



Broadband Channel Characterization in Wooded Environment in the 26 GHz (5G) Band

Jean Carneiro da Silva, Diego Kasuo Nakata da Silva,
Leslye Estefania Castro Eras, Nadson Welkson Pereira de Souza,
André Felipe Souza da Cruz and Emanuel Costa

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

March 29, 2020

Caracterização em Banda Larga de Canal em Ambiente Arborizado na Faixa de 26 GHz (5G)

Jean Carneiro da Silva⁽¹⁾, Diego Kasuo Nakata da Silva⁽¹⁾, Leslye Estefania Castro Eras⁽¹⁾, Nadson Welkson Pereira de Souza⁽¹⁾, André Felipe Souza da Cruz⁽¹⁾, Emanuel Costa⁽²⁾

(1) Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA, Folha 31, QD. 7, s/n, 68507-590 Marabá, Brasil

(2) Centro de Estudos em Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – CETUC/PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente 225, 22451-900 Rio de Janeiro RJ Brasil

Abstract— The present work describes the use of a simulation model based on asymptotic methods (ray tracing) on the propagation of ultra-wideband radio signals in a densely-arborized urban channel. The model was validated and adjusted using data obtained from measurement campaigns in the millimeter-wave band in different locations. The simulation uses deterministic methods to predict the received power, XPD (depolarization), RMS delay spread and mean delay in a channel with a high density of scatterers (trees, buildings, and poles). Simulated signals were transmitted in the vertical and horizontal polarizations considering the non-specular reflection caused by rough surfaces and the effect of the height variation of the transmitter in outdoor channels.

Keywords— Ray tracing; millimeter waves; propagation model,

Sumário—O presente trabalho descreve a utilização de um modelo de simulação baseado em métodos assintóticos (*ray tracing*) de propagação de sinais de rádio de banda ultra larga em um canal urbano densamente arborizado. O modelo foi validado e ajustado utilizando dados obtidos em campanhas de medições na faixa de ondas milimétrica em diversas localidades. A simulação utiliza métodos determinísticos para prever a potência recebida, XPD (despolarização), espalhamento de retardo RMS e retardo médio em um canal com alta densidade de espalhadores (árvores, prédios e postes). Foram simuladas a transmissão de sinais nas polarizações vertical e horizontal e considerada a reflexão não especular provocada por superfícies rugosas, assim como o efeito da variação de altura do transmissor em canais externos.

Palavras-chave— Traçado de raios; ondas milimétricas; modelo de propagação

I. INTRODUÇÃO

A literatura recente sobre canais de propagação na faixa de ondas milimétrica é relativamente limitada. Efetivamente, o alto custo dos equipamentos utilizados em campanhas de medição, pode limitar o desenvolvimento de estudos experimentais sobre o uso desta faixa. Para contornar esta dificuldade, diversas técnicas de simulação têm sido propostas [1].

Em faixas de frequência mais baixa, modelos determinísticos baseados em traçado de raios foram capazes de executar previsões em ambientes urbanos com ótima concordância com valores obtidos em campanhas de medições [2]. O estudo da faixa de ondas milimétricas, em função de seu diminuto comprimento de onda e do possível impacto sobre mecanismos importantes nestas faixas, adiciona dificuldades aos modelos previamente desenvolvidos para as faixas de VHF e UHF. Estudos recentes [3] mostram que o mecanismo da difração pode

sofrer severas perdas, de modo que a cobertura em canais sem linha de visada mostra-se pobre na faixa de ondas milimétricas [4]. Por outro lado, pequenos obstáculos e espalhadores, desconsiderados no passado, podem causar impactos na propagação de ondas em canais urbanos onde estão presentes em grandes quantidades, o que motivou a inclusão de árvores, postes de trânsito, distribuição de energia e iluminação nesta simulação.

