Plataforma para Simulação de Mecanismos de Propagação em Canais Rádio Móveis Externos

Dayan Adionel Guimarães e Leonardo Luciano de Almeida Maia
Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel. Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil.
e-mail: {dayan,leomaia}@inatel.br

***Abstract*—Este artigo apresenta uma ferramenta didática para simulação dos principais mecanismos de propagação de sinais de radiofrequência em canais rádio móveis externos, utilizando o software VisSim/Comm. São simuladas a atenuação da potência recebida média em área em função da distância entre transmissor e receptor sob o modelo *multi-slope*, a variação da potência média local em torno da média em área, e a variação instantânea provocada pelo desvanecimento multipercurso. A plataforma conta com uma interface de configuração de vários parâmetros que afetam a propagação do sinal, bem como gráficos de apresentação de resultados e a possibilidade de que sejam exportados os valores de potência recebida e distância para que outras análises possam ser realizadas. Almeja-se que a plataforma proposta seja uma importante ferramenta de auxílio ao estudo sobre a propagação em grande e em pequena escalas no canal rádio móvel externo, servindo ainda para fundamentar conceitos análogos relacionados à propagação em canais internos.**

***Keywords*—Comunicações móveis, desvanecimento multipercurso, propagação, sombreamento, simulação, VisSim/Comm.**

I. Introdução

O expressivo aumento na demanda por serviços de comunicação móvel nos últimos anos é notório. Segundo a ITU (*International Telecommunications Union*), o número de dispositivos móveis em 2015 ultrapassou os 7 bilhões [1], e as estimativas de crescimento para os próximos anos são ainda mais surpreendentes. O VNI (*visual networking index*) da empresa Cisco publicou a previsão de que, em 2019, o número de dispositivos móveis chegará em 11,5 bilhões [2], isso sem considerar que o advento da quinta geração (5G) de sistemas de comunicação móvel celular previsto para o ano de 2020 [3] elevará ainda mais esses números. Se antevê também a integração dos sistemas 5G com a Internet das coisas (IoT, *Internet of things*) e a possibilidade de criar uma sociedade da informação totalmente conectada. Como exemplo, o projeto europeu 5GPPP (*5G infrastructure public, private partnership*), que congrega vários projetos de pesquisa, apresenta, dentre outros, o seguinte objetivo: ”criar uma rede ubíqua inteligente para o futuro da internet com o desafio de facilitar a implementação das redes de comunicação sem fio muito densas para conectar mais de 7 trilhões de dispositivos sem fio servindo mais de 7 bilhões de pessoas” [4].

Este trabalho foi parcialmente financiado 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.

Contudo, o aumento na demanda por serviços e as previsões de maciços aumentos nos números de terminais não poderão ser atendidos sob a atual política de alocação fixa de bandas, posto que o espectro de radiofrequências já se encontra congestionado. Há duas soluções com maior potencial de aplicação prática para este problema: a alocação de bandas de frequência na faixa de ondas milimétricas [5] e a adoção do conceito de rádio cognitivo [6]. A primeira trará novas bandas de frequência aos novos serviços de telecomunicações e a segunda permitirá o uso oportunista das faixas de frequência subutilizadas em dado instante de tempo e localização geográfica.

Seja no contexto da comunicação em ondas milimétricas ou de rádios cognitivos, os desafios quanto ao projeto dos sistemas de comunicação móvel são bastante grandes, principalmente devido à grande aleatoriedade do canal de comunicação sem fio. Neste ambiente, o grau de previsibilidade sobre a potência recebida em um dado instante e localização é baixo, e os sistemas tem que ser projetados para funcionar sob condições de grande variabilidade nessa potência e sob toda sorte de distorções e interferências. Torna-se então evidente a importância de se conhecer os fenômenos de propagação do sinal de radiofrequência em canais de comunicação móvel, para que se elevem as chances de sucesso no projeto de sistemas que sejam ao mesmo tempo robustos frente às adversidades impostas por esses canais e eficientes quanto ao uso dos recursos de comunicação.

Este artigo visa contribuir com esse conhecimento. Nele se apresenta uma ferramenta para simulação dos principais mecanismos de propagação de sinais de radiofrequência em canais rádio móveis externos. A ferramenta de simulação utilizada é o software VisSim/Comm [7], o qual tem forte apelo didático devido principalmente à simplicidade de sua interface com o usuário. São simuladas a atenuação da potência recebida média em área em função da distância entre transmissor e receptor sob o modelo de múltiplos expoentes de atenuação (*multi-slope*), a variação da potência média local em torno da média em área, conhecida como sombreamento (*shadowing*), e a variação instantânea provocada pelo desvanecimento multipercurso (*multipath fading*). A plataforma conta com uma interface de configuração de vários parâmetros que afetam a propagação do sinal, bem como gráficos de apresentação de resultados e a possibilidade de que sejam exportados os valores de potência recebida e distância para que outras análises possam ser realizadas. Almeja-se que a plataforma proposta seja uma importante ferramenta de auxílio ao estudo sobre

a propagação em grande e em pequena escalas no canal rádio móvel externo, servido ainda para fundamentar conceitos análogos relacionados à propagação em canais internos.

As demais seções do artigo estão organizadas como segue: na Seção II são abordados os fundamentos de propagação em pequena e larga escalas no canal de rádio móvel externo. A Seção III discorre sobre o modelo de perdas com múltiplos expoentes de atenuação. A plataforma de simulação e seus detalhes de funcionamento e configuração são apresentados na Seção IV. Na Seção V apresentam-se alguns resultados de simulações considerando diferentes parâmetros de configuração da plataforma. Finalmente, a Seção VI conclui o artigo e apresenta algumas oportunidades de estudos complementares.

II. Fundamentos de Propagação em Canais Rádio Móveis Externos

A análise da propagação de ondas de radiofrequência no canal rádio móvel externo se divide em duas abordagens: a propagação em larga escala e a propagação em pequena escala. Na análise em larga escala consideram-se as variações de potência de recepção denominadas média em área (*area-mean*) e média local (*local-mean*), sendo a primeira governada predominantemente pela distância entre transmissor e receptor e, em alguns casos, pela frequência de operação; a segunda é governada pela presença de obstáculos entre transmissor e receptor e normalmente está associada ao fenômeno de sombreamento (*shadowing*). Na análise em pequena escala consideram-se as variações instantâneas na potência do sinal recebido produzidas pelo desvanecimento por multipercurso.

Embora não haja uma definição amplamente aceita, o termo média local refere-se a médias de potência tomadas em intervalos espaciais de aproximadamente 10λ, onde λ representa o comprimento da onda eletromagnética transmitida. O termo média em área corresponde a médias tomadas em intervalos suficientes para que as variações de média local e instantâneas sejam eliminadas. Este intervalo normalmente corresponde a centenas de comprimentos de onda [8].

A. Propagação em Larga Escala

Considere o sistema de comunicação móvel celular ilustrado na Figura 1, o qual retrata um típico ambiente de comunicação onde a estação radiobase (ER) e o terminal móvel (TM) estão conectados por um canal sem fio. Observa-se que a linha de visada entre a ER e o TM está obstruída devido à presença de um obstáculo natural (montanha) e obstáculos artificiais (edificações no ambiente urbano). Esses obstáculos atenuam o sinal, causando perdas de potência. As perdas de potência também ocorrem pela dissipação de energia no meio, e dependem principalmente da frequência de operação do sistema e da distância entre transmissor e receptor [8].

No modelo de perdas por propagação no espaço livre, a atenuação de potência $L(d)$, em dB, em função da distância d entre transmissor e receptor, em metros, pode ser calculada através da equação de Friis

$$L\left(d\right) = 10\log\frac{P_T}{P_R} = 10\log\frac{16\pi^2 d^2}{G_T G_R \lambda^2}, \qquad (1)$$

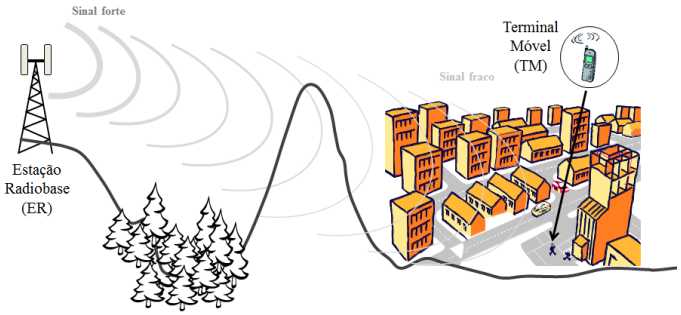

Fig. 1. Cenário de propagação em larga escala em um canal rádio móvel externo.

em que o logaritmo é na base 10, P_T e P_R são as potências nos terminais das antenas de transmissão e de recepção, respectivamente, G_T e G_R são os respectivos ganhos das antenas, e λ é o comprimento de onda, em metros.

