

Condições de canal MIMO modeladas no simulador QuaDRiGa

Leone M. F. de Souza e Cássio G. do Rego

Resumo— Neste trabalho são apresentados resultados preliminares da pesquisa para avaliação, através de Modelos Estocásticos Baseados em Geometria do Canal (Geometry-based Stochastic Channel Models ou GSCM em inglês), de técnicas de sistemas com Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (Multiple Input Multiple Output ou MIMO em inglês) modernos. São apresentados os experimentos elaborados para avaliar métricas básicas de um canal MIMO utilizando o software QuaDRiGa, o qual utiliza um modelo GSCM para simular o canal. É feita uma discussão dos resultados obtidos em relação às configurações dos cenários utilizados e a aspectos dos modelos utilizados.

Palavras-Chave— MIMO, GSCM, QuaDRiGA

Abstract— In this work, preliminary results of the project for evaluation, using Geometry-Based Stochastic Channel Models (GSCM), of techniques of Multiple Input Multiple Output (MIMO) modern systems are presented. Also shown are the prepared experiments for evaluation of basic metrics of a MIMO channel using the QuaDRiGa software, which uses a GSCM model for channel simulation. The obtained results are discussed in relation to scenario configuration and aspects of the used models.

Keywords— MIMO, GSCM, QuaDRiGA

I. INTRODUÇÃO

Eficiência espectral e conectividade massiva são parâmetros de projeto importantes [1] no desenvolvimento dos sistemas modernos de comunicações móveis e o uso de técnicas como Múltiplo Acesso Não-Ortogonal (Non-Orthogonal Multiple Access ou NOMA em inglês) [2][3] e sistemas Massivos de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (Massive Multiple Input Multiple Output ou Massive MIMO em inglês) [4][5] para atender essas demandas são algumas áreas ativas de pesquisa. Uma característica comum às tecnologias destacadas é o agrupamento de usuários próximos com condições de propagação semelhantes.

Nesse contexto torna-se importante o estudo de modelos e simuladores que possam reproduzir as condições esperadas nos sistemas reais e, dentre os diferentes modelos disponíveis, os Modelos Estocásticos Baseados em Geometria do Canal (Geometry-based Stochastic Channel Models ou GSCM em inglês) apresentam uma boa relação custo-benefício entre o tempo de simulação e a aplicabilidade dos resultados [5][6].

Dois modelos GSCM amplamente utilizados [7] são os definidos pelo 3GPP [8] e pela iniciativa WINNER [9], sendo que este último serve de base para o QuaDRiGa [10], um software livre implementado como biblioteca para Matlab e Octave.

Leone Souza, PPGEE-UFMG, Belo Horizonte-MG, e-mail: leonemax@ufmg.br, REMOPT, Belo Horizonte-MG, e-mail: leone.souza@remopt.com; Cássio G. do Rego, PPGEE-UFMG, Belo Horizonte-MG, e-mail: cassio@cpdee.ufmg.br.

Neste trabalho são apresentados resultados preliminares da pesquisa que está sendo desenvolvida para avaliação das funcionalidades de consistência espacial em modelos GSCM e na adequação destes para simular técnicas MIMO modernas que necessitam do agrupamento baseado nas condições do canal de cada usuário.

Este artigo está organizado como descrito a seguir. Na Seção II são detalhados os principais conceitos de interesse. Os experimentos propostos e os parâmetros da simulação estão descritos na Seção III. A Seção IV contém os resultados obtidos e uma discussão dos comportamentos observados. O artigo é encerrado na Seção V onde são apresentadas as conclusões obtidas e apresentadas as direções dos trabalhos futuros.

II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Nas seções seguintes serão revisados os dois conceitos centrais para os testes realizados: sistemas de comunicação MIMO e modelos GSCM. Também são pontuados aspectos importantes para a escolha dos experimentos e avaliação dos resultados obtidos.

A. Canal MIMO

Em um canal MIMO tanto o transmissor (Tx) como o receptor (Rx) possuem mais de uma antena. Para um sinal faixa estreita a relação de entrada e saída para cada par de antenas Tx e Rx é dada por [11]:

$$y_{ij}(\tau) = h_{ij}x_j(\tau) + n_{ij} \quad (1)$$

Onde y_{ij} é o sinal recebido na antena i a partir do sinal $x_j(\tau)$ transmitido na antena j , h_{ij} é o ganho complexo do canal e n_{ij} é o ruído branco complexo gaussiano circularmente simétrico de média zero (Zero Mean Circularly Symmetric Complex Gaussian ou ZMCSCG em inglês).