A faixa de 26 GHz é de interesse para a implementação de serviços móveis de quinta geração (5G) em ambientes urbanos. Assim, avaliar os possíveis efeitos da propagação de sinais de comunicações móveis nestes ambientes é de relevante importância. Nestas frequências, que possuem menor penetração em construções e estão mais sujeitas à ação de pequenos espalhadores, sua aplicação é usualmente feita em células menores, onde o transmissor encontra-se em menores alturas e em situações de visada [4]. Nestas condições, a cobertura vegetal presente nas cidades pode ter um forte impacto na qualidade do sinal recebido. Portanto, o presente trabalho simula a transmissão de sinais acima, entre e abaixo da linha das copas, em um cenário onde os receptores estão a 1.5 m do chão.

Na próxima seção, o modelo de traçado de raios é descrito, utilizando princípios da ótica geométrica (GO) e teoria uniforme da difração (UTD). Na seção III, são explanados os aspectos e técnicas da simulação. A seção IV mostra os resultados da simulação em uma rota preestabelecida em um canal externo em uma praça da cidade de Belém, com base nas métricas: potência recebida, discriminação de polarização cruzada (XPD), espalhamento de retardo RMS e retardo médio para sinais de banda ultra larga (UWB) para as componentes vertical e horizontal do campo elétrico. Por fim, a seção V, analisa os resultados sob os pontos de vista quantitativos e qualitativos, definindo as metas futuras deste estudo.

II. O MODELO DE PREVISÃO

O modelo de simulação adotado foi originado dos trabalhos de Silva e Costa [5]-[7]. Inicialmente, o ambiente é modelado a partir de um mapa bidimensional, onde todas as construções de um quarteirão são agrupadas e substituídas por sua envoltória convexa (poligonal). Em seguida cada polígono é extrapolado na direção vertical para formar o prisma reto que representa o quarteirão. O solo é suposto como plano e horizontal. Assim como os prismas (verticais), possui propriedades constitutivas (permissividade, permeabilidade, condutividade, rugosidade e dimensões) individuais. A atmosfera é modelada como uniforme e isotrópica, com atenuação da onda eletromagnética descrita

pela Recomendação ITU-R P.676-10 [8].

Cada árvore é modelada por tronco e copa, representados por cilindros retos concêntricos de raio e altura especificados. A copa se apoia no tronco. Postes de iluminação, distribuição de energia e de trânsito são representados como cilindros retos de raio e altura também especificados. Uma pesquisa foi realizada para melhor dispor as árvores e postes de forma a aproximar a representação computacional do ambiente a ser simulado.

O traçado de raios (RT) utiliza o método das imagens. Inicialmente, determina uma árvore de imagens para as projeções do transmissor (Tx), pontos de difração, árvores, postes e pontos de reflexão difusa. São geradas imagens até a oitava ordem de interação (reflexão especular) com o ambiente. São considerados os mecanismos de raio direto, refletido no solo e paredes verticais dos prismas, difração nas arestas verticais dos prismas, difração geodésica nos cilindros retos que representam troncos e postes, atenuação por copas de árvores, espalhamento difuso nas paredes rugosas e copas das árvores e bloqueios pelos prismas, troncos e postes, bem descritos em [5]-[7]. Posteriormente, os conjuntos de imagens são utilizados para gerar a representação 2½D dos raios traçados entre o transmissor e o Receptor (Rx). Isto é, estes novos raios consideram a diferença entre as alturas de: (1) Tx e Rx; (2) Tx e a imagem de Rx em relação ao solo (para determinar raios refletidos no mesmo). Entretanto, desprezam raios que se desenvolveriam acima das edificações.

Em função das altas perdas observadas nos mecanismos de difração e espalhamentos nesta faixa [3], o máximo de uma interação destes tipos são consideradas para cada raio traçado. Algumas técnicas de aceleração da simulação foram empregadas para otimizar o tempo de processamento [5].

Os diagramas de radiação do Tx e Rx são modelados pela combinação de um feixe Gaussiano axialmente simétrico e um lóbulo lateral constante,

$$G(\theta) = G_{max} e^{-4 \ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2} + G_o, \quad (1)$$

onde θ representa o ângulo entre a direção do raio desejado e o eixo do feixe, G_{max} é o ganho máximo e θ_{3dB} é a largura de feixe de meia potência (HPBW). Supondo que o ganho do lóbulo lateral G_o é muito pequeno, a normalização de (1), integrada sobre todo o ângulo sólido radiado pela antena, produz um relacionamento entre G_{max} e θ_{3dB} . O objetivo é simular antenas altamente diretivas, com um feixe principal que pode ser orientado para a direção desejada, como esperado para as antenas da tecnologia 5G [9].