Ao analisar a equação (1) pode-se concluir que a atenuação do sinal varia de forma diretamente proporcional ao quadrado da distância, o que equivale dizer que a potência do sinal recebido varia de forma inversamente proporcional ao quadrado da distância. Em outras palavras, no modelo de propagação no espaço livre, o fator de decaimento da potência de recepção é dado pelo expoente de atenuação igual a 2, ou seja, $n = 2$. Desse modo, quando voltamos a atenção para o cenário de propagação da Figura 1, fica explícito que não podemos utilizar a equação de Friis, devido à linha de visada estar obstruída. Neste caso, conclui-se que o expoente de atenuação n será certamente maior que 2.

No entanto, mesmo que se conheça o expoente de atenuação, permitindo assim que se calcule a potência média em área a uma dada distância do transmissor, a presença de obstáculos faz com que a potência média local varie em torno da média em área. Em outras palavras, a potência média local apresenta diferentes valores em diferentes pontos em que a distância entre transmissor e receptor é a mesma.

Há métodos que permitem estimar a potência do sinal recebido, tanto em termos de média em área quanto de média local. Eles são chamados de métodos de predição de cobertura (*coverage prediction*) ou métodos de predição de propagação (*propagation prediction*) e variam desde simples procedimentos, como o método conhecido como *log-distance* [9], até métodos sofisticados que fazem a análise do ambiente de propagação em três dimensões [8]. Devido à sua simplicidade, grande apelo didático e aplicabilidade prática, abordar-se-á aqui o método *log-distance* com detalhes. Nos referiremos a ele daqui em diante como método ou modelo simplificado, a depender do contexto.

O modelo simplificado tem raízes no modelo de dois raios (*two-ray model*) [10], [11], ilustrado graficamente pela Figura 2. O modelo de dois raios considera um sinal de recepção formado por um componente oriundo de uma linha de visada direta e um componente refletido no solo, sendo aplicável a sistemas de comunicação sem fio que utilizam torres altas e com predominância de visada direta entre transmissor e

receptor.

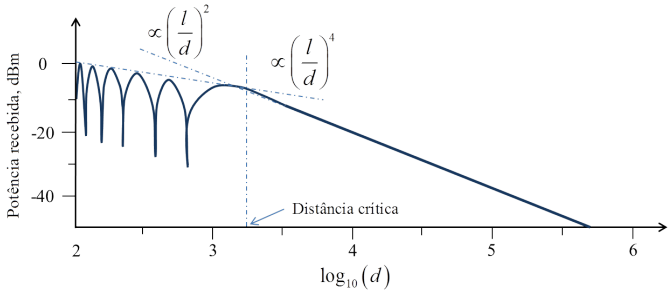

Fig. 2. Potência recebida em função da distância no modelo de dois raios [8].

Percebe-se na Figura 2 que há duas taxas de decréscimo na potência recebida $P_R(d)$, uma antes e outra após uma distância de referência denominada de distância crítica, ou distância de Fresnel. Antes da distância crítica, a intensidade do sinal varia devido as interferências construtivas e destrutivas resultantes da interação entre o sinal direto e o sinal refletido no solo, sendo que, na média, a taxa de decréscimo dessa potência é inversamente proporcional ao quadrado da distância d. Após a distância crítica, as variações desaparecem e o sinal passa a atenuar de forma inversamente proporcional à quarta potência da distância. A distância crítica, medida a partir do transmissor, é a distância onde a primeira zona de Fresnel toca o solo e seu valor aproximado, em metros, pode ser determinado por

$$d_c = \frac{4h_T h_R}{\lambda}, \tag{2}$$

em que h_T e h_R são as alturas, em metros, das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, em relação ao plano de reflexão [11].

Em ambientes que divergem das considerações de terra plana e propagação desobstruída do modelo de dois raios, há de se esperar que a taxa de variação da potência recebida seja similar àquela prevista pelo modelo de dois raios a distâncias menores que a distância crítica e sob visada direta. No entanto, a possibilidade de presença de obstáculos entre transmissor e receptor fará com que após a distância crítica o expoente de atenuação passe a ter valor dependente de cada ambiente em particular. O modelo simplificado faz uso desse fato e considera que a potência média em área, recebida a uma distância d do transmissor, cai de forma inversamente proporcional à n-ésima potência dessa distância, a partir de uma distância de referência $d_0 > d_c$. Pode-se então escrever que a atenuação da potência média em área, em dB, cai linearmente com a distância em escala logarítmica (daí o nome original *log-distance* para o modelo que estamos chamando de simplificado). Matematicamente, a atenuação, em dB, a uma dada distância d do transmissor segundo o modelo simplificado vale

$$\overline{\overline{L}}\,(d) = \overline{\overline{L}}\,(d_0) + 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right), \tag{3}$$

onde as duas barras denotam média em área.

O modelo simplificado pode ser melhorado adicionando-se à atenuação calculada em (3) uma parcela referente às variações de média local em torno da média em área. Tais variações, como já mencionado, contabilizam a influência de diferentes obstáculos entre transmissor e receptor, a qual faz com que a potência média local não seja a mesma em pontos à mesma distância do transmissor. Então, pode-se escrever que a atenuação média local à distância d é

$$\overline{L}\,(d) = \overline{\overline{L}}\,(d_0) + 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \tag{4}$$

sendo X_σ a variável aleatória que representa as variações de média local em torno da média em área. A barra simples em $\overline{L}\,(d)$ denota a média local, diferenciando-a assim da média em área $\overline{\overline{L}}\,(d)$. Medidas mostram que X_σ é tipicamente uma variável aleatória com densidade de probabilidade log-normal [12] de média nula e desvio padrão σ, em dB, este com valor praticamente independente de d. À variável X_σ dá-se comumente o nome de sombreamento log-normal (*log-normal shadowing*).

Convertendo-se as equações de atenuação (3) e (4) em potência de recepção, medida em dBm, tem-se respectivamente

$$\overline{\overline{P}}(d) = \overline{\overline{P}}\,(d_0) - 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right), \tag{5}$$

$$\overline{P}\,(d) = \overline{\overline{P}}\,(d_0) - 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma. \tag{6}$$

O modelo simplificado permite que se estime a atenuação ou a potência média em área $\overline{\overline{P}}(d)$, conhecendo-se o exponente de atenuação n e a atenuação ou a potência média em área à distância de referência d_0. Esta atenuação ou potência à distância d_0 pode ser medida na prática, ou calculada por meio da fórmula de Friis se até d_0 se tem uma propagação desobstruída. O exponente de atenuação n é normalmente estimado a partir da realização de algumas medidas na área de interesse. Como exemplo, admita que $\overline{P}_k$ seja a k-ésima medida de potência média local à distância d_k do transmissor, para $k = 1, 2, \ldots, K$. De posse da potência calculada ou medida à distância de referência, $\overline{\overline{P}}(d_0)$, se pode computar o erro quadrático médio (MSE, *mean squared error*) entre os valores de potência medidos e aqueles estimados por meio do modelo simplificado,

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\left[\left(\overline{\overline{P}}(d_0) - 10n\log\frac{d_k}{d_0}\right) - \overline{P}_k\right]^2. \tag{7}$$

O expoente de atenuação é estimado calculando-se a derivada $\varepsilon'(n)$ em relação a n, igualando-se $\varepsilon'(n)$ a zero e resolvendo-se a equação resultante em n, ou seja,

$$n = \arg_n\left[\varepsilon'(n) = 0\right]. \tag{8}$$

Embora o modelo simplificado não seja capaz de permitir que se estimem valores de potência ou atenuação média local, pode-se obter informações estatísticas importantes acerca desses valores, já que X_σ é uma variável aleatória Gaussiana (em escala logarítmica) de média nula e desvio padrão σ, em dB. A Figura 3 ilustra este conceito: imagine um terminal

móvel deslocando-se ao redor da estação radiobase, mantendo a distância d constante. Neste caso, por meio de (3) conclui-se que $\overline{\overline{L}}(d)$ será constante ao logo de todo o tempo de percurso em volta do transmissor, sendo também constante a potência média em área $\overline{\overline{P}}(d)$. A probabilidade da potência média local estar abaixo de um limiar de referência γ, por exemplo igual à potência mínima para se manter a comunicação com dada qualidade, ao longo da borda da área circular de raio d, corresponde à área hachurada da Gaussiana mostrada na Figura 3, a qual pode ser calculada como

$$\Pr\left[\overline{P}(d) < \gamma\right] = 1 - \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{\gamma - \overline{\overline{P}}(d)}{\sigma\sqrt{2}}\right). \tag{9}$$

Como extensão deste cálculo, a probabilidade da potência média local estar abaixo do limiar γ em toda a área circular de raio d pode ser calculada por como [9]

$$\begin{aligned}\Pr\left[\overline{P}(d) < \gamma\right] = 1 - \frac{1}{2}\Bigg[&\mathrm{erfc}(a) \\ &+ \exp\left(\frac{1-2ab}{b^2}\right)\mathrm{erfc}\left(\frac{1-ab}{b}\right)\Bigg],\end{aligned} \tag{10}$$

com $a = [\gamma - \overline{\overline{P}}(d)]/\sigma\sqrt{2}$ e $b = [10n\log(e)]/\sigma\sqrt{2}$. A probabilidade calculada por (9) pode ser interpretada como uma fração do perímetro de cobertura circular e a probabilidade (10) pode ser interpretada como fração da área de cobertura circular.