Como o sistema é linear, o sinal detectado em cada antena y_i do receptor é dado pela soma dos sinais $y_{ij}(\tau)$ descritos na equação (1). Essa relação pode ser representada na forma matricial como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2)$$

Onde $\mathbf{y}=[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{M_R}]^T$ é o vetor de tamanho $M_R \times 1$ que agrupa os sinais das M_R antenas receptoras, \mathbf{H} é a matriz $M_R \times M_T$ com os ganhos h_{ij} do canal para cada par de antenas ij , $\mathbf{x}=[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{M_T}]^T$ é o vetor de tamanho $M_T \times 1$ que agrupa os sinais das M_T antenas transmissoras e \mathbf{n} é o vetor $M_R \times 1$ com o ruído branco ZMCSCG.

Dadas as mesmas condições no receptor, sistemas MIMO apresentam melhor desempenho do que sistemas com Uma Entrada e Uma Saída (Single Input Single Output ou SISO em inglês) com apenas uma antena no transmissor e uma no receptor em termos de *throughput* e Taxa de Erro de Bit (Bit Error Rate ou BER em inglês). Essas melhoras decorrem de ganhos em diversidade espacial e dependem do uso de técnicas apropriadas para processamentos dos sinais no transmissor e no receptor [11].

A performance de um sistema MIMO é, entretanto, limitada pelas condições do canal, como a capacidade ergódica que é dependente do rank da matriz de transferência \mathbf{H} . Quando a matriz possui rank completo o processamento adequado permite decompor o canal MIMO em R canais SISO, onde $R = \text{rank}(\mathbf{H})$ [12]. Mais ainda, a capacidade do canal é máxima quando a matriz é ortogonal [11].

O rank de uma matriz é um valor inteiro, tornando-se uma métrica pouco prática de se manipular. Uma figura de mérito útil para estimar a adequação do canal à utilização de técnicas MIMO é o número de condicionamento [11], o qual é definido como [13]:

$$\kappa(\mathbf{A}) = \frac{\mu_{\max}(\mathbf{A})}{\mu_{\min}(\mathbf{A})} \quad (3)$$

Onde $\kappa(\mathbf{A})$, $\mu_{\max}(\mathbf{A})$ e $\mu_{\min}(\mathbf{A})$ são, respectivamente, o número de condicionamento, máximo valor singular e mínimo valor singular da matriz \mathbf{A} . O valor de κ é sempre positivo maior ou igual a 1, sendo igual à unidade no caso de uma matriz ortogonal. Matrizes com número de condicionamento elevado são ditas mal condicionadas.

A dependência do sistema MIMO em relação às condições do canal também é bem exemplificada nas diferenças entre um canal com visada direta e um canal com sombreamento mas alto espalhamento por componentes multipercuro. Em canais com componente em visada direta a potência contida nesta tende a ser muito maior do que a associada às outras componentes, de forma que o padrão de interferência entre as componentes multipercuro [12] não afeta significativamente a potência total medida no receptor. Dessa forma, as condições do canal entre os pares de antenas individuais tendem a ter valores próximos, resultando em uma matriz mal condicionada, para a qual técnicas como uso de diversidade espacial podem ser inviáveis.

Por outro lado, para trechos em que há alto espalhamento, a composição da matriz é mais favorável às técnicas MIMO. A explicação para esse comportamento pode ser dividida em duas partes [12]. Tomando por base o modelo de Clarke, os coeficientes da matriz são resultado da soma das contribuições das diferentes componentes multipercuro decorrentes de reflexões aleatórias no ambiente de propagação, de forma que pelo teorema do limite central esses coeficientes tendem a uma distribuição gaussiana de amplitude, ou um canal Rayleigh considerando a potência. Como consequência, para antenas suficientemente espaçadas, o desvanecimento é independente e há uma maior probabilidade de que a matriz possua rank completo e que os autovalores sejam iguais [12].