A propagação dos campos eletromagnéticos ao longo dos raios é simulada com base em princípios teóricos fundamentais, em conjunto com aqueles da ótica geométrica (GO) e teoria uniforme da difração (UTD). Em particular, os mecanismos associados ao raio direto, a reflexões especulares, à difração em arestas verticais, à reflexão e difração em superfícies cilíndricas, à reflexão não especular em paredes rugosas, ao espalhamento em copas de árvores e à perda de percurso em copas de árvores são tratados de forma individual em [10]-[16], respectivamente, e, em conjunto, em [5]-[7].

III. A SIMULAÇÃO

No modelo de simulação, um canal é caracterizado pelas posições e orientações das antenas do Tx e Rx, pela polarização do campo radiado e o ambiente circundante. Em cada canal, a função de transferência $H(f)$ é estimada em uma faixa de frequências caracterizada como UWB. A faixa é discretizada em um grande número de frequências uniformemente espaçadas. Desta forma, $H(f)$ é calculada para cada frequência discretizada pela soma dos vetores complexos que representam os campos elétricos de todos os raios que partem do Tx e atingem o Rx. A resposta ao impulso é obtida pela aplicação da transformada rápida inversa de Fourier (IFFT) à função de transferência $H(f)$, o que permite determinar o perfil de potência e retardos (PDP) do canal. A potência recebida é obtida pela integração numérica do PDP sobre o domínio do retardo. O retardo médio e o espalhamento de retardo RMS são obtidos a partir do PDP e a XPD é calculada pela razão entre as potências recebidas associadas às componentes copolarizadas e de polarização cruzada do campo elétrico, conforme descrito em [3], [5], [11].

Na simulação, a técnica de Combinação de Feixes [17] é implementada pelo alinhamento dos eixos dos feixes principais das antenas do Tx e do Rx com as direções de partida (DoD) e chegada (DoA) do raio com o campo elétrico mais intenso, respectivamente. Ou seja, a transmissão e recepção atuam no sentido de proporcionar o máximo ganho nas direções do raio mais intenso do enlace.

O local escolhido para a simulação foi a Praça da República em Belém do Pará, mostrada na visão geral da Figura 1. A praça é bem arborizada e cercada por prédios de vários andares. Suas faces sul e norte possuem os mais altos prédios, com dezenas de andares. O Tx foi mantido em posição fixa, nas alturas de 3 m, 12 m e 30 m acima do solo. Esta variação foi realizada com o objetivo de avaliar os efeitos da propagação para o Tx abaixo, entre e acima da linha das copas. As dimensões das árvores da praça foram obtidas das campanhas realizadas por Silva e Siqueira [18], que estudaram a propagação em áreas com vegetação urbana, obtendo a altura total média de 20 m para as árvores. As copas começam na altura média de 3,8 m. As copas e troncos possuem diâmetros médios de 12,0 m e 0,5 m, respectivamente. O Rx foi deslocado ao longo de uma rota preestabelecida em intervalos uniformes de 20 m, sempre a uma altura de 1,5 m do solo, considerado plano. A Figura 2 descreve a geometria dos canais e a Tabela I mostra as posições dos transceptores, a distância entre Tx e Rx e o número de raios em cada canal simulado.



Fig. 1. Praça da República em Belém, Pará. Típico bosque urbano com árvores frondosas em suas bordas externas, com o predomínio de mangleiras (*M. Indica*), com vegetação mais esparsa em seu interior. Adaptado do Google Maps.