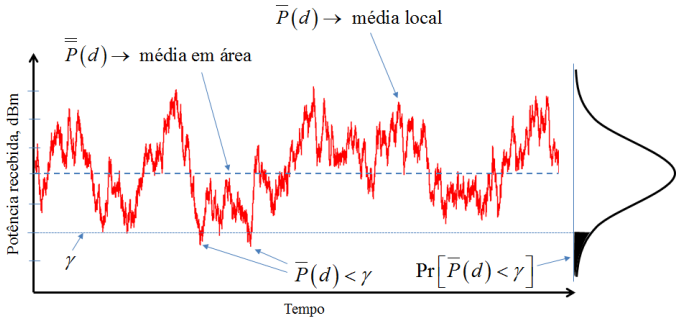

Fig. 3. Caracterização do sombreamento log-normal a partir do modelo simplificado.

Um questão que pode ser trazida à atenção é a aplicabilidade do modelo simplificado à faixa de frequências das ondas milimétricas, o que permitiria sua utilização no estudo e planejamento de sistemas 5G. Além das peculiaridades da propagação do sinal nessa faixa de frequências [13], [14], estudos mostram que os diâmetros das células neste sistemas serão drasticamente reduzidos [5],[15], destoando das situações típicas nas quais o modelo simplificado tem tido mais apelo prático. No entanto, tem importância teórica e prática a pesquisa sobre o grau de precisão na predição de cobertura com o modelo simplificado ou variações deste, como o modelo *multi-slope* [18], no contexto dos sistemas de comunicação em onda milimétricas, bem como a comparação dos resultados de predição com aqueles produzidos por modelos específicos tais como aqueles tratados em [16] e [17].

B. Propagação em Pequena Escala

O cenário representado pela Figura 4 ilustra a propagação em pequena escala. Em referência à Figura 1, este cenário pode ser interpretado como a região nas proximidades do terminal móvel. O sinal que chega ao terminal móvel é formado por várias componentes oriundas de diferentes percursos, os quais são formados pelos principais mecanismos de propagação:

- Visada direta (LoS, *line-of-sight*): corresponde ao sinal que percorre a menor distância entre a antena de transmissão da estação radiobase e a antena de recepção do terminal móvel, sem obstrução.
- Reflexão (*reflection*): ocorre quando o sinal incide em objetos com dimensões muito maiores que o comprimento da onda eletromagnética. Parte do sinal é absorvida pelo objeto, parte é refletida na direção do terminal móvel.
- Difração (*diffraction*): ocorre quando o sinal incide na borda de obstáculos, ponto onde são formadas frentes de onda secundárias que podem ter direção de propagação para o terminal móvel. A geração de frentes de onda secundárias é conhecida como princípio de Huygens-Fresnel.
- Espalhamento (*scattering*): ocorre quando o sinal incide em objetos com dimensões menores que o comprimento da onda eletromagnética, gerando múltiplas pequenas reflexões. Algumas dessas reflexões podem coincidir com a direção do terminal móvel.

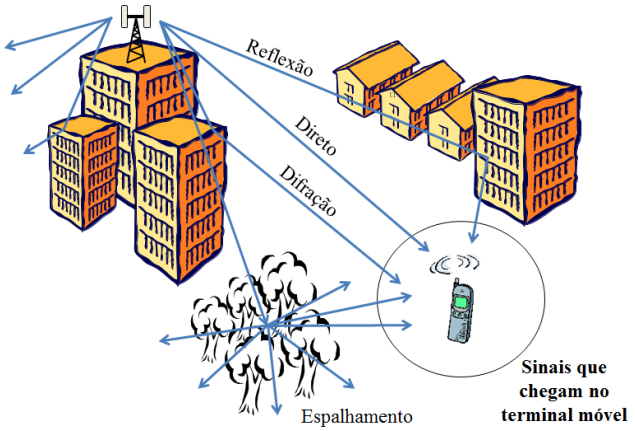

Fig. 4. Cenário de propagação em pequena escala em um canal rádio móvel externo.

Os diversos componentes do sinal recebido oriundos dos múltiplos percursos de propagação percorrem distâncias diferentes e chegam à antena receptora em instantes de tempo diferentes, e com amplitudes e fases diferentes. A superposição desses componentes pode ser construtiva ou destrutiva, causando variações no nível de potência do sinal recebido à medida que o receptor se move. A essas variações dá-se o nome de desvanecimento por multipercurso (*multipath fading*), as quais são classificadas como variações em pequena escala devido ao fato de serem percebidas ao longo de pequenas mudanças na posição do transmissor, do receptor ou de ambos. Ressalta-se que, mesmo na situação de transmissor e receptor

fixos, o desvanecimento por multipercurso pode ocorrer devido à movimentação de objetos que os circundam.

A Figura 5 ilustra os efeitos combinados das variações de potência recebida em pequena e grande escalas. A partir da distância de 50 metros do transmissor, hipoteticamente, a potência média em área cai de forma inversamente proporcional à n-ésima potência da distância. De acordo com (5), esta queda seria linear se expressa com o eixo das distâncias em escala logarítmica. Em torno da variação de potência média em área tem-se as variações de média local, estas produzidas pelo sombreamento. Por fim, em torno das variações de média local tem-se as variações instantâneas de potência recebida produzidas pelo desvanecimento por multipercurso. Este é melhor visualizado no gráfico da parte inferior da Figura 5, onde se pode perceber que as variações instantâneas de potência podem ser superiores a 30 dB. Pode-se ainda perceber que estas variações ocorrem de forma aproximadamente periódica em termos espaciais, com alternâncias entre vales e picos a cada meio comprimento de onda. Sendo assim, o desvanecimento por multipercurso ocorre mais rapidamente à medida que a velocidade de movimento do transmissor, do receptor, de ambos ou de objetos circundantes aumenta.

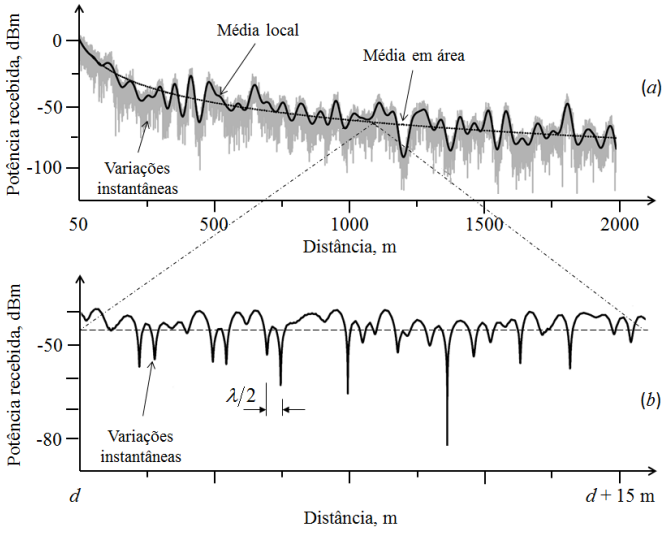

Fig. 5. Síntese dos efeitos de propagação em pequena e grande escalas [8]. O gráfico (*b*) corresponde à ampliação de um pequeno trecho do gráfico (*a*).

III. Modelo de Propagação com Múltiplos Expoentes de Atenuação

O modelo de propagação com múltiplos expoentes de atenuação, que pode ser também chamado de modelo multi-declive (*multi-slope model*), nada mais é do que uma generalização do modelo *log-distance*. Em vez da taxa de decréscimo da potência recebida ser constante para qualquer distância entre transmissor e receptor, no modelo multi-declive admite-se que a queda de potência média em área obedeça a uma função linear-por-partes (*piecewise linear*). Em outras palavras, em vez de um único expoente de atenuação n, admite-se que haja diferentes expoentes n_1, n_2, etc, cada um associado a um trecho de distâncias entre transmissor e receptor. A Figura 6 ilustra o modelo multi-declive, mostrando as variações de potência média em área combinadas com as variações de média local e instantâneas, sendo destacada a função linear-por-partes com três declives distintos que governa a variação de potência média em área dependente da distância.

