

Capacidade de Canal MIMO Aplicada à Miniaturização de Antenas em Microfita Usando o Algoritmo PSO

Israel Leal, Marcelo Alencar e Waslon Lopes

Resumo— Este artigo apresenta um método para minimizar o tamanho da antena de microfita por meio do cálculo da capacidade do canal sem fio usando o algoritmo PSO. O problema é representado para um sistema MIMO 8×8 , em que o conceito de impedância mútua é usado para levar em consideração o acoplamento mútuo entre os elementos do conjunto de antenas. O objetivo é reduzir a distância entre os elementos da antena, garantindo uma alta capacidade de canal. A pesquisa foi realizada considerando a frequência de operação em 26 GHz, e os resultados das simulações indicam que manter uma distância de $0,4\lambda$ entre os elementos das antenas pode promover uma capacidade do canal 12,7% maior.

Palavras-Chave— Sistemas MIMO; antena microfita; capacidade de canal, otimização por enxame de partículas.

Abstract— This paper presents a method to minimize the microstrip antenna size by computing the wireless channel capacity using the PSO algorithm. The problem is represented as an 8×8 MIMO system, in which the mutual impedance concept is used to take into account the mutual coupling between the antenna array elements. The goal is to reduce the distance between the antenna elements, ensuring a high channel capacity. The research was performed considering the operation frequency of 26 GHz, and simulation results indicate that maintaining a distance of 0.4 between the antennas elements can promote a gain of 12.7% in terms of the channel capacity.

Keywords— MIMO systems; microstrip antenna; channel capacity, particle swarm optimization.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, antenas em microfita são amplamente usadas em rádio móvel e comunicações sem fio. Elas são pequenas, adaptáveis a superfícies planas e não-planas, simples e com baixo custo de fabricação, usando uma moderna tecnologia de circuito impresso, mecanicamente robustas quando montadas em superfícies rígidas, muito versátil em termos de frequência de ressonância, polarização, diagrama e impedância [1].

O projeto da diversidade espacial usando matrizes de antenas em sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*Multiple Input Multiple Output* – MIMO) pressupõe que o uso de um conjunto de antenas aumenta o desempenho do sistema, garantindo que o sinal chegue ao receptor com uma relação sinal/ruído (*signal-to-noise Ratio* – SNR) apropriada. Os sistemas MIMO exploram o fenômeno de múltiplos caminhos para aumentar a capacidade do canal em ambientes

altamente influenciados pelos mecanismos de propagação de reflexão e difração. Dependendo do número de antenas no transmissor e no receptor, a capacidade do canal pode alcançar um ganho, considerando o aumento da complexidade do sinal recebido [2], [3].

A minimização e otimização de múltiplas antenas na recepção de sinais em sistemas MIMO, para uma estação móvel (EM) de um sistema móvel celular (SMC), é um problema desafiador devido à sua pequena dimensão. A capacidade do canal é reduzida pelo acoplamento mútuo (AM) entre os elementos das antenas, afetando o desempenho do sistema [4].

O algoritmo de otimização de enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO), usa o conceito de enxame de partículas para resolver problemas que requerem inteligência computacional [5]. Nos sistemas MIMO, ele tem sido usado para encontrar os coeficientes de forma otimizada [6], para otimizar a capacidade do canal sem considerar AM [7] e para compensar a perda de propagação no canal de ondas milimétricas [8]. Uma modificação no PSO original é proposta neste documento para aumentar a capacidade do canal e reduzir a distância entre os elementos da antena para minimizar o tamanho da antena, considerando o AM.

O objetivo é atingir a capacidade do canal de um sistema MIMO, usando a matriz de covariância, variando a distância entre os elementos do conjunto de antenas transmissoras e receptoras, bem como a minimização alterando os parâmetros físicos da antena de microfita na faixa de ondas milimétricas. Ao modelar o problema, é considerada a menor distância entre os elementos do conjunto de antenas, na qual o efeito do AM não causa grandes perdas de capacidade.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção II apresenta os parâmetros físicos para o projeto da antena em microfita. A Seção III descreve como a capacidade do canal e o coeficiente de correlação são calculados considerando o AM. A metodologia de trabalho e a configuração da simulação estão descritas na Seção IV. Os resultados são apresentados na Seção V e, finalmente, a Seção VI é dedicada às conclusões do artigo e às propostas de trabalhos futuros.