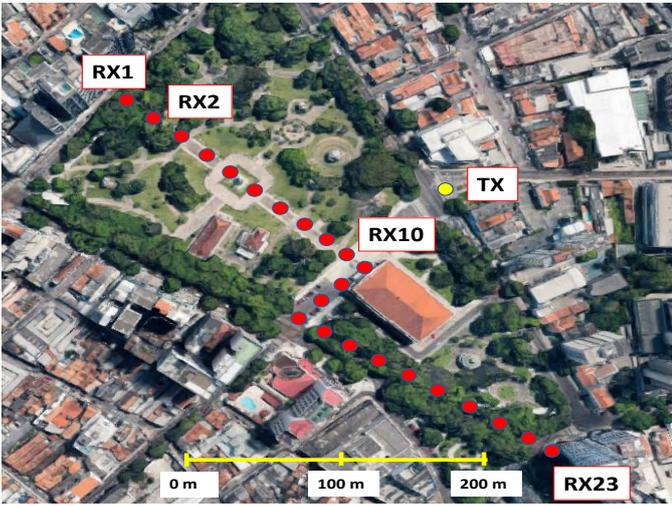


Fig. 2. Posições do Tx (círculo amarelo) e dos Rx ao longo da rota (círculos vermelhos). Adaptado do Google Maps.

TABELA I. POSIÇÕES DOS TX E RX; DISTÂNCIAS E NÚMEROS DE RAIOS ASSOCIADOS

Id	Posição	Dist. Tx- Rx (m)	No. Raios
TX	1 27 07 S 48 29 36 W	0	
Rx1	1 27 05 S 48 29 43 W	230,5	73256
Rx2	1 27 05 S 48 29 42 W	209,6	69444
Rx3	1 27 06 S 48 29 42 W	191,1	71852
Rx4	1 27 06 S 48 29 41 W	175,4	77984
Rx5	1 27 07 S 48 29 41 W	157,5	59738
Rx6	1 27 07 S 48 29 40 W	137,9	66082
Rx7	1 27 07 S 48 29 40 W	125,7	74016
Rx8	1 27 08 S 48 29 39 W	113,6	67160
Rx9	1 27 08 S 48 29 39 W	101,7	62878
Rx10	1 27 09 S 48 29 38 W	93,1	55462
Rx11	1 27 09 S 48 29 38 W	88,5	52770
Rx12	1 27 10 S 48 29 38 W	107,2	58914
Rx13	1 27 10 S 48 29 39 W	126,2	50228
Rx14	1 27 11 S 48 29 39 W	145,6	61988
Rx15	1 27 12 S 48 29 39 W	150,5	48656
Rx16	1 27 12 S 48 29 38 W	151,3	35780
Rx17	1 27 12 S 48 29 37 W	153,6	33654
Rx18	1 27 13 S 48 29 37 W	163,2	41662
Rx19	1 27 13 S 48 29 36 W	175	48004
Rx20	1 27 13 S 48 29 35 W	189,8	57840
Rx21	1 27 14 S 48 29 35 W	204	69210
Rx22	1 27 14 S 48 29 34 W	224	60580
Rx23	1 27 15 S 48 29 33 W	245,5	53308

O Tx está posicionado ao centro da face norte da praça, em local sem prédios ou árvores em um raio de 25 m. A praça é cercada de árvores frondosas em suas bordas externas, com vegetação mais esparsa em seu interior.

Os primeiros canais estão na borda oeste, em área com várias árvores. Em seguida, até o canal Rx9, a rota atravessa o centro da praça (com menos vegetação) e, nos próximos cinco canais,

pode-se constatar a perfeita linha de visada. A partir do canal Rx15, ocorre o bloqueio da visada por parte do prédio do Teatro da Paz, que é o maior prédio interno à praça. Os últimos cinco canais estão na borda sul da praça, cercados por árvores.

As simulações foram realizadas na frequência central de 26 GHz com um sinal UWB de largura de banda de 500 MHz. A Fig. 3 descreve a representação computacional do ambiente: os círculos verde e preto representam árvores e postes, respectivamente, e as projeções dos prismas são representadas por polígonos pretos.