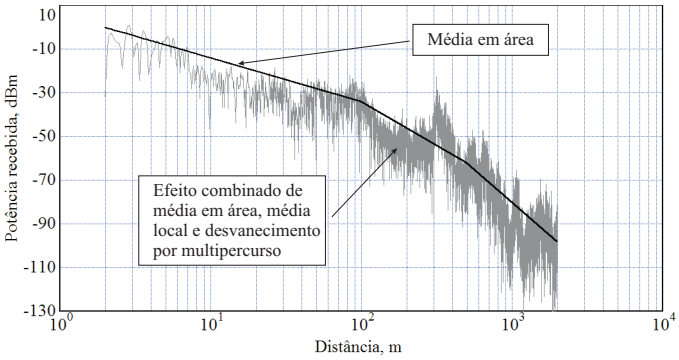

Fig. 6. Exemplo de potência recebida de acordo com o modelo multi-declive, com $n_1 = 2$, $n_2 = 4$, $n_3 = 6$, $\mathrm{BP}_1 = 100$ m, $\mathrm{BP}_2 = 500$ m.

A variação de potência média em área de forma linear-por-partes já é nitidamente percebida no modelo de dois raios, como ilustra a Figura 2. No entanto, vários estudos demonstraram que tal forma de variação se aplica a muitos casos, como exemplo [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]. Recentemente, em [18] os autores demonstram que as análises de capacidade e vazão de um sistema de comunicação sem fio são drasticamente afetadas em função do modelo de propagação em grande escala adotado, fato especialmente verdadeiro em redes muito densas, característica que será marcante nas redes 5G. A adoção do modelo multi-declive demonstrou ser significativamente mais realista, motivando que análises similares ou relacionadas àquelas em [31] também adotem tal modelo.

Na modelagem multi-declive, não é trivial determinar quantos expoentes de atenuação melhor representam o cenário de propagação sob análise, quais são os valores desses expoentes e em que locais estão os pontos de quebra (conhecidos na literatura como *breakpoints, change-points, joint-points, joinpoints* ou *knots*) da função linear-por-partes. Exemplos de abordagens e ferramentas específicas para resolver este problema são [32], [33], [34], [35], [36], [37].

IV. Plataforma para Simulação de Mecanismos de Propagação em Canais Rádio Móveis Externos

A plataforma descrita nesta seção simula as variações de potência de recepção média em área, média local e instantânea, em dBm, em função da distância entre transmissor e receptor, em metros, a partir de uma distância de referência também em metros. Ela foi desenvolvida com o software VisSim/Comm, que é uma ferramenta computacional para simulação de sistemas dinâmicos [7]; o seu arquivo executável pode ser obtido em [38].

A. Descrição Geral

A Figura 7 apresenta o diagrama de blocos geral da plataforma. Observa-se que se optou por utilizar termos em Inglês para denominar os blocos e, posteriormente, os parâmetros de configuração da simulação, de forma a manter consistência com denominações de blocos nativos do software VisSim/Comm. A área identificada como Ⓐ na Figura 7 é responsável por simular a atenuação do sinal a partir da distância de referência, sendo por isto denominada de atenuação incremental. A queda de potência média em área segue o modelo multi-declive, com até três expoentes de atenuação com valores e pontos de quebra configuráveis. A área identificada como Ⓑ simula o efeito das variações de potência média local (sombreamento), as quais tem média nula e densidade de probabilidade log-normal com desvio padrão e correlação espacial configuráveis. A área identificada como Ⓒ simula as variações instantâneas de potência referentes ao desvanecimento por multipercurso, as quais seguem a distribuição exponencial (distribuição de Rayleigh para a magnitude e uniforme para a fase do sinal recebido), com taxa de variação configurável por meio do espalhamento Doppler.

Além de simular as variações de potência de recepção, a plataforma permite que os valores gerados sejam armazenados em arquivos `.dat` para posterior análise, o que é realizado pela área identificada como Ⓓ. São exportados os valores referentes ao sombreamento log-normal, isoladamente, à variação de potência média em área programada (teórica), também isoladamente, e aos valores de potência do sinal recebido e correspondentes distâncias, subamostrados dos valores simulados. A subamostragem é realizada de forma configurável e permite que se simule a leitura de um banco de dados de amostras do sinal capturado por um terminal móvel de prova ao longo das vias em uma determinada área de interesse.

A área identificada como Ⓔ tem por objetivo demonstrar como um sinal recebido composto de variações de potência média em área, média local e instantânea pode ser analisado isolando-se cada um desses componentes por meio de filtragem. Este tipo de análise é comum na prática para se caracterizar estatisticamente cada componente.

O bloco na região central da Figura 7 é onde se faz a configuração da plataforma de simulação. Ao se abrir tal bloco é apresentada a caixa de diálogo mostrada Figura 8. Os parâmetros de configuração são descritos a seguir.

- Habilitar desvanecimento (*Enable fading*): quando esta opção é marcada, a potência de recepção simulada contém variações instantâneas devido ao desvanecimento por multipercurso.
- Espalhamento Doppler: se a opção que habilita o desvanecimento estiver marcada, o espalhamento Doppler, em hertz, configurará a taxa de variação do desvanecimento por multipercurso.
- Habilitar sombreamento (*Enable shadowing*): quando esta opção é marcada, a potência de recepção simulada contém variações médias locais devido ao sombreamento log-normal.
- Desvio padrão (*Standard deviation*): se a opção que habilita o sombreamento estiver marcada, o desvio padrão, em decibéis, configurará a dispersão da potência média local em torno da potência média em área.
- Distância de descorrelação (*Decorrelation distance*): se a opção que habilita o sombreamento estiver marcada, a distância de descorrelação, em metros, configurará a taxa de variação espacial do sombreamento. Em outras palavras, quanto maior a distância de descorrelação, mais correlacionadas serão sucessivas amostras do sombreamento distantes. A distância de descorrelação é definida como a distância em que a função de autocorrelação normalizada do processo de sombreamento atinge o valor de um dado limiar, tipicamente $1/e \approx 0,368$ [18], [39], que foi o valor adotado na plataforma.
- Distância de referência (*Reference distance*): é a distância, em metros, a partir da qual a potência recebida cai segundo a função linear-por-partes do modelo de perdas multi-declive. Sua definição é idêntica àquela referente a d_0 no modelo simplificado de único declive; veja equação (5) e texto que a segue.
- Potência à distância de referência (*Power at reference distance*): é a potência média em área, em dBm, medida ou calculada na distância de referência, d_0. Sua definição é idêntica àquela referente a $\overline{\overline{P}}(d_0)$ no modelo simplificado de único declive; veja equação (5) e texto que a segue.
- Expoentes de atenuação (*Loss exponents*) n_1, n_2 e n_3: configuram as taxas de decréscimo da potência média em área nos segmentos de reta que compõem a função linear-por-partes do modelo multi-declive. Suas definições são análogas à definição de n no modelo simplificado; veja equação (3) e texto que a precede. Veja também a Figura 6, na qual $n_1 = 2$, $n_2 = 4$ e $n_3 = 6$.
- Pontos de quebra (*Breakpoints*) BP_1 e BP_2: definem as distâncias do transmissor, em metros, nas quais ocorrem as mudanças de declividade na queda de potência média em área no modelo multi-declive. São os pontos de inflexão da correspondente função linear-por-partes; veja ilustração na Figura 6, na qual $\mathrm{BP}_1 = 100$ m e $\mathrm{BP}_2 = 500$ m. Por definição, $\mathrm{BP}_2 \geq \mathrm{BP}_1$, sendo que a configuração $\mathrm{BP}_1 = \mathrm{BP}_2$ estabelece apenas um ponto de quebra, ou seja, permite simular dois declives de atenuação da potência média em área. Independentemente dos valores de BP_1 e BP_2, tem-se apenas um declive de atenuação quado $n_1 = n_2 = n_3$.
- Habilitar gráfico e exportação (*Enable plot and export*): quando esta opção é marcada, os valores da potência de recepção, em dBm, são mostrados em um gráfico similar à Figura 6. Estes valores são subamostrados e exportados para o arquivo `Potências.dat`, assim como são exportados para o arquivo `Distâncias.dat` os correspondentes valores de distância, e para o arquivo `Declives.dat` os correspondentes valores de potência média em área sobre a função linear-por-partes do modelo multi-declive. Os valores isolados de sombreamento são sempre exportados para o arquivo `Sombreamento.dat`, sem subamostragem

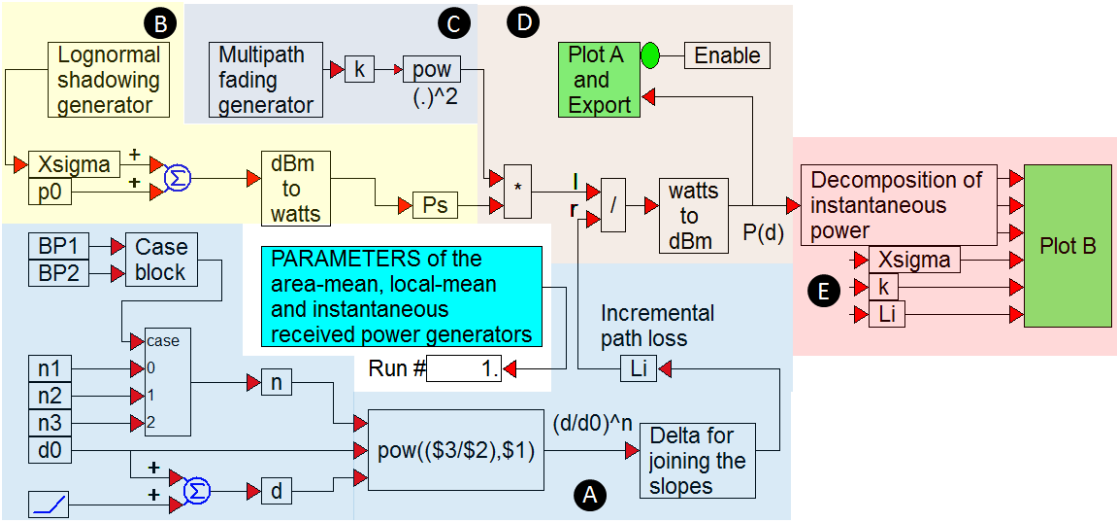

Fig. 7. Cópia da área de trabalho do VisSim/Comm referente à plataforma de simulação de efeitos de propagação em canais rádio móveis externos.

