redes.unb.br, moura.paulo@aluno.unb.br, hugerles.silva@unb.br e udias@unb.br. W. T. A. Lopes é da Universidade da Paraíba (UFPB), João Pessoa/PB, e-mail: waslon@ieee.org.

do FAS. Para tal, expressões em termos de uma integral simples para a probabilidade de indisponibilidade (OP) são deduzidas. Dado que a distribuição Weibull incorpora o modelo Rayleigh, alguns resultados apresentados em [1] podem ser facilmente obtidos a partir dos resultados deste artigo. Até onde vai o conhecimento dos autores, as expressões aqui apresentadas são inéditas.

II. MODELO DO SISTEMA E DO CANAL

A. Modelo do Sistema

Neste trabalho, considerou-se o mesmo modelo de sistema apresentado em [1, Fig. 2] para o FAS, no qual uma antena fluida linear de comprimento $W\lambda$ (em que W é o comprimento normalizado da antena e λ é o comprimento de onda da portadora) é instalada em um receptor que pode chavear entre N possíveis localizações (ou portas).

No estudo seminal descrito em [1], o sinal recebido pela k -ésima porta é modelado como $y_k = g_k x + \eta_k$, em que g_k é o coeficiente de desvanecimento complexo do canal, observado pela k -ésima porta; x é o símbolo transmitido; e η_k é o ruído aditivo gaussiano branco (AWGN) na k -ésima porta com média zero e variância σ_η^2 .

B. Modelo do Desvanecimento

Em nossa análise, a envoltória $|g_k|$ é caracterizada pela distribuição Weibull, cuja função densidade de probabilidade (PDF) normalizada é dada por [5, Eq. (3)]

$$f_{P_k}(\rho_k) = \alpha_k \rho_k^{\alpha_k - 1} \exp(-\rho_k^{\alpha_k}), \quad \rho_k > 0, \quad (1)$$

em que $P_k \triangleq |g_k|/\hat{r}$ é a amplitude normalizada do coeficiente de desvanecimento complexo do canal, α_k denota a não-linearidade do canal e $\hat{r} = \sqrt{\alpha_k E(|g_k|^{\alpha_k})}$ é a α_k -ésima raiz do valor médio de $|g_k|^{\alpha_k}$, com $E(\cdot)$ denotando o operador esperança.

C. Modelo de Correlação entre as Portas

Neste artigo, os modelos matemáticos para a correlação entre portas (δ_k) apresentados em [1] e [4] são considerados. Em [1], a primeira porta é denominada como sendo a de referência e as outras $N-1$ portas estão correlacionadas com a primeira. O mencionado parâmetro de correlação de potência entre a porta 1 e as demais portas é dado por

$$\delta_k = J_0^2\left(\frac{2\pi(k-1)W}{N-1}\right), \quad k = 2, \dots, N, \quad (2)$$

no qual $J_0(\cdot)$ é a função de Bessel de ordem zero [6].

Em [4], propôs-se recentemente um novo modelo para o parâmetro δ_k . Define-se então um coeficiente comum entre todas as portas, denotado por δ , no qual não há a necessidade de uma porta de referência (*i.e.*, qualquer porta é uma referência para outra porta). Matematicamente, tem-se [4, Eq. (5)]

$$\delta = \delta_k = 2 \left[{}_1F_2 \left(\frac{1}{2}; 1, \frac{3}{2}; -\pi^2 W^2 \right) - \frac{J_1(2\pi W)}{2\pi W} \right] \quad (3)$$

com ${}_aF_b(\cdot; \cdot; \cdot)$ e $J_1(\cdot)$ sendo, respectivamente, as funções hipergeométrica generalizada e a de Bessel de ordem 1 [6].

III. ESTATÍSTICAS DE PRIMEIRA ORDEM DA ENVOLTÓRIA

Proposição 1: Seja $P_k \in \mathbb{R}^+$, com $k = 1, 2, \dots, N$ e $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_k]$. A PDF e a função de distribuição cumulativa (CDF) conjuntas de N variáveis Weibull correlacionadas considerando FAS são dadas, respectivamente, por

$$f_{\mathbf{P}}(\rho_1, \dots, \rho_N) = \alpha_1 \rho_1^{\alpha_1 - 1} e^{-\rho_1^{\alpha_1}} \times \prod_{k=2}^N \frac{\alpha_k \rho_k^{\alpha_k - 1} I_0 \left(\frac{2\delta_k \sqrt{\rho_1^{\alpha_1} \rho_k^{\alpha_k}}}{1 - \delta_k} \right)}{1 - \delta_k} \frac{e^{-\frac{\rho_k^{\alpha_k} + \delta_k \rho_1^{\alpha_1}}{1 - \delta_k}}}{e^{-\frac{\rho_k^{\alpha_k} + \delta_k \rho_1^{\alpha_1}}{1 - \delta_k}}}, \quad (4)$$

e

$$F_{\mathbf{P}}(\rho_1, \dots, \rho_N) = \int_0^{\rho_1^{\alpha_1}} e^{-t} \prod_{k=2}^N \left[1 - Q_1 \left(\sqrt{\frac{2\delta_k t}{1 - \delta_k}}, \sqrt{\frac{2\rho_k^{\alpha_k}}{1 - \delta_k}} \right) \right] dt, \quad (5)$$

em que I_0 é a função de Bessel modificada de ordem zero e $Q_1(\cdot)$ é a função Q de Marcum de primeira ordem.