As antenas do Tx e Rx possuem ganho máximo de 24 dBi e HPBW de 10°. A potência transmitida em todas as polarizações foi de 1 W. O solo e as paredes das construções possuem constante dielétrica $\epsilon_r = 3$, condutividade $\sigma = 15$ mS/m e rugosidade média $\sigma_h = 0,75$ mm. A atenuação específica devida a gases atmosféricos é $\gamma = 0,1$ dB/km e a atenuação específica devida a copas de árvores varia linearmente no intervalo [6,83 dB/m, 6,98 dB/m] ao longo da faixa de frequências, sendo modelada de acordo com [5] e [18]. O modelo de espalhamento difuso adotado foi o Misto, com o fator de diretividade $\alpha_R = 6$ [5]. Os postes têm altura de 10 m e diâmetro de 0,30 m [18]. Para cada canal simulado, os eixos dos feixes das antenas do Tx e Rx são alinhados às direções DoD e DoA do raio com maior intensidade de campo elétrico.

IV. RESULTADOS

A. Traçado de Raios

De acordo com a Tabela I, foi possível estabelecer que os canais que sofreram bloqueios da visada pelo teatro (Rx15-Rx20) tiveram um número significativamente menor de raios traçados que os canais próximos às bordas da praça (Rx21 a Rx23). Estes canais tiveram os maiores números de raios traçados, seguidos pelos canais localizados no meio da praça (Rx3 a Rx9), com menor vegetação, que apresentaram números variáveis. Estes números, em geral, se situam acima daqueles associados aos canais em visada, sem árvores próximas (Rx10-Rx14).

A Figura 4 mostra os raios traçados em alguns canais. Por questões de escala e conforto visual, nem todos os raios e elementos foram mostrados. O Tx e o Rx são representados por círculos grandes (vermelho e verde, respectivamente). Polígonos

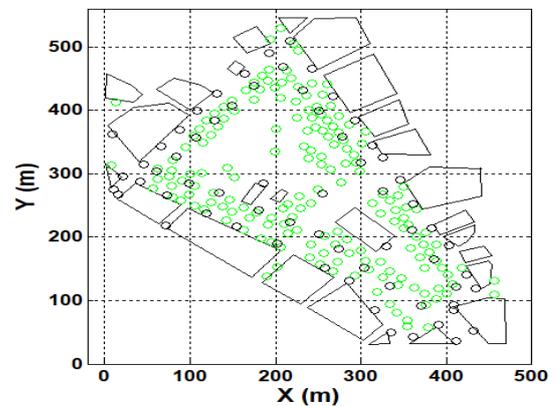


Fig. 3. Representação computacional do ambiente. Os círculos verde e preto representam árvores e postes, respectivamente. As projeções dos prismas são representadas por polígonos convexas pretos.

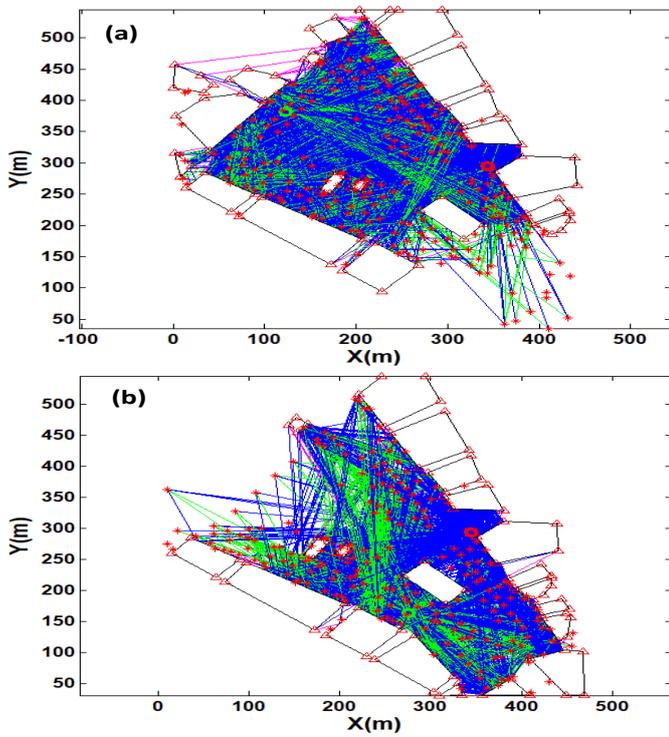


Fig. 4. Painel (a) apresenta o resultado do traçado de raios no canal Rx1, sendo Tx e Rx representados por círculos (vermelho e verde, respectivamente). Polígonos pretos representam as projeções dos prismas. Asteriscos e triângulos vermelhos representam espalhamentos e difrações, respectivamente. Os raios refletidos specularmente, difratados e submetidos a alguma forma de espalhamento (árvores, postes, paredes) são representados por linhas azuis, magenta e verde, respectivamente. O Painel 4(b) apresenta o resultado do traçado de raios no canal Rx17, usando a mesma convenção.