(neste caso, o número de amostras é determinado pela multiplicação entre o tempo de duração da simulação, T, e a frequência de simulação, f_s). Tais valores correspondem à variável X_σ log-normal de média nula e desvio padrão σ da equação (4).

- Número de execuções (*Number of runs*): o valor inteiro configurado para este parâmetro determina quantas vezes a simulação será repetida, sem interrupção. Neste caso o arquivo `Sombreamento.dat` é sobrescrito e, se a opção de exportação estiver marcada, os novos valores de potência e distância serão concatenados àqueles previamente armazenados nos arquivos `Potências.dat`, `Distâncias.dat` e `Declives.dat`.
- Número de amostras a exportar (*Number of samples to export*): configura quantas amostras serão armazenadas em cada um dos arquivos `Potências.dat`, `Distâncias.dat` e `Declives.dat`, a cada execução da simulação.
- Método de subamostragem (*Sub-sampling method*): quando são colhidas amostras de sinal recebido durante campanhas de medidas para caracterização da propagação, normalmente a separação espacial entre elas é pequena o suficiente para que se possa caracterizar o desvanecimento por multipercurso, inclusive. Isto resultará em um elevado número total de amostras armazenadas no banco de dados de medidas. Entretanto, como a taxa de variação espacial das amostras referentes ao desvanecimento é normalmente muito maior que aquela referente às variações de potência média local e média em área (veja Figura 5), menos amostras são necessárias para a caracterização dessas duas últimas. De forma a simular a leitura do banco de dados em diferentes formas, quatro métodos de subamostragem foram definidos na plataforma de simulação: método 1 – amostras igualmente espaçadas em escala logarítmica; método 2 – amostras igualmente espaçadas em escala linear; método 3 – amostras espaçadas com distribuição de Poisson em escala linear; método 4 – amostras com espaçamento denso-esparso-denso de Poisson em escala linear. Os métodos 1 e 2 foram criados para determinar qual a escala do eixo de distâncias, logarítmica ou linear, deveria ser usada como referência. O método 3 simplesmente simula um distribuição Poissoniana entre as amostras com o eixo da distância em escala linear. O método 4, que é uma variação do terceiro, implementa a possibilidade de aumentar a densidade de amostragem em partes dos valores de distância, podendo ser no início, no final ou em ambas as partes. O método 1 gera amostras com alta densidade espacial no início da faixa de distâncias em escala logarítmica, diminuindo a densidade à medida que a simulação se aproxima do final da faixa. Os métodos 2, 3 e 4 geram, respectivamente, amostras igualmente espaçadas, com distribuição poissoniana e com distribuição poissoniana densa-esparsa-densa, com o eixo das distâncias em escala linear.
  Ainda com referência ao método 4, p_I e p_F representam as frações da distância total, respectivamente no início e no final da faixa total, em que a taxa de chegada das amostras com distribuição Poissoniana, R_2, é K vezes maior que a taxa de chegada das amostras na faixa remanescente, R_1. Por meio das relações

$$p_I R_2 T + p_F R_2 T + (1 - p_I - p_F) R_1 T = N, \qquad R_2/R_1 = K, \tag{11}$$

  sendo T a duração de uma execução da simulação, a taxa R_1 pode ser determinada por

$$R_1 = \frac{N}{T\left[(p_l + p_f)\,K + (1 - p_l - p_f)\right]}. \tag{12}$$

As subseções a seguir apresentam mais detalhes sobre cada uma das partes demarcadas na Figura 7.

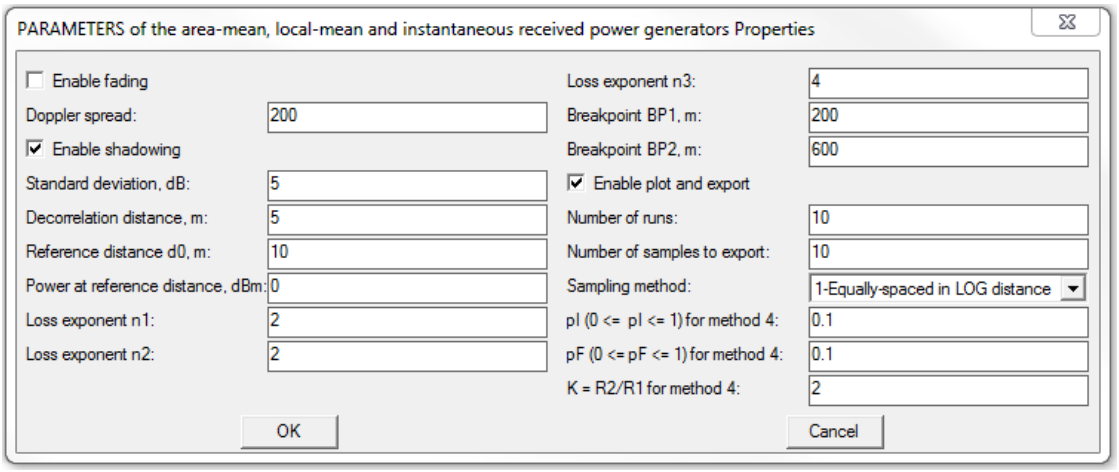

Fig. 8. Parâmetros de configuração da plataforma de simulação.

B. Atenuação Incremental da Potência Média em Área

A Figura 9 apresenta os blocos identificados com Ⓐ na Figura 7, os quais simulam a atenuação incremental média em área do canal a partir da distância de referência d_0. As partes identificadas com $Ⓐ_1$, $Ⓐ_2$, $Ⓐ_3$ e $Ⓐ_4$ são detalhadas a seguir.

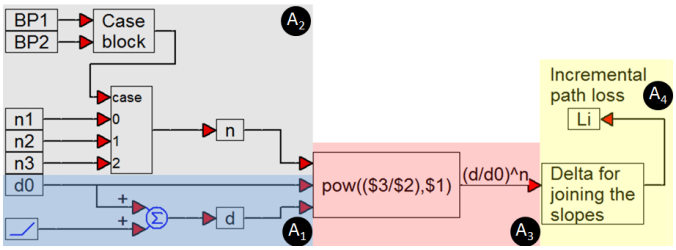

Fig. 9. Geração da atenuação incremental da potência média em área.

O conjunto de blocos $Ⓐ_1$ na Figura 9 gera os valores de distância d, em metros, a cada amostra da simulação (a cada 0,1 segundo), a partir da distância inicial d_0, até a distância final que é dependente do tempo de simulação T, em segundos, este configurado no VisSim/Comm a partir da aba *System*, opção *System Properties*, parâmetro *End*. O bloco gerador de rampa foi arbitrariamente configurado com seu parâmetro *slope* igual a 100, estabelecendo que a distância final, em metros, seja dada por $d_{\text{final}} = d_0 + 100T$.

O conjunto de blocos $Ⓐ_2$ na Figura 9 recebe os expoentes de atenuação n_1, n_2 e n_3, e pontos de quebra BP_1 e BP_2 configurados pelo usuário, passando à parte $Ⓐ_3$ o expoente n válido a cada valor de distância. A Figura 10 mostra mais detalhes do conjunto de blocos $Ⓐ_2$, exemplificando a situação em que $n = n_2$, situação esta que ocorre para valores de distância entre os pontos de quebra, ou seja, para $\text{BP}_1 \leq d < \text{BP}_2$. Analogamente, $n = n_1$ para $d < \text{BP}_1$ e $n = n_3$ para $d \geq \text{BP}_2$. O bloco `Case`, nativo do VisSim/Comm, transfere para sua saída o que se encontra na entrada de número z, se à vari
ável de entrada `case` recebe o valor z.