II. PROJETO DE ANTENA EM MICROFITA

O *patch* retangular é a configuração de antena mais utilizada por seus bons resultados e fácil implementação. O modelo de linha de transmissão é considerado neste artigo devido a sua facilidade de análise e amplo uso [1]. O projeto da antena de microfita é definido de acordo com a Figura 1.

Israel A. C. Leal e Marcelo S. Alencar, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, Brasil, E-mails: iairesleal@gmail.com, malencar@dee.ufcg.edu.br. Waslon T. A. Lopes, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil, E-mail: waslon@ieee.org.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, IECOM e UFCG.

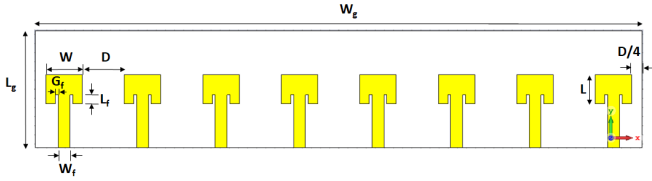


Fig. 1. Antena em microfita em visão frontal com oito elementos em patch retangular.

O arranjo de antenas é composto por oito elementos. A Figura 1 mostra outros parâmetros físicos para projeto da antena, W e L são a largura e o comprimento do patch, respectivamente, W_g e L_g são a largura e o comprimento do plano de terra, respectivamente. A largura e o comprimento do plano de terra têm o mesmo tamanho do substrato. A largura da linha de alimentação é W_f , e L_f é o comprimento da fenda radiante dentro do patch e G_f é a largura da fenda. A distância D entre os elementos é otimizada para minimizar o tamanho da antena. Outros parâmetros físicos podem ser observados na Figura 2, que apresenta a visualização do perfil de um dos elementos do conjunto de antenas.

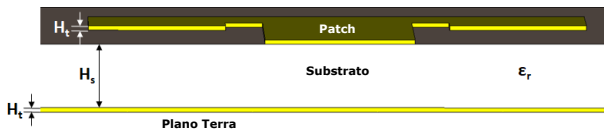


Fig. 2. Visão em perfil de uma antena em microfita com patch retangular.

Esses parâmetros estão relacionados ao tipo do substrato escolhido e à sua espessura (H_s). Nesta pesquisa, foi utilizado o substrato Rogers 3003, com constante dielétrica (ϵ_r) igual a 3,0, H_s igual a 0,5 mm e fator de dissipação ($\tan \delta$) igual a 0,0010 [9]. H_t representa a espessura do patch e do plano de terra, que é 0,035 mm por padrão. Os substratos mais adequados para o bom desempenho da antena têm um baixo ϵ_r na faixa de 2,2 a 12, e h_s corresponde a uma pequena fração do comprimento de onda (λ), geralmente $0,003\lambda \leq h_s \leq 0,05\lambda$ [1]. O substrato foi escolhido com base nessas recomendações.

III. CÁLCULO DA CAPACIDADE DO SISTEMA MIMO

O valor máximo da informação mútua, $I(X;Y)$, do sinal de entrada X com o sinal de saída Y , define a capacidade do canal de comunicação sem fio de acordo com o vetor de distribuição de probabilidade $P(x)$ do sinal de entrada X [10],

$$C = \max_{P(x)} I(X;Y). \quad (1)$$

O canal MIMO relaciona uma matriz complexa \mathbf{H} em um sistema sem fio de banda estreita, que pode ser descrito por [3], [4], [11]

$$Y = \mathbf{H}X + \mathbf{N}, \quad (2)$$

em que \mathbf{N} é o ruído gaussiano aditivo com a propriedade de correlação $R_N = E[\mathbf{N}\mathbf{N}^T]$, igual à potência do ruído, σ_n^2 , na qual $E[\cdot]$ é o operador de valor esperado [4].