pretos representam as projeções dos prismas. Asteriscos e triângulos vermelhos representam espalhamentos e difrações, respectivamente. Os raios refletidos specularmente, difratados e submetidos a alguma forma de espalhamento (por árvores, postes, ou paredes rugosas) são representados por linhas azuis, magenta e verde, respectivamente. No Painel (a) da Fig. 4, observa-se o traçado de raios do canal Rx1, sendo possível notar que as construções em volta da praça agem de modo a confinar a energia em seu interior, refletindo os raios de volta à praça. É importante verificar a intensa contribuição da reflexão specular, assim como do espalhamento proveniente da grande quantidade de árvores, postes e superfícies rugosas que circundam o Rx1. No Painel (b), que representa o traçado de raios no canal Rx17, há o bloqueio da visada, sendo possível notar a importante contribuição dos espalhadores já citados para o campo elétrico recebido.

B. Potência Recebida nos Canais

Após o traçado de raios em cada canal, considerando a altura do Tx, são calculadas a função de transferência para as componentes copolarizadas (VV e HH) e de polarizações cruzadas (VH e HV) do campo. Em seguida, são calculadas suas potências, cuja razão é a XPD. O PDP é obtido aplicando a IFFT às respectivas funções de transferência de cada polarização.

A Fig.5 mostra a variação da potência recebida em cada canal (VV ou HH), considerando a altura do Tx acima do solo. Na simulação com o Tx a 3 m do solo, o canal Rx2 sofre o bloqueio

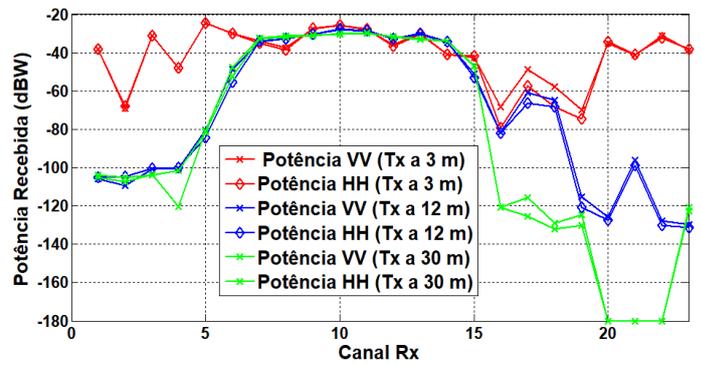


Fig. 5. Potências recebidas nas polarizações VV e HH e alturas do Tx acima do solo, para os 23 canais.

da visada por um tronco, o que diminui a potência recebida de aproximadamente 30 dB em relação à dos canais adjacentes. Nos canais centrais há grande variação provocada pela vegetação, que bloqueia parte dos raios que chegam aos canais. No canal Rx9 há maior correlação com os próximos cinco canais, que estão em visada. No canal Rx16 até o Rx19 o prédio do teatro bloqueia o raio direto causando forte queda na potência recebida. Com o Tx a 12 m os percursos dos raios interceptam as copas, sendo possível notar que nos canais das bordas e centrais há um forte decréscimo na potência recebida em ambas as polarizações e nos canais NLOS a potência recebida apresentou valores muito próximos. Na simulação com o Tx a 30m, houve um comportamento semelhante ao observado para 12m, entretanto houve uma forte queda nos canais depois do teatro pois os raios traçados em maiores alturas agora interagem com as copas que estão mais próximas aos receptores, ocasionando a forte queda na potência recebida.