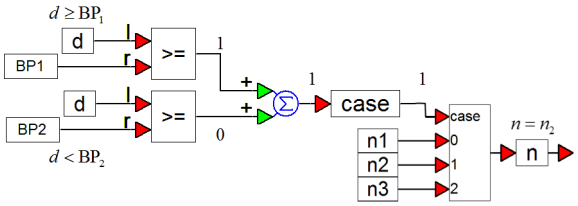

Fig. 10. Lógica de seleção do expoente de atenuação na parte $Ⓐ_2$, com exemplo para $n = n_2$.

O bloco $Ⓐ_3$ na Figura 9 é um bloco nativo do VisSim/Comm que gera em sua saída o resultado computado por uma expressão que opera sobre suas entradas, em sintaxe da linguagem `C`. No caso tem-se a expressão `pow(($3/$2),$1)`, a qual realiza o cômputo de $(d/d_0)^n$. Esta é a atenuação incremental, em escala linear, que é somada à atenuação até a distância de referência d_0, conforme se pode concluir por meio da equação (3).

A parte identificada como $Ⓐ_4$ na Figura 9 completa o cálculo da atenuação incremental, garantindo que os diferentes declives de queda de potência média em área determinados por n_1, n_2 e n_3 formem de fato uma função linear-por-partes contínua. A necessidade deste procedimento pode ser notada na Figura 11, na qual os dois declives de potência $\propto (d/d_0)^{n_1}$ e $\propto (d/d_0)^{n_2}$ formariam uma descontinuidade se comutados no ponto BP_1. Para que esta descontinuidade não ocorra, o valor $10 \log \Delta_1$ deve ser adicionado aos valores de potência prescritos pelo declive $\propto (d/d_0)^{n_2}$ a partir de BP_1. Em escala linear, isto equivale a dividir a atenuação incremental $(d/d_0)^{n_2}$ por Δ_1, cujo valor é

$$\Delta_1 = \left(\frac{\text{BP}_1}{d_0}\right)^{(n_2 - n_1)} \tag{13}$$

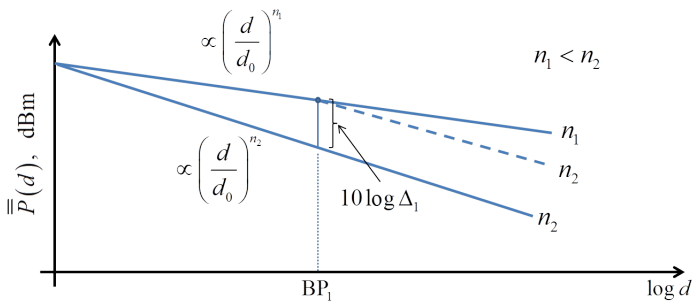

Fig. 11. Ilustração do papel da constante Δ_1.

Por analogia, considerando agora a junção dos declives de potência no ponto de quebra BP_2, uma constante $10\log\Delta_2$ deve ser também adicionada aos valores de potência prescritos pelo declive $\propto (d/d_0)^{n_3}$ a partir de BP_2. Equivalentemente, a atenuação incremental $(d/d_0)^{n_3}$ deverá ser dividida por Δ_2, cujo valor é

$$\Delta_2 = \left(\frac{\mathrm{BP}_2}{d_0}\right)^{(n_3-n_2)} \tag{14}$$

A Figura 12 apresenta detalhes do bloco `Delta for joining the slopes` da parte identificada como Ⓐ₄ na Figura 9. A Figura 13 detalha a parte interna do bloco `Cte1` da Figura 12, o qual corresponde à realização da equação (13). Por analogia, calcula-se o valor de `Cte2`, o qual corresponde à realização da equação (14), respectivamente.

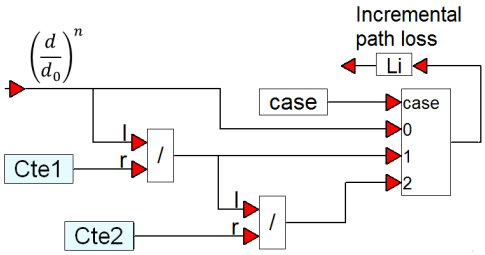

Fig. 12. Detalhamento do bloco `Delta for joining the slopes`.

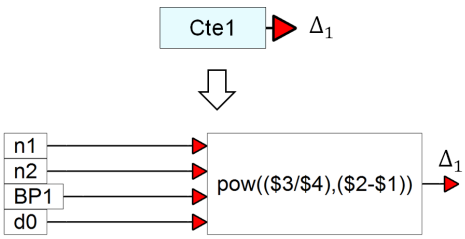

Fig. 13. Bloco de cálculo da constante Δ_1.

C. Sombreamento e Potência à Distância de Referência

Os blocos identificados com Ⓑ na Figura 7 simulam o efeito combinado do sombreamento log-normal, correspondente a variável aleatória X_σ, e da potência média em área recebida à distância de referência, $\overline{\overline{P}}(d_0)$, ambos termos da equação (6). Como esses termos são gerados na plataforma para representar valores de potência em dBm, a soma $\overline{\overline{P}}(d_0) + X_\sigma$ é convertida para valores em watts, para que subsequentemente sejam afetados pelo desvanecimento por multipercurso, que é multiplicativo [8, p. 211], e então divididos pela atenuação incremental descrita na Subseção IV-B. O sinal gerado pelos blocos em questão é governado pelo valor configurado de potência média em área à distância de referência, pela correlação espacial entre as amostras, que define a taxa de variação espacial do sombreamento, e pelo seu desvio padrão, que define a dispersão de potência média local em torno da potência média em área.

A Figura 14 detalha o bloco `Lognormal shadowing generator`. As amostras da variável aleatória referente ao sombreamento são geradas por meio de filtragem passa-baixas das amostras de ruído branco Gaussiano por um filtro auto-regressivo (AR, *auto-regressive*) de primeira ordem (AR-1) [40, Capítulo 12], como ilustra a Figura 15.

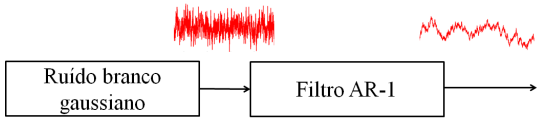

Fig. 15. Geração do sombreamento por filtragem do ruído branco Gaussiano.

O bloco `Noise` na parte inferior esquerda da Figura 14 é nativo do VisSim/Comm e gera amostras aleatórias de ruído branco Gaussiano de média nula e com densidade espectral de potência de 10^{-3} watts/hertz, o que corresponde a uma variância (potência) unitária, já que a frequência de simulação é de $f_s = 1000$ hertz. O ruído branco Gaussiano é então aplicado à entrada do filtro AR-1, o qual é detalhado na Figura 16. Tal filtro possui resposta ao impulso infinita (IIR, *infinite impulse response*) e é caracterizado pela equação diferença de primeira ordem [40, Capítulo 12]

$$y_i = ay_{i-1} + x_i, \tag{15}$$

em que y_i representa a i-ésima amostra do sinal de saída, x_i representa a i-ésima amostra do sinal de entrada e a é o coeficiente que controla a correlação entre as amostras de saída. A resposta ao impulso de tempo discreto do filtro AR-1 é $h_i = a^i u_i$, em que u_i representa a função degrau unitário. Então, a função de transferência do filtro é $H(z) = 1/\left(1 - az^{-1}\right)$, onde $|z| > |a|$ é a região de convergência. Observa-se que essa função de transferência terá um único polo em $z = a$, e o que se faz é dimensionar o coeficiente a de forma que o sinal Gaussiano de saída que representará o sombreamento apresente a função de autocorrelação espacial desejada, $R(\delta) = e^{-|\delta|/d_d}$, sendo d_d a distância de descorrelação (ver Seção IV). Essa função é amplamente adotada na literatura, tendo-se verificado que adere de forma precisa a medidas em campo [41].