A informação do estado do canal no transmissor (*Channel State Information at the Transmitter – CSIT*) e no receptor (*Channel State Information at the Receiver – CSIR*) são consideradas perfeitas, ou seja, este modelo não é considerado no estado instantâneo do canal, é caracterizado pelo cenário em que o estado do canal pode ser rastreado com precisão no receptor e o modelo estatístico de canal no transmissor é baseado na distribuição de canais [10], [11]. A capacidade de um sistema MIMO, considerando o limite superior da capacidade ergódica é dada por [4], [11]–[13]

$$C = E \left[\log_2 \left(\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\gamma}{N_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^T \right) \right) \right], \quad (3)$$

em que \mathbf{I}_{N_r} é matriz identidade de ordem N_r e \mathbf{H}^T é a matriz transposta conjugada da matriz de canal \mathbf{H} , γ é a SNR do canal, representado pela razão P_x/σ_n^2 , em que P_x é a potência transmitida total e σ_n^2 , a potência do ruído [14].

A matriz de canal \mathbf{H} é calculada usando o modelo de canal de Kronecker que considera as matrizes de correlação separáveis entre o transmissor e o receptor [4], [15], [16]. A matriz do canal pode ser expressa como

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_Y^{1/2} \mathbf{G}_H (\mathbf{R}_X^{1/2})^T, \quad (4)$$

em que \mathbf{R}_X e \mathbf{R}_Y são, respectivamente, as matrizes de correlação espacial no transmissor e no receptor, \mathbf{G}_H é uma matriz gaussiana com variáveis independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) com média zero e variância unitária [4], [17].

O conceito de impedância mútua é usado para avaliar o efeito do AM nos arranjos de antenas. Ele é importante para o conhecimento e controle dos efeitos do AM [1], [18], [19]. Para tanto, é necessário ajustar a Equação 4, modelo de Kronecker, para calcular a matriz de ganho de canal considerando a correlação espacial e o AM. Isso é possível criando o modelo de sinal em função das impedâncias mútuas,

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{Z}_r^{-1} \mathbf{H} \mathbf{Z}_t^{-1}, \quad (5)$$

em que H_1 é a nova matriz de ganhos considerando o AM, Z_r é a matriz de impedância no receptor e Z_t é a matriz de impedância no transmissor [19], [20].

IV. METODOLOGIA E SIMULAÇÃO

A partir dos parâmetros simulados da antena de microfita, a capacidade do canal é calculada em função da distância entre os elementos. A otimização do sistema é realizada utilizando o algoritmo PSO. O objetivo é aumentar a capacidade alterando a distância entre as antenas da matriz de transmissão e recepção. O PSO trabalha com a metodologia de inteligência de enxame, para esse fim, a posição e a velocidade de cada partícula no espaço de pesquisa define o desempenho do grupo de antenas. O canal é o espaço de busca, enquanto as antenas são representadas pelo número de partículas previstas em cada execução do algoritmo. Cada partícula representa uma solução para aumentar a capacidade do canal com base no ajuste da distância entre os elementos.

A antena em microfita foi projetada no *software* CST Studio Suite®. Os parâmetros de espalhamento (*scatter* – S) e a razão de onda estacionária de tensão (*Voltage Standing Wave Ratio* – VSWR) de cada elemento são avaliados quanto ao bom desempenho a uma frequência de ressonância em torno de 26 GHz, banda de frequência da quinta geração (5G) regulada para uso no Brasil [21]. O gráfico da VSWR também define a largura de banda adequada. A antena é avaliada no modo transmissor a partir de uma fonte de tensão em seus terminais e no modo receptor com uma carga e uma onda plana que incide o plano horizontal do conjunto de antenas. A impedância mútua de cada elemento é coletada no modo transmissor e receptor para cálculo e otimização da capacidade do sistema. Inicialmente, é considerada a distância entre os elementos de 6,0 mm e largura do substrato de 77,8 mm, valores alcançados a partir de experimentos prévios sem otimização. Os parâmetros físicos da antena, que não variam com esse estudo, são apresentados na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS FÍSICOS DA ANTENA EM MICROFITA.

Parâmetro	W	L	W_f	L_f	G_f	L_g
Valor (mm)	4,0	3,2	1,3	1,0	0,3	12,8

Um sistema MIMO 8×8 é simulado usando a linguagem de programação Matlab® para calcular a capacidade do canal em função do SNR, usando a Equação 3. A matriz complexa é calculada considerando a impedância mútua na Equação 5 para levar em consideração o efeito do AM.