Em um canal SISO a função de transferência para o caso plano em frequência pode ser reduzida a um ganho complexo. Para o caso MIMO a descrição completa da função de transferência do canal está associada a uma matriz, por esse motivo é utilizada a norma de Frobenius como métrica para estimar o ganho do canal e a relação sinal-ruído [11]. A norma de Frobenius está definida em (4).

$$\|\mathbf{H}\|_F^2 = \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{j=1}^{M_R} |h_{ij}|^2 \quad (4)$$

B. Modelos GSCM

Uma classe de modelos utilizados para simular canais MIMO são os GSCM. Nesse tipo de modelo as configurações do transmissor e receptor são explicitamente definidas em termos de distribuição das antenas, orientações, ganhos e demais parâmetros necessários, enquanto o comportamento do canal é simulado de maneira estocástica [6][7].

A simulação do canal é baseada no posicionamento de espalhadores de maneira aleatória para então realizar uma versão simplificada do traçado de raios [6]. Os modelos existentes se diferem principalmente na estratégia utilizada para posicionamento dos espalhadores sendo que modelos como 3GPP [8] e WINNER [9] usam uma abordagem baseada em clusters de espalhadores.

A modelagem através de clusters busca refletir o comportamento temporal observado em medições reais, onde o atraso das componentes multipercuro geram cópias do sinal que chegam agrupadas no tempo, abordagem também presente no modelo de Saleh-Valenzuela [14]. Uma simplificação desse modelo é assumir um medidor sem resolução temporal suficiente para diferenciar as componentes multipercuro dentro de cada agrupamento, de forma que o efeito do cluster na simulação é representado por um espalhamento do sinal em termos dos ângulos de chegada.

O modelo GSCM escolhido foi o QuaDRiGa (Quasi Deterministic Radio Channel Generator) [10], o qual é uma implementação baseada no WINNER, e cujo processo de criação e permanência dos clusters possui aspectos aleatórios e determinísticos. No simulador os clusters de espalhadores são criados associados a parâmetros como atraso de propagação e os ângulos de elevação e azimuth do cluster em relação ao Rx. Esses dois parâmetros, mais a posição do Rx em relação ao Tx, são suficientes para determinar a posição do cluster para o caso de traçado de raios com apenas uma reflexão. A existência dos clusters se mantém dentro de uma distância de coerência na qual se assume que as condições do canal são Estacionárias em Sentido Amplo (Wide Sense Stationary ou WSS em inglês). Após essa distância são gerados novos clusters e é determinado um trecho de transição para garantir a continuidade das medidas [10].

III. EXPERIMENTOS PROPOSTOS

Com o objetivo de estudar o canal MIMO montou-se o cenário com um transmissor fixo, representando uma torre de transmissão, e um receptor móvel, representando um dispositivo celular. O percurso do móvel foi definido tendo em

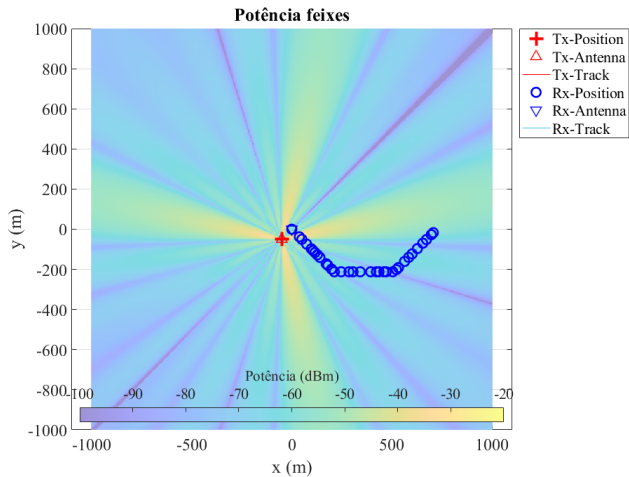


Fig. 1. Percurso realizado pelo Rx e perfil de potência da antena

vista experimentos futuros. A visualização 2D do caminho percorrido está apresentado na Figura 1, junto do mapa da potência irradiada pela estação base no caso do espaço livre.

Cada trecho possui uma distância de 300 m, com a rota completa totalizando 900 m. A velocidade do móvel durante todo o trajeto foi de 9m/s. A distância mínima entre o móvel e a estação rádio-base foi de 70 m, sendo válida ainda as aproximações de campo distante. A altura da estação rádio-base foi de 25 m e do Rx foi de 2 m.

A rota foi dividida em dois trechos: o primeiro, entre 0 s e 33 s, usa o cenário "Urban_NLOS" e o seguinte, de 33s a 100s, usa o cenário "Urban_LOS" conforme definidos na documentação do QuaDRiGa [10]. O principal objetivo ao adotar esses cenários foi comparar dois comportamentos bem distintos da matriz de transferência.