Se a separação entre sucessivas amostras do ruído Gaussiano é L metros, o coeficiente é dado por $a = e^{-L/d_d}$ [42]. Na plataforma, a frequência de simulação é tal que são geradas 10

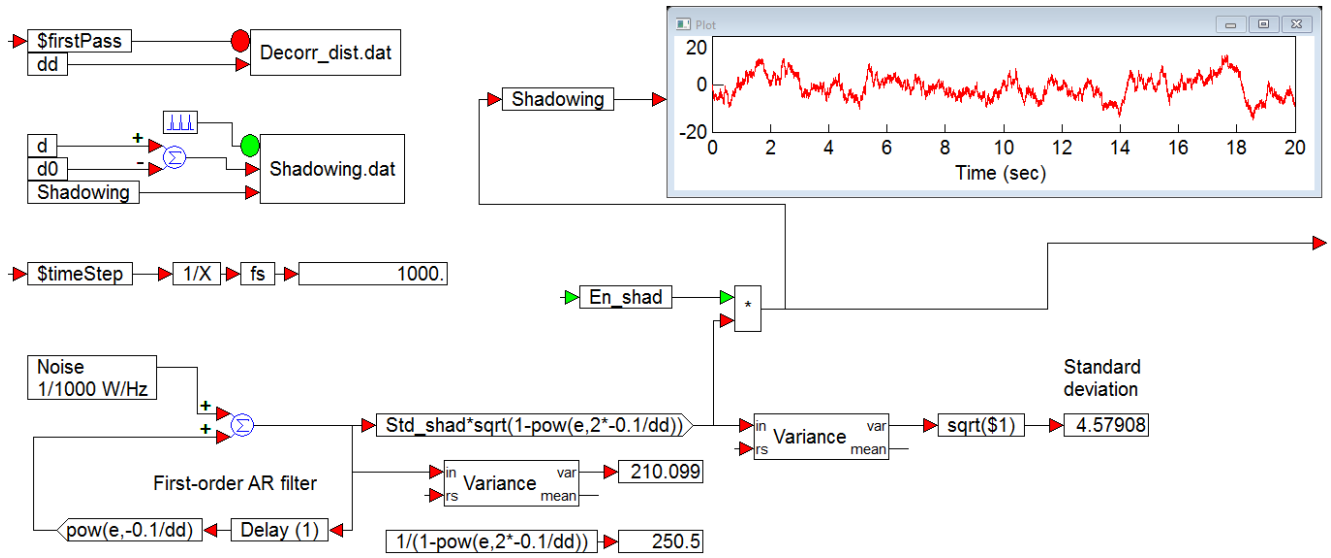

Fig. 14. Detalhamento do bloco `Lognormal shadowing generator` da área identificada com Ⓑ na Figura 7.

amostras por metro ao longo da faixa de distâncias configurada. Assim, a separação entre tais amostras é de 0,1 segundo e, portanto, $a = e^{-0,1/d_d}$.

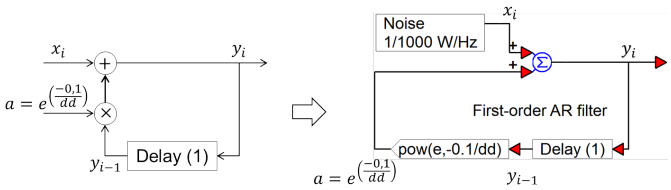

Fig. 16. Diagramas do filtro AR-1 e de sua implementação no VisSim/Comm.

A distância de descorrelação d_d determina o grau de correlação espacial entre sucessivas amostras do sombreamento [20], [43], [44], [45], [46]. Quanto menor for d_d, menos correlacionadas serão tais amostras. Imaginando uma situação extrema, apenas para facilitar o entendimento, se $d_d = 0$ então na saída do filtro AR-1 têm-se a próprias amostras descorrelacionadas do ruído, ou seja, se $a = 0$ tem-se $y_i = x_i$. Por outro lado, valores maiores de d_d levam a maiores valores de a, fazendo com que a amostra atual x_i seja somada a uma amostra anterior y_i de maior amplitude; esta maior influência de amostras anteriores na amostra atual produz maior correlação entre amostras adjacentes do sombreamento.

A relação entre a variância σ_x^2 do sinal de entrada do filtro AR-1 e a variância σ_y^2 do sinal de entrada do filtro é [40, Capítulo 12]

$$\sigma_y^2 = \frac{\sigma_x^2}{1 - a^2}. \tag{16}$$

Como mencionado, na plataforma a variância do ruído de entrada do filtro AR-1 foi configurada com valor unitário. Assim, para que se obtenha o sombreamento com o desvio padrão σ configurado na caixa de diálogo mostrada na Figura 8, primeiro multiplica-se o sinal de saída do filtro AR-1 por $\sqrt{1 - a^2}$, o que resulta em um sinal com variância unitária (lembre-se que a multiplicação de um sinal por uma constante faz com que sua variância seja multiplicada pelo quadrado da constante). Em seguida multiplica-se este sinal por σ, o que resulta em um sinal com a variância desejada σ^2. Na Figura 14, na parte inferior esquerda, pode-se notar que o sinal de saída do filtro AR-1 está sendo de fato multiplicado por $\sigma\sqrt{1 - a^2}$, que corresponde à expressão `Std_shad*sqrt(1-pow(e,2*-0.1/dd))` no bloco de ganho subsequente ao filtro.

Quando a opção *Enable shadowing* estiver marcada na caixa de diálogo da Figura 8, a variável `En_shad` na parte central da Figura 14 será igual a 1, fazendo com que a variável aleatória que representa o sombreamento, em dBm, seja adicionada à potência média em área recebida à distância de referência, também em dBm. Em seguida o resultado é convertido para escala linear e carregado na variável `Ps`.

Todas as amostras do sombreamento log-normal são armazenadas no arquivo `Sombreamento.dat`. O número de amostras geradas é dado por $f_s T$, sendo T a duração da simulação, em segundos. Essa duração corresponde ao parâmetro `End` na aba `Range` da caixa de diálogo `System Properties`, a qual é acessada por meio da aba `System` no menu principal do VisSim/Comm. A duração da simulação pode ser alterada como se queira, mas recomenda-se que a frequência de simulação seja sempre mantida em $f_s = 1000$ hertz, sob pena de se alterar o funcionamento de outras partes da simulação que foram projetadas para operar com essa frequência.

D. Desvanecimento por Multipercurso

Na parte identificada como Ⓒ na Figura 7 estão os blocos que simulam o desvanecimento por multipercurso, o qual

provoca variações em pequena escala na potência do sinal recebido. A variável k na saída do bloco `Multipath fading generator` representa a magnitude do desvanecimento, a qual varia de acordo com a distribuição de Rayleigh. Portanto, para produzir as variações de potência em pequena escala multiplicam-se os valores de potência média local vindos da variável `Ps` identificada na parte Ⓑ da Figura 7 por k^2, já que as variações de potência são proporcionais ao quadrado das variações de magnitude.

A Figura 17 detalha o bloco `Multipath fading generator`. O bloco `Mag/phase to complex`, que é

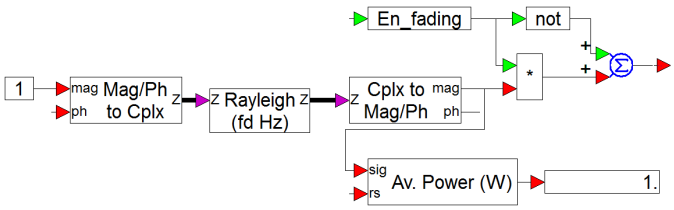

Fig. 17. Detalhamento do bloco `Multipath fading generator` da área identificada com Ⓒ na Figura 7.

nativo do VisSim/Comm, agrupa os sinais aplicados às suas entradas (magnitude `mag` e fase `ph`) em uma saída complexa, de forma que esta saída possa ser conectada adequadamente ao bloco `Rayleigh (fd Hz)`, que assim o exige. Como não há sinal de fase aplicado na entrada do bloco `Mag/phase to complex`, então o sinal complexo de saída tem magnitude unitária e fase nula. O bloco `Rayleigh (fd Hz)`, também nativo do VisSim/Comm, recebe o sinal complexo do bloco anterior e o multiplica por uma variável aleatória Gaussiana complexa cuja distribuição de amplitude é *Rayleigh* e a distribuição de fase é uniforme em $[0, 2\pi]$. Assim, o bloco `Rayleigh (fd Hz)` implementa um canal com desvanecimento plano, ou não-seletivo em frequência (modelo multiplicativo) [8, p. 211]. O desvanecimento é considerado não-seletivo quando a largura de faixa do sinal é muito menor que a largura de faixa de coerência do canal, fazendo com que todas as componentes espectrais do sinal sejam afetadas igualmente ao passarem pelo canal. O bloco `Rayleigh (fd Hz)` simula o desvanecimento multipercurso cuja taxa de variação é controlada pelo espalhamento Doppler, que é um parâmetro de configuração da plataforma. Quanto maior o espalhamento Doppler, mais rápidas serão as variações temporais da potência do sinal recebido. Por fim, o bloco nativo `Cplx to Mag/Ph` separa o sinal complexo que representa o desvanecimento multipercurso nas suas componentes de magnitude e fase, sendo utilizada somente a magnitude que, ao quadrado, provocará as variações de curto prazo na potência simulada do sinal recebido. Se a variável `En_fading` for igual a 1 (caixa de diálogo da Figura 8 *Enable fading* habilitada), o sinal que representa o desvanecimento por multipercurso é transferido para a saída do bloco `Multipath fading generator`; caso contrário o desvanecimento multipercurso não comporá as variações de potência recebida.