A distância entre os elementos da antena é avaliada pelo algoritmo PSO, que busca a menor distância que leva à maior capacidade do conjunto. O desempenho do sistema foi avaliado variando a distância entre os elementos da matriz receptora de $0,001\lambda$ a λ , com etapas de 0,001, calculadas mantendo a distância entre a operação dos elementos da matriz do transmissor fixada em $0,5\lambda$. Isso foi definido para uma análise completa no modo receptor, pois a maioria dos problemas relacionados ao AM deve-se às pequenas dimensões da antena. A frequência de operação é de 26 GHz e o valor da SNR varia entre -10 a 20 dB. Os elementos do conjunto de antenas são considerados lineares nos modos de recepção e transmissão.

No algoritmo PSO, a estratégia mais comumente usada é inicializar o processo de pesquisa com o fator de inércia (ω) próximo a um e reduzi-lo linearmente durante todo o processo. Com isso, as partículas iniciam uma busca global nas primeiras iterações e finalizam o processo com uma busca local [20], [22]. Nesta pesquisa, modificou-se o conceito original do algoritmo para fornecer uma função específica e resolver melhor o problema. O espaço de busca local foi reduzido para distâncias inferiores a $\lambda/2$, os valores maiores que essa solução não são tão importante porque o efeito do AM já é considerado. As estratégias definidas para o controle do coeficiente de aceleração são mostradas na Tabela II.

A estratégia 1 garante que, nas primeiras iterações, o enxame explore o espaço de busca de maneira abrangente, pois o algoritmo ainda não encontrou uma região próxima ao ponto mínimo da função objetivo. A estratégia 2 oferece a capaci-

TABELA II
ESTRATÉGIAS PARA CONTROLE DOS COEFICIENTES DE ACELERAÇÃO.

Estratégia	Tipo de busca	c_1	c_2
1	Global	Aumenta	Diminui
2	Local	Aumenta lentamente	Diminui lentamente

dade de pesquisar mais profundamente nas iterações finais, em que o algoritmo está apenas refinando as soluções encontradas. Portanto, c_1 e c_2 , coeficientes de aceleração cognitivo e social, respectivamente, devem ser ligeiramente alterados do estado de exploração para o estado de convergência. O processo de aumentar ou diminuir c_1 e c_2 é chamado de taxa de aceleração δ . O pseudocódigo do PSO com esta modificação é descrito no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 Pseudocódigo do Algoritmo PSO Modificado

- 1: Inicialize as partículas do enxame com posição e velocidade aleatórias;
- 2: **Enquanto** A quantidade de iterações máxima não for atingida **Faça**
- 3: **Para** Cada Partícula **Faça**
- 4: Executar a estratégia 1
- 5: Localizar melhor partícula na vizinhança;
- 6: **Se** Distância entre os elementos $< \lambda/2$ **Faça**
- 7: Executar a estratégia 2
- 8: **Fim-Se**
- 9: Atualizar velocidade da partícula;
- 10: Atualizar posição da partícula;
- 11: Avaliar posição levando em consideração a capacidade do canal;
- 12: **Se** posição atual melhor que memória cognitiva **Faça**
- 13: Atualizar memória cognitiva;
- 14: **Fim-Se**
- 15: **Fim-Para**
- 16: **Fim-Enquanto**
- 17: Retorne os valores da distância entre as antenas e a matriz de ganhos da melhor memória cognitiva do enxame.

Para cada execução do algoritmo, um novo cálculo de capacidade do canal é encontrado. Se o novo valor for maior que o anterior, a saída do sistema é otimizada para esse valor, caso contrário, o valor é descartado. O processo se repete até atingir o valor ideal ou o tempo de parada. São realizadas 30 execuções de 3000 iterações, o resultado de cada execução é considerado a média de cada iteração. Um estudo comparativo da capacidade do canal em relação ao SNR é realizada considerando o sistema MIMO sem e com otimização. O comportamento da otimização da capacidade também é apresentado em função da distância entre os elementos da antena no receptor, considerando o AM.

A Tabela III apresenta os parâmetros definidos para o otimizador. Em que r_1 e r_2 são valores aleatórios obtidos de uma distribuição uniforme, gerado por toda iteração do algoritmo, para cada partícula em cada dimensão.

Foi estabelecido a distância da onda plana em 10 m, considerando o cálculo do campo distante proposto em [23].

TABELA III
PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO DO PSO.