Foram utilizadas duas antenas no transmissor e duas no receptor resultando em uma matriz \mathbf{H} de dimensão 2×2 . Para o receptor as duas antenas foram rotacionadas entre si de 90° para utilizar diversidade de polarização.

No transmissor foram utilizadas duas antenas de oito elementos com espaçamento de 0,5 comprimento de onda. O padrão de interferência das antenas multi-elementos resultou em feixes bem delimitados no ambiente de propagação, conforme pode ser visto na Figura 1. A escolha da antena com esse perfil de potência tenta modelar um cenário de sistemas 5G atuais nos quais se espera o uso intensivo de feixes direcionados para melhorar a cobertura dos usuários conectados. Entretanto, esse direcionamento não leva em consideração usuários no estado *RRC Idle* [15] que continuam a monitorar a rede, realizando medições dos níveis de sinal recebido.

A potência transmitida foi de 0 dBm de forma que a potência no Rx representa também o ganho do canal. Não há inclusão de ruído na simulação. A frequência de transmissão foi de 700 MHz

Nas simulações do QuaDRiGa os resultados para a função de transferência do canal são gerados como uma matriz de quatro dimensões conforme apresentado na Figura 2. Em cada snapshot da simulação é gerada uma matriz de transferência para cada cluster ativo. Como o canal é linear, a matriz de

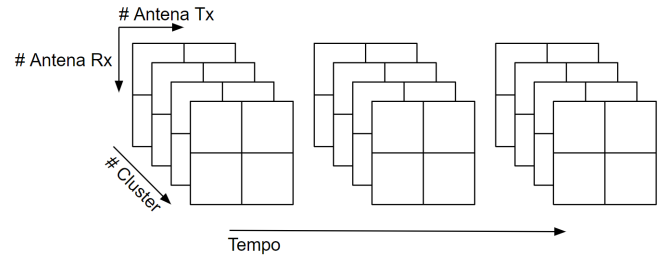


Fig. 2. Organização dos coeficientes do canal no QuaDRiGa

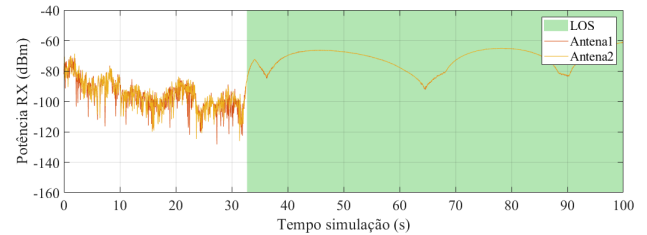


Fig. 3. Potência total recebida por antena

transferência total foi obtida somando as respostas dos clusters. O atraso associado a cada cluster foi desconsiderado, dessa forma assume-se que a resposta do canal é plana em frequência [11].

As métricas escolhidas para avaliar a evolução do canal MIMO foram: o ganho do canal para cada antena, além da norma de Frobenius e o número de condicionamento da matriz de transferência.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

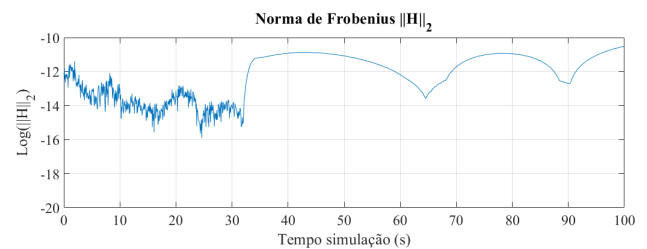


Fig. 4. Norma de Frobenius da matriz de transferência do canal

A potência recebida em cada antena é apresentada na Figura 3, onde o trecho de Linha De Visada (Line of Sight ou LOS em inglês) foi destacado em verde. Percebe-se que as potências medidas nas duas antenas são próximas ao longo de todo o trecho observado, o que sugere que as condições definidas para as antenas no Rx podem não ter sido suficientes para decorrelacionar os sinais recebidos.

Como pode ser observado na Figura 4, a norma de Frobenius da matriz possui valor bem próximo da potência recebida nas antenas individuais, o que era esperado, tendo em vista que as potências das antenas também foram parecidas entre si.