C. Retardo Médio

A Fig. 6 ilustra os valores simulados para o retardo médio, usando apenas a componente vertical. Os canais iniciais apresentam altos valores que decrescem suavemente nos canais centrais até o Rx11, que possui a menor distância ao Tx. Em seguida, cresce suavemente à medida que aumenta a distância ao Tx. No canal Rx16, há um forte aumento, devido à inexistência de visada, o que permanece até o Rx20, que retoma o crescimento suave à medida que a distância Tx-Rx aumenta. Nas simulações com o Tx a 12 m e 30 m, houve um comportamento bastante semelhante desta métrica, com os canais sem visada apresentando os menores níveis e os demais com variações devidas às interações com os espalhadores.

D. Espalhamento de Retardo RMS

A fig. 7 mostra a variação do espalhamento de retardo RMS, fortemente afetado pelo tipo de raio que atinge ao Rx. Os mecanismos de raio direto e reflexão specular, em geral, têm maiores potências que raios oriundos do espalhamento ou difração, assim é possível notar na simulação com o Tx a 3 m, uma forte variação de seu valor em canais próximos de vegetação e sem visada, onde em geral a proporção de raios oriundos de espalhamento ou difração pode ser mais alta. Nos canais em visada, essa métrica possui os menores valores dentre todos os canais. Nas simulações com o Tx a 12 m e 30 m apenas os canais em visada apresentaram um comportamento suave e com os mesmos valores encontrados na simulação com o Tx a 3 m. Os

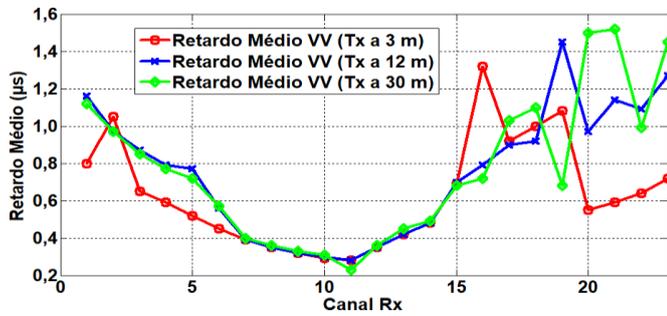


Fig. 6. Retardo Médio simulado em todos os canais, menores variações são observadas nos canais LOS.

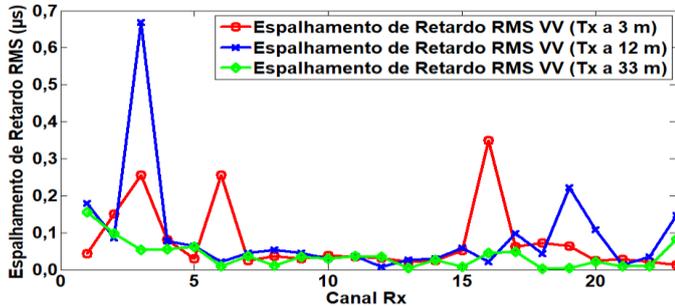


Fig. 7. Espalhamento de Retardo RMS nos canais, canais LOS sofrem pouca variação com a altura.

demais canais apresentaram fortes variações em função da interação com as copas das árvores.

E. XPD

A Fig. 8 ilustra o comportamento da XPD, que mostra efeitos inversos aos observados no espalhamento de retardo RMS. Isto é, seus valores aumentam com o predomínio do raio direto e refletido specularmente, atingindo seus maiores valores. É possível observar a forte variação desta métrica em função dos mecanismos predominantes em cada canal. De modo geral, os canais LOS e os NLOS bloqueados pelo teatro apresentaram menores variações.

V. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, ficou evidente que o desempenho das métricas analisadas apresentou melhores resultados nos canais com visada. As árvores e outros espalhadores podem causar fortes impactos na propagação do sinal UWB de sistemas operando na faixa de ondas milimétricas. O estudo prosseguirá

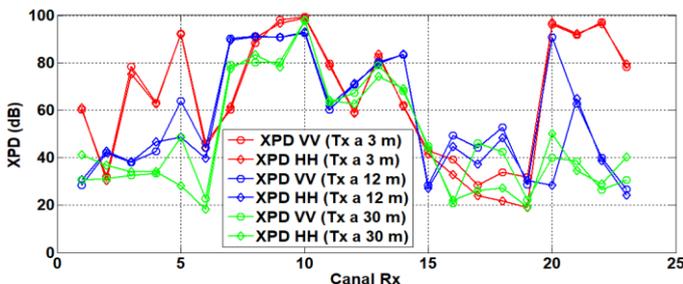


Fig. 8. XPD entre sinais copolarizados e cruzados. É possível notar forte variação, causada principalmente por árvores próximas aos receptores.