IV. PROBABILIDADE DE INDISPONIBILIDADE

A OP pode ser obtida com o uso de [1, Eq. (15)]. Ou seja, substituindo $\rho_1 = \dots = \rho_N = \sqrt{\Omega \gamma_{th} / \bar{\gamma}}$ em (5), no qual γ_{th} é um limiar, $\bar{\gamma}$ é a relação sinal-ruído média e Ω é o segundo momento de P , cuja expressão é dada em [5, Eq. (6)]. Assim,

$$P_{out} = \int_0^{\left(\frac{\Omega \gamma_{th}}{\bar{\gamma}}\right)^{\frac{\alpha_1}{2}}} e^{-t} \times \prod_{k=2}^N \left[1 - Q_1 \left(\sqrt{\frac{2\delta_k t}{1 - \delta_k}}, \sqrt{\frac{2}{1 - \delta_k} \left(\frac{\Omega \gamma_{th}}{\bar{\gamma}}\right)^{\frac{\alpha_k}{2}}} \right) \right] dt, \quad (6)$$

em que δ_k é dado por (2). Considerando (3), tem-se

$$P_{out} = \int_0^{\infty} e^{-t} \times \prod_{k=1}^N \left[1 - Q_1 \left(\sqrt{\frac{2\delta t}{1 - \delta}}, \sqrt{\frac{2}{1 - \delta} \left(\frac{\Omega \gamma_{th}}{\bar{\gamma}}\right)^{\frac{\alpha_k}{2}}} \right) \right] dt. \quad (7)$$

V. RESULTADOS

Curvas teóricas de OP em função do número de portas N são mostradas na Fig. 1 considerando um sistema FAS, com $\alpha_1 = \dots = \alpha_N = \alpha = \{0,5; 2; 4\}$, $W = \{0,7; 1; 2\}$ e $\gamma_{th}/\bar{\gamma} = -3$ dB. Na geração da Fig. 1(a), utilizou-se (6). Na mencionada figura, são incluídas para fins de comparação as curvas para o modelo Rayleigh (obtidos como caso especial

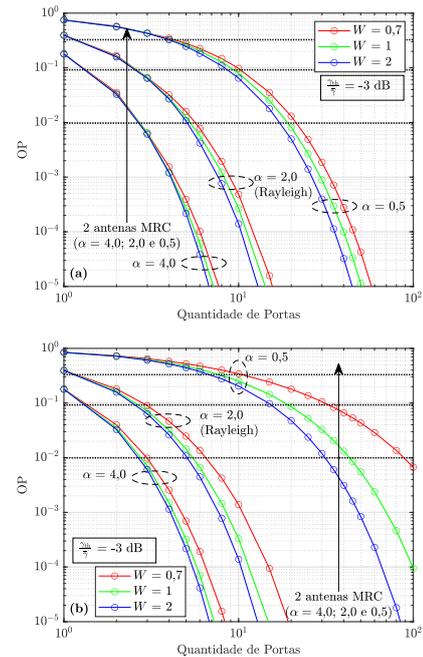


Fig. 1. Curvas teóricas de OP em função do número de portas N , sob diferentes valores de α , W e modelos de correlação entre as portas.

da distribuição Weibull quando $\alpha = 2$). Tais curvas são iguais às apresentadas em [1, Fig. 3]. Por sua vez, na Fig. 1(b), considerou-se (7). Observa-se que o aumento no valor do parâmetro α (que caracteriza a não-linearidade do canal) causa uma diminuição na OP dado que $\gamma_{th} < \bar{\gamma}$ em ambas as figuras. Nota-se ainda que, para um α fixo, o aumento de W reduz a OP. Na Fig. 1(b), verifica-se que o uso de (3) permite uma análise mais realista do FAS, no qual há uma redução no desempenho em todos os cenários mesmo para N grande. Verifica-se em todas as curvas que FAS pode superar um sistema que utiliza combinação por razão máxima (MRC) com 2 antenas.

VI. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho expressões inéditas para as estatísticas de primeira ordem da envoltória, considerando um sistema FAS sujeito a desvanecimento Weibull. Curvas para a OP foram traçadas e os impactos na mencionada métrica dos parâmetros que caracterizam a não linearidade e correlação entre as portas foram analisados e comentados.

REFERÊNCIAS

- [1] K.-K. Wong et al, "Fluid antenna systems," *IEEE Trans. Wirel.*, vol. 20, no. 3, pp. 1950–1962, 2021.
- [2] K.-K. Wong et al, "Performance limits of fluid antenna systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 11, pp. 2469–2472, 2020.
- [3] L. Tlebaldiyeva et al, "Enhancing QoS through fluid antenna systems over correlated Nakagami- m fading channels," in *Proc. of IEEE WCNC*, pp. 78–83, 2022.
- [4] K.-K. Wong et al, "Closed-form expressions for spatial correlation parameters for performance analysis of fluid antenna systems," *Electron. Lett.*, vol. 58, no. 5, pp. 454–457, 2022.
- [5] M. D. Yacoub et al, "Joint statistics for two correlated Weibull variates," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 4, pp. 129–132, 2005.
- [6] Wolfram Research, Inc. (2020). *Wolfram Research*. Accessed: Mar. 16, 2023. [Online]. Available: <http://functions.wolfram.com>.