Em uma primeira avaliação dos resultados de potência imaginou-se que as variações observadas no caso LOS seriam decorrentes do sombreamento e flutuações aleatórias do canal. Entretanto, ao analisar o mapa do perfil de irradiação da

antena, apresentado na Figura 1, fica evidente que os vales são decorrentes de características da antenna transmissora e não do ambiente de propagação. Foram realizados experimentos adicionais para testar essa hipótese e os resultados serão apresentados mais adiante

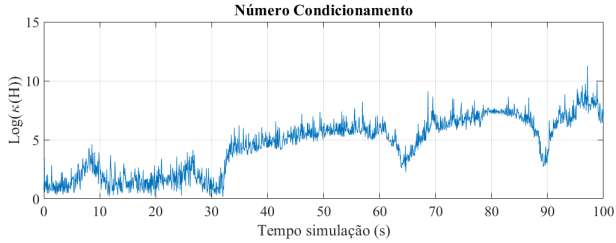


Fig. 5. Número de condicionamento da matriz de transferência do canal

Na figura 5 são apresentados os resultados do número de condicionamento da matriz de transferência. Comparando esses resultados com os da Figura 4 percebe-se para o cenário LOS uma correlação positiva entre a potência recebida e número de condicionamento da matriz de transferência. No cenário non-LOS (NLOS) uma possível relação entre o ganho do canal e o número de condicionamento da matriz é menos evidente.

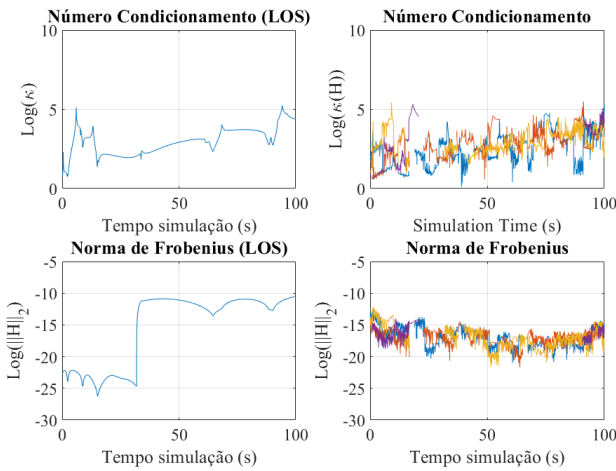


Fig. 6. Começando pelo canto superior esquerdo e seguindo no sentido horário: (a) número de condicionamento da matriz da componente em visada, (b) número de condicionamento das matrizes de 4 dos 26 clusters simulados, (c) norma de Frobenius da matriz da componente em visada e (d) norma de Frobenius dos 4 clusters selecionados

Para entender melhor esses resultados foi feita uma análise por cluster. Nos cenários escolhidos o simulador gera 26 clusters em cada snapshot, sendo o primeiro sempre a componente em visada direta. Dessa forma escolheu-se observar a componente de visada mais 4 clusters escolhidos aleatoriamente. Os resultados estão apresentados na Figura 6 com destaque para a componente em visada direta conforme será discutido a seguir.

A relação entre o número de condicionamento e a potência total recebida no trecho de LOS está ligada à dominância da componente em visada direta. Como o canal é linear, a resposta total é a soma das componentes individuais de forma que no cenário LOS a matriz de transferência resultante é dominada

pela componente em visada, pois a potência desta é maior que a resultante da soma das outras componentes. Raciocínio semelhante vale para os número de condicionamento da matriz de transferência.

Ainda na Figura 6, comparando-se a norma de Frobenius das matrizes, percebe-se que a queda de potência devido ao padrão de irradiação da antenna não afeta da mesma forma a componente em visada e os outros clusters. Dessa forma, nos trechos onde a potência total do canal diminui, a razão entre a potência da componente em visada e das componentes multipercursos também é menor e, portanto, o fator Riceano [12] diminui nesses trechos através de um processo que não está relacionado aos parâmetros definidos no cenário do simulador e sim à escolha da antenna e da rota realizada.

Para testar o raciocínio apresentado foram feitos três testes adicionais usando uma antenna omnidirecional e alterando alguns parâmetros de simulação. No primeiro cenário modificou-se a antenna utilizada, essa mudança foi mantida para os dois testes seguintes. No segundo experimento aumentou-se apenas o desvio padrão do sombreamento e no terceiro apenas o desvio padrão do fator Riceano em relação aos parâmetros do cenário original. A condição de LOS foi mantida em toda a rota.