Parâmetros	Valor
Tamanho do enxame	50 partículas
Operador	Mutation
Taxa de Mutação (%)	1,0
c_{1max} e c_{1min}	2,5 e 1,5
c_{2max} e c_{2min}	2,5 e 1,5
r_{1max} e r_{1min}	1,0 e 0,0
r_{2max} e r_{2min}	1,0 e 0,0
ω_{max} e ω_{min}	0,9 e 0,4
δ_{max} e δ_{min}	0,1 e 0,05

V. RESULTADOS

As Figuras 3 e 4 apresentam os parâmetros S para oito elementos da antena de micro-tira no modo transmissor e receptor, respectivamente.

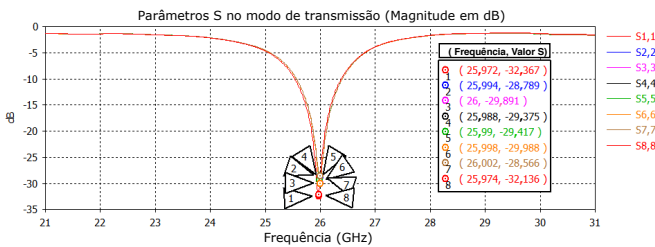


Fig. 3. Parâmetros S da antena em microfita no modo transmissor.

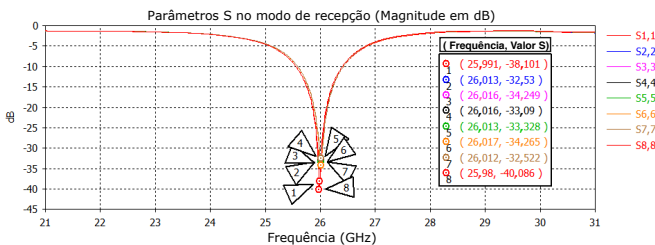


Fig. 4. Parâmetros S da antena em microfita no modo receptor.

Pode-se observar um bom desempenho do substrato atingindo níveis adequados e a frequência de ressonância esperada. As Figuras 5 e 6 mostram o parâmetro VSWR para oito elementos da antena em microfita no modo transmissor e receptor, respectivamente.

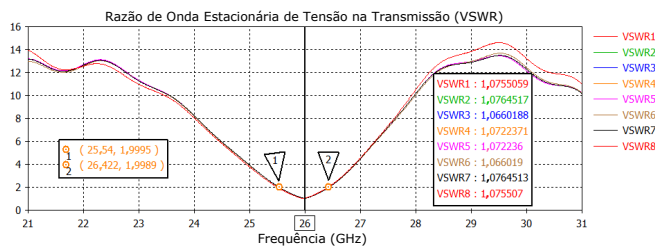


Fig. 5. Parâmetro VSWR de antena em microfita no modo transmissor.

O desempenho pode ser alcançado, por uma largura de banda de aproximadamente 0,9 GHz. A Figura 7 apresenta o resultado das maiores capacidades encontradas, com e sem

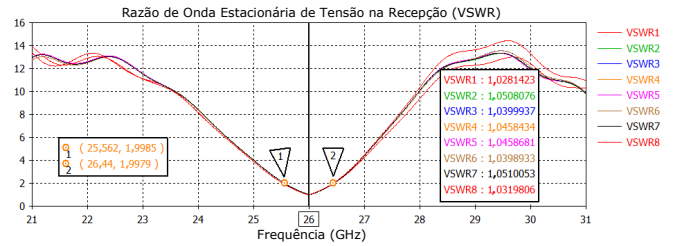


Fig. 6. Parâmetro VSWR de antena em microfita no modo receptor.

otimização, em função do SNR, para um sistema MIMO que usa uma antena de microfita com oito elementos.

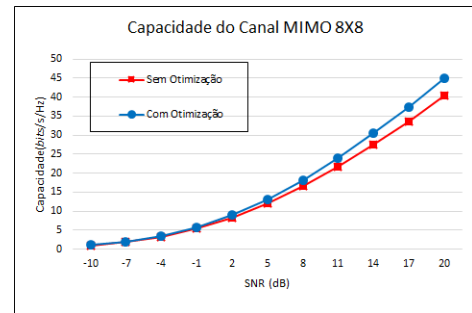


Fig. 7. Capacidade em função da SNR em um sistema MIMO 8 x 8 em microfita.