com a simulação do comportamento de canais em novas faixas e outros ambientes, assim como com a possível comparação com dados obtidos em campanhas de medidas.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Shafi, A. F. Molish, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, e G. Wunder, "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice," *IEEE Journal on Select. Areas in Comm.*, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, 2017.
- [2] M. C. Lawton e J. P. McGeehan, "The application of a deterministic ray launching algorithm for the prediction of radio channel characteristics in a small-cell environment," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 43, no. 4, pp. 955-968, 1994.
- [3] T. S. Rappaport, R. W. Heath Jr., R. C. Daniels, e J. N. Murdock, *Millimeter Wave Wireless Communications*. New York, NY, USA: Prentice Hall, 2015, pp. 83-135.
- [4] S. Salous, V. Degli-Esposti, F. Fuschini, D. Dupleich, R. Müller, R. S. Thomä, K. Haneda, J. M. M. G. Pardo, J. P. Garcia, D. P. Gaillot, M. Ne kovee, e S. Hur, "Millimeter-wave propagation: characterization and modelling toward fifth-generation systems," *IEEE Antennas and Propagat. Magaz.*, vol. 58, no. 6, pp.115-127, 2016.
- [5] J. C. Silva, "Modelo determinístico de propagação de ondas milimétricas em ambientes com alta densidade de espalhadores," Tese de Doutorado, CETUC/DEE, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2019.
- [6] J. C. Silva e E. Costa, "Modelo de propagação de ondas milimétricas em ambientes urbanos com alta densidade de espalhadores." In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBRT2017), vol. 1, pp. 383-387, São Pedro, SP, Brasil, 2017.
- [7] J. C. Silva e E. Costa, "UWB Millimeter wave propagation model for realistic outdoor environments: dense scatter by trees and non-specular scattering effects." In: 2018 IEEE AP-S and URSI USNC Joint Meeting (AP-S/URSI 2018), 2018, Boston, MA, USA, 2018.
- [8] International Telecommunication Union, *Attenuation by atmospheric gases, Recommendation ITU-R P.676-10*, Geneva, Switzerland, 2013.
- [9] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, e F. Gutierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-249, 2013.
- [10] H. W. Son, and N. H. Myung, "A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation model," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 8, pp. 1344-1350, 1999.
- [11] H. L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*. New York, NY, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
- [12] R. G. Kouyoumjian e P. H. Pathak, "A Uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfect conducting surface," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1461, 1974.
- [13] P. H. Pathak, W. D. Burnside, e R. J. Marhefka, "A uniform GTD analysis of the diffraction of electromagnetic waves by a smooth convex surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 28, pp. 631-642, 1980.
- [14] V. Degli-Esposti, "A diffuse scattering model for urban propagation prediction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 7, pp. 1111-1113, 2001.
- [15] R. F. S. Caldeirinha e M. O. Al-Nuaimi, "Propagation modelling of bistatic scattering of isolated trees for micro and millimeter wave urban microcells," In: 13th IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Comm., Lisboa, Portugal, 2002, pp. 135-139.
- [16] S. A. Torrico, H. L. Bertoni, e R. H. Lang, "Modeling tree effects on path loss in a residential environment," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, no. 6, pp. 872-880, 1998.
- [17] H. Yan, G. R. MacCartney Jr., S. Sun, e T. S. Rappaport, "5G millimeter-wave channel model alliance measurement parameter, scenario parameter, and measured path loss data list," NYU Wireless Rep. TR2016-002, New York University, New York, NY, USA, 2016.
- [18] J. C. Silva, G. L. Siqueira, e P. V. G. Castellanos, "Propagation model for path loss through vegetated environments at 700-800 MHz band," *Journal of Microw. Opt. and Electrom. Applic.*, vol. 17, no. 1, 2018.