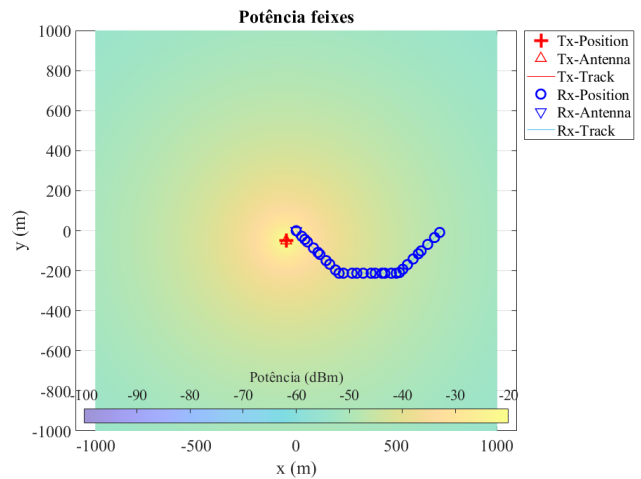


Fig. 7. Perfil de Potência da antenna omnidirecional para os testes adicionais. A rota do Rx foi mantida.

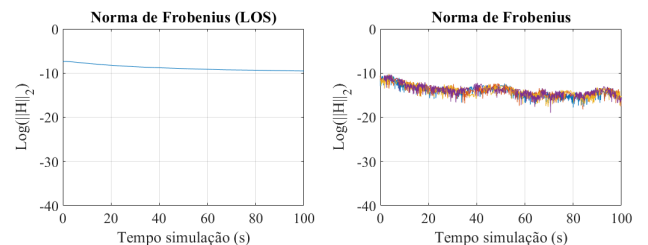


Fig. 8. Da direita para a esquerda: (a) norma de Frobenius da componente em visada e (b) norma de Frobenius dos clusters selecionados

Na Figura 7 está apresentada a rota e o perfil de potência para a antenna omnidirecional. Comparando os valores com os apresentados na Figura 1 percebe-se que a potência é mais uniformemente distribuída, o que se reflete na norma

de Frobenius da componente em visada direta e dos outros clusters conforme apresentado na Figura 8.

Comparando os resultados das Figuras 6(b) e 6(c), no trecho de LOS (entre 33 s e 100 s), com os resultados de 8(a) e 8(b), respectivamente, percebe-se que a principal diferença na evolução temporal da potência é em relação à componente em visada. Apesar de a média da potência dos clusters aumentar com a antena omnidirecional, o comportamento ao longo da rota no trecho de LOS não é significativamente diferente nos dois casos.

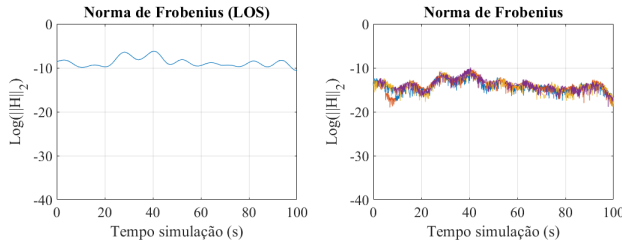


Fig. 9. Norma de Frobenius da componente em visada e clusters selecionados para fator de sombreamento alterado

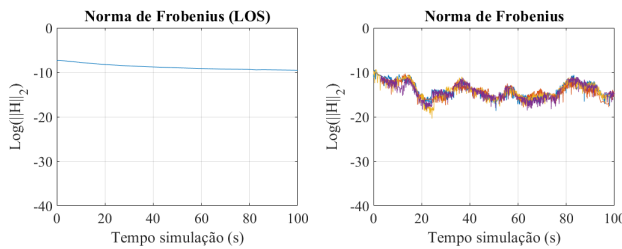


Fig. 10. Norma de Frobenius componente em visada e clusters selecionados para fator Riceano alterado

Os gráficos na Figura 9 foram obtidos aumentando o desvio padrão do fator de sombreamento no cenário escolhido de 0,05dB para 10 dB com o objetivo de criar uma diferença perceptível nos valores. Pode-se verificar que os vales resultantes do sombreamento ocorrem de maneira mais distribuída ao longo da rota, diferente do observado na Figura 6, onde o aumento da atenuação é causado pelo perfil de potência da antena. Outro resultado visível é que as potências dos clusters também apresentam os mesmos vales que a componente em visada direta.