É possível observar que, após otimizar o sistema com o algoritmo PSO, a capacidade do canal MIMO aumenta, para a SNR de 20 dB SNR, a melhoria é de aproximadamente 12,7%.

A Figura 8 apresenta a variação da capacidade calculada em função da variação da distância entre os elementos no modo receptor. A distância é normalizada em λ e os valores foram obtidos para um sistema MIMO de 8×8 , com SNR igual a 20 dB.

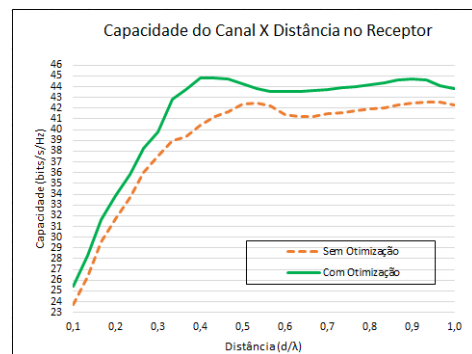


Fig. 8. Capacidade do Canal em função da distância entre os elementos da antena no modo receptor em um sistema MIMO 8 x 8 em microfita.

É possível observar o comportamento da capacidade em função da distância entre os elementos no terminal receptor. A capacidade do canal tende a se estabilizar a uma distância de $0,5\lambda$ e permanece aproximadamente constante. O algoritmo busca a menor distância que promove a maior capacidade para o sistema, e esse valor é $0,522\lambda$ sem otimização e $0,401\lambda$ com otimização, isso representa uma redução de 23,2% na

distância entre os elementos. A Tabela IV apresenta estes resultados em relação a largura do conjunto de antenas e a distância entre os elementos.

TABELA IV
RESULTADOS FINAIS DA LARGURA E DISTÂNCIA DA ANTENA.

Parâmetro	Valor inicial	Valor com PSO original	Valor com PSO modificado
D (mm)	6,0	5,0	4,6
W_g (mm)	77,8	68,4	66,5

Essa diferença é bastante significativa na faixa de ondas em milímetros, nesta pesquisa, com uma frequência de 26 GHz, uma vez que adiciona 11,3 mm na largura do substrato da microfita com oito elementos. Esta antena de microfita projetada alcança uma largura de 66,5 mm, incluindo D igual a 4,6 mm.

O tempo médio de execução dos algoritmos foi de 10,3 h para o projeto das antenas em micro-fita, e de 1,3 h, para o projeto do sistema MIMO.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma metodologia para analisar e otimizar sistemas MIMO que utilizam antena em microfita, considerando o acoplamento mútuo entre os elementos do conjunto de antenas no transmissor e no receptor. O algoritmo PSO é usado para otimizar a capacidade do canal e reduzir a distância entre os elementos do conjunto de antenas.

Os resultados mostram que o algoritmo PSO otimiza a capacidade do canal de um sistema MIMO 8×8 que usa antena em microfita, em 12,7%, para um SNR de 20 dB. O algoritmo também busca uma distância mínima, na qual a função objetivo é maximizada, atingindo os resultados de $0,4\lambda$ para a separação entre os elementos da antena receptora, representando uma redução de 23,2% na distância entre os elementos.

A análise no modo receptor mostra que a capacidade do canal pode ser alta com valores de distância inferiores a $0,5\lambda$, no caso de estações móveis celulares em que o tamanho real do aparelho telefônico não permite que a distância mínima de acoplamento seja mantida, este método permite a análise real desse efeito. Com o uso massivo da tecnologia MIMO em redes 5G, técnicas como essa permitem o projeto desses sistemas para dispositivos móveis portáteis.