Os resultados para a modificação do fator Riceano estão apresentados Figura 10. Foi alterado o desvio padrão do fator Riceano de 5,65 dB para 20 dB, mantendo-se a média em 22,55 dB. Comparando estes resultados com os apresentados na Figura 9 percebe-se que, na simulação, o fator Riceano varia pelo aumento ou diminuição da potência associada aos clusters, enquanto a componente em visada é mantida aproximadamente constante.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os resultados iniciais dos estudos em canal MIMO utilizando o QuaDRiGa como representante de modelos GSCM.

Os dois principais resultados obtidos nos testes do canal MIMO concordam com literatura disponível. Observou-se que no cenário de LOS a potência recebida é maior, enquanto a matriz de transferência do canal é pior condicionada. Em contrapartida, no caso NLOS, o número de condicionamento apresenta maior variação mas a média tende a 1, indicando uma matriz ortogonal.

Outro resultado importante está relacionado à simulação em modelos GSCM. No caso, o fator Riceano observado foi dependente de parâmetros da antena transmissora escolhida, resultando na observação de um canal com estatísticas diferentes das esperadas para o cenário escolhido, o que mostra a importância de uma elaboração cuidadosa dos testes e da avaliação dos resultados obtidos.

Nossos trabalhos futuros serão direcionados para repetir os testes em cenários com mais de um dispositivo móvel e assim analisar as condições do canal para receptores próximos.

REFERÊNCIAS

- [1] Wei Jiang, Bin Han, Mohammad Asif Habibi, and Hans Dieter Schotten. The road towards 6g: A comprehensive survey. 2:334–366.
- [2] Zhiguo Ding, Xianfu Lei, George K. Karagiannidis, Robert Schober, Jinhong Yuan, and Vijay K. Bhargava. A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(10):2181–2195, October 2017.
- [3] Wonjae Shin, Mojtaba Vaezi, Byungju Lee, David J. Love, Jungwoo Lee, and H. Vincent Poor. Coordinated Beamforming for Multi-Cell MIMO-NOMA. *IEEE Communications Letters*, 21(1):84–87, January 2017.
- [4] Emil Björnson, Luca Sanguinetti, Henk Wymeersch, Jakob Hoydis, and Thomas L. Marzetta. Massive MIMO is a reality—What is next? *Digital Signal Processing*, 94:3–20, November 2019.
- [5] Panagiotis K. Gkonis, Panagiotis T. Trakadas, and Dimitra I. Kaklamani. A Comprehensive Study on Simulation Techniques for 5G Networks: State of the Art Results, Analysis, and Future Challenges. *Electronics*, 9(3):468, March 2020. Number: 3 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [6] P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. Degli-Esposti, H. Hofstetter, P. Kyösti, D. Laurenson, G. Matz, A.F. Molisch, C. Oestges, and H. Özcelik. Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007(1):019070, December 2007.
- [7] Fjolla Ademaj, Stefan Schwarz, Taulant Berisha, and Markus Rupp. A Spatial Consistency Model for Geometry-Based Stochastic Channels. *IEEE Access*, 7:183414–183427, 2019.
- [8] Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations. *Tech. Rep.*, 3, 2011, 3GPP TR 25.996 v10.0.0.
- [9] P. Kyösti et al. Ist-4-027756 WINNER II d1.1.2 v.1.1: WINNER ii channel models. *Tech. Rep.*, 2007.
- [10] S Jaeckel, L Raschkowski, L Thiele, E Eberlein, T Heyn, and F Burkhardt. QuaDRiGa - Quasi Deterministic Radio Channel Generator, User Manual and Documentation. page 260.
- [11] Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar, and Dhananjay Gore. *Introduction to space-time wireless communications*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, digitally printed version edition, 2008.
- [12] Andreas F. Molisch. *Wireless communications*. Wiley : IEEE, Chichester, West Sussex, U.K, 2nd ed edition, 2011. OCLC: ocn613645390.
- [13] David A. Belsley. *Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity*. Wiley series in probability and statistics. Wiley-Interscience, Hoboken, N.J, 2004.
- [14] A.A.M. Saleh and R. Valenzuela. A statistical model for indoor multipath propagation. 5(2):128–137. Conference Name: IEEE Journal on Selected Areas in Communications.
- [15] Christopher Cox. *An introduction to 5G: the new radio, 5G network and beyond*. Wiley.