Em trabalhos futuros, os pesquisadores pretendem experimentar outras configurações de antenas de microfita, variando os formatos e utilizando estruturas diferentes, como planares e circulares, com o uso de algoritmos bio-inspirados para projetar as antenas. O estudo do acoplamento mútuo deve ser aprimorado neste projeto, incluindo seu efeito em outros parâmetros da antena.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Copele), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), por proverem suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*. New Jersey, USA: Wiley, 4 ed., 2016.
- [2] J. Sharony, "Introduction to Wireless MIMO – Theory and Applications," tech. rep., Center of Excellence in Wireless and Information Technology, Stony Brook University, November 2006.
- [3] I. A. C. Leal, M. Alencar, and W. Lopes, "Genetic Algorithm Optimization Applied to the Project of MIMO Systems," in *25th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks – SoftCOM*, (Split, Croatia), pp. 1–5, 09 2017.
- [4] X. Liu and M. E. Bialkowski, "Effect of Antenna Mutual Coupling on MIMO Channel Estimation and Capacity," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2010, pp. 1–9, 2010. Article ID 306173.
- [5] I. A. C. Leal, D. R. C. Silva, D. A. R. Chaves, and C. J. A. Bastos-Filho, "Bio-Inspired Optimization of Blocked Calls in Cellular Mobile Systems," in *International Workshop on Telecommunications (IWT'2015)*, (Santa Rita do Sapucaí, MG, Brazil), pp. 1–6, June 2015.
- [6] J.-H. Lee and J.-Y. Lee, "Optimal Beamforming-selection Spatial Precoding Using Population-based Stochastic Optimization for Massive Wireless MIMO Communication Systems," *Elsevier*, vol. 354, pp. 4248–4271, 2017.
- [7] M.-H. Ho, C.-C. Chiu, and S.-H. Liao, "Optimisation of Channel Capacity for Multiple-input multiple-output Smart Antenna Using a Particle Swarm Optimiser," *IET Communications*, vol. 6, no. 16, pp. 2645–2653, 2012.
- [8] M. Cui, W. Zou, and R. Z. Y. Wang, "Hybrid Precoding for Millimetre Wave MIMO Systems Based on Particle Swarm Optimisation," *IET*, vol. 13, pp. 1643–1650, August 2019.
- [9] Rogers, "Data Sheet: RO3000 Series Circuit Materials," tech. rep., 92-130, Rogers Corporation, USA, 2019.
- [10] A. Goldsmith, *Wireless Communication*. New York, USA: Cambridge University Press, 1 ed., 2005.
- [11] E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, and H. V. Poor, *MIMO Wireless Communication*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1 ed., 2007.
- [12] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity Limits of MIMO Channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, pp. 684–702, June 2003.
- [13] E. Telatar, "Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 10, pp. 585–595, November/December 1999.
- [14] N. Almeida, S. Mota, and A. Rocha, "Modelação do Canal Rádio MIMO," *Eletrônica e Telecomunicações*, vol. 5, pp. 129–135, Junho 2010.
- [15] T. Brown, E. Carvalho, and P. Kyritsi, *Practical Guide to the MIMO Radio Channel with Matlab® Examples*. Noida, India: Wiley, 1 ed., 2012.
- [16] B. Han and Y. R. Zheng, "Higher Rank Principal Kronecker Model for Triply Selective Fading Channels With Experimental Validation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, pp. 1654–1663, May 2015.
- [17] W. J. L. Queiroz, F. Madeiro, W. T. A. Lopes, and M. S. Alencar, "Spatial Correlation for DoA Characterization Using Von Mises, Cosine and Gaussian Distributions," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2011, pp. 1–12, 2011. Article ID 540275.
- [18] H. T. Hui, "A New Definition of Mutual Impedance for Application in Dipole Receiving Antenna Arrays," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 364–367, 2004.
- [19] Y. Yu, H.-S. Lui, C. H. Niow, and H. T. Hui, "Improved DoA Estimations Using the Receiving Mutual Impedances for Mutual Coupling Compensation: An Experimental Study," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 7, pp. 2228–2233, 2011.
- [20] I. A. C. Leal, M. S. Alencar, and W. T. A. Lopes, "Particle Swarm Optimization Applied to Control of Mutual Coupling in MIMO Systems," in *IEEE Latin-American Conference on Communications – LATINCOM*, (Salvador, Brazil), 11 2019.
- [21] ANATEL, "Anatel Fala sobre Tecnologia 5G na Câmara dos Deputados," Agosto 2019. <https://www.anatel.gov.br/institucional/component/content/article?id=2265>, Acessado em 20/out/2019.
- [22] R. Eberhart and Y. Shi, "Comparing Inertial Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization," in *Congress Evolutionary Computation*, pp. 84–88, July 2000.
- [23] R. Bansal, "The far-field: How far is far enough?," *Applied Microwave & Wireless*, vol. 11, no. 11, pp. 59–60, 1999.