E. Cômputo Final da Potência do Sinal Recebido segundo o Modelo com Múltiplos Expoentes de Atenuação

Os blocos identificados com Ⓓ na Figura 7 realizam o cômputo final e exportação da potência do sinal recebido levando em conta as variações dependentes somente da distância segundo o modelo multi-declives, estas simuladas pela parte Ⓐ da Figura 7, as variações produzidas pelo sombreamento e simuladas na parte Ⓑ, e o desvanecimento por multipercurso simulado na parte Ⓒ. Especificamente, as variações de potência por sombreamento presentes na variável `Ps` são multiplicadas pelos ganhos de potência $k^2 =$ `pow(k,2)` referentes ao desvanecimento por multipercurso e o resultado é dividido pela perda de potência incremental presente na variável `Li`. O resultado é em seguida convertido de watts para dBm e é então mostrado no bloco `Plot and export`, gerando visualizações similares àquela mostrada na Figura 6. É no bloco `Plot and export` que os valores de potência de sinal simulados são sub-amostrados de acordo com as regras descritas na Subseção IV-A e selecionadas na caixa de configuração mostrada na Figura 8.

Como complemento, a seguir exploram-se mais detalhes sobre o cômputo final dos valores de potência recebida simulados pela plataforma. A potência recebida instantânea, $P(d)$, dependerá dos intervalos de distância determinados pelos os expoentes de atenuação n_1, n_2 e n_3 e pelos pontos de quebra BP_1 e BP_2, lembrando que, por definição, $\mathrm{BP}_2 \geq \mathrm{BP}_1$. Para $d < \mathrm{BP}_1$, então $P(d)$, em watts, é calculada a partir dos valores de potência média em área à distância de referência $\overline{\overline{P}}(d_0)$, em dBm, e sombreamento X_σ, em dB, de acordo com

$$P(d) = \frac{k^2 \times 0{,}001 \times 10^{\frac{\overline{\overline{P}}(d_0)+X_\sigma}{10}}}{\left(\frac{d}{d_0}\right)^{n_1}}, \tag{17}$$

que em dBm corresponde a

$$P(d) = \overline{\overline{P}}(d_0) - 10n_1 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma + 20\log k. \tag{18}$$

Já para $\mathrm{BP}_1 \leq d < \mathrm{BP}_2$, $P(d)$, em watts, é calculada a partir de $\overline{\overline{P}}(d_0)$ em dBm e X_σ em dB, de acordo com

$$P(d) = \frac{k^2 \times 0{,}001 \times 10^{\frac{\overline{\overline{P}}(d_0)+X_\sigma}{10}}}{\frac{1}{\Delta_1}\left(\frac{d}{d_0}\right)^{n_2}}, \tag{19}$$

que em dBm corresponde a

$$\begin{aligned} P(d) = \overline{\overline{P}}(d_0) - 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \\ + X_\sigma + 20\log k + 10\log \Delta_1. \end{aligned} \tag{20}$$

Finalmente, para $d \geq \mathrm{BP}_2$, $P(d)$, em watts, é calculada a partir de $\overline{\overline{P}}(d_0)$ em dBm e X_σ em dB, de acordo com

$$P(d) = \frac{k^2 \times 0{,}001 \times 10^{\frac{\overline{\overline{P}}(d_0)+X_\sigma}{10}}}{\frac{1}{\Delta_1\Delta_2}\left(\frac{d}{d_0}\right)^{n_3}}, \tag{21}$$

que em dBm corresponde a

$$P(d) = \overline{\overline{P}}(d_0) - 10n_3 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma + 20\log k + 10\log\Delta_1 + 10\log\Delta_2. \quad (22)$$

F. Decomposição da Potência Instantânea

Os blocos na área identificada como Ⓔ na Figura 7 separam e plotam os valores de potência referentes ao desvanecimento por multipercurso, ao sombreamento e à perda por distância, dos valores de potência instantânea $P(d)$ simulados. Esses blocos foram inseridos na plataforma para ilustrar como as três componentes de variação da potência recebida são isoladas a partir da variação composta, de forma que possam ser caracterizadas separadamente. Nesta subseção são explorados os blocos em questão e são comparadas as parcelas resultantes da decomposição com aquelas originalmente geradas pela plataforma de simulação antes de serem combinadas, identificadas como `Xsigma`, `k` e `Li`.

A Figura 18 mostra os detalhes internos do bloco `Decomposition of instantaneous power` na área Ⓔ da Figura 7. Nota-se que o sinal que representa as variações de potência recebida de forma composta, aqui denotado por $P(d)$, é filtrado pelos filtros passa-baixas `Median(140)` e `Median(14000)`. O filtro `Median(140)` objetiva reduzir

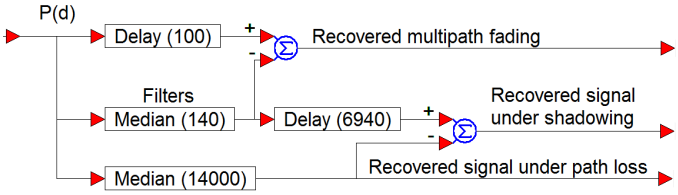

Fig. 18. Detalhamento do bloco `Decomposition of instantaneous power` da área identificada com Ⓔ na Figura 7.

tanto quanto possível as variações de curto prazo em $P(d)$, de forma que em sua saída se tenha uma estimativa das variações de potência média local combinada com média em área. Então, ao se subtrair do sinal composto $P(d)$ o sinal de saída do filtro `Median(140)`, tem-se como resultado as variações de potência devidas somente ao desvanecimento por multipercurso, as quais são mostradas pelo bloco `Plot B`. Os blocos de atraso `Delay(100)` e `Delay(6940)` alinham temporalmente os sinais antes da subtração, já que a filtragem produz atraso. O filtro `Median(14000)` tem uma frequência de corte significativamente menor que aquela referente ao filtro `Median(140)`, na tentativa de bloquear as variações de curto prazo e de média local. Sendo assim, na saída do filtro `Median(14000)` tem-se uma estimativa das variações de potência somente devidas à perda por distância, ou seja, aquelas referentes à potência média em área. Finalmente, subtraindo-se as variações de potência média local combinada com média em área (saída do filtro `Median(140)`) das variações de potência média em área (saída do filtro `Median(14000)`) são obtidas as variações devidas somente ao sombreamento log-normal.

Na plataforma de simulação hora descrita são utilizados filtros de mediana com janela deslizante (*moving median filter*), os quais são não-lineares e processam o sinal de entrada da seguinte forma: cada bloco de Y amostras, correspondente a uma janela de processamento do filtro, passa inicialmente por um processo de classificação em ordem ascendente. Se o comprimento Y da janela for ímpar, na saída do filtro tem-se o valor da amostra central, isto é, o valor mediano. Se o comprimento da janela for par, então na saída do filtro tem-se o valor da média entre as duas amostras centrais. A amostra mais antiga de entrada é então descartada e uma nova amostra é adquirida. Uma nova classificação é realizada para se definir o valor de amostra de saída e o processo se repete com a janela 'deslizando' ao longo de todas as amostras que chegam à entrada do filtro.

O filtro de mediana é particularmente apropriado à aplicação em questão devido à sua característica de preservação da borda (*edge-preserving*), ou seja, o filtro suaviza o sinal, mas preserva parte das variações instantâneas [8]. Essa característica é relevante para que se preservem variações abruptas de média local ao se bloquear as componentes de curto prazo, preservando também as transições de média em área que ocorrem na mudança entre expoentes de propagação. Uma pesquisa adicional pode ser feita através dos artigos [47] e [48] que também utilizam filtros de mediana para separar as componentes do sinal composto, [49] que usa matriz de correlação de distância para remover as variações de curto prazo e [50] que usa filtros de média.

Na literatura, o comprimento da janela deslizante dos filtros supracitados são normalmente especificados em função do comprimento de onda λ da portadora do sinal transmitido. Para que se siga esta forma comum de apresentação, primeiro há que se descobrir o comprimento de onda implicitamente considerado na simulação (diz-se implicitamente, pois na simulação não são gerados sinais, mas sim seus valores de potência de acordo com os fenômenos de propagação simulados). Como abordado na Seção II, a taxa de variação espacial da potência recebida, seja em termos de média em área, média local ou instantânea, depende da velocidade v de deslocamento do receptor. Ademais, a taxa de variação espacial da potência instantânea depende também do comprimento de onda da portadora do sinal transmitido, conforme se pode recordar por meio do gráfico inferior da Figura 5. Portanto, para se associar corretamente os comprimentos das janelas dos filtros em questão ao comprimento de onda, é necessário associar a taxa de amostragem utilizada na simulação com o comprimento de onda, o que se pode fazer por meio da taxa de cruzamentos de limiar (level crossing rate, LCR) [9, p. 223]. Esse parâmetro define a taxa esperada em que a envoltória do sinal, normalizada em relação ao nível de sinal de rms (*root mean square*) local, cruza um nível especificado na direção positiva. Para uma envoltória com distribuição de Rayleigh, o número de cruzamentos por segundos é dado por

$$N_R = \sqrt{2\pi} f_m \rho e^{-\rho^2}, \quad (23)$$

em que $f_m = v/\lambda$ é o desvio Doppler máximo, com v em metros por segundo, e $\rho = R/R_{rms}$ é o valor do nível

especificado R, normalizado em relação à amplitude rms local da envoltória, R_{rms}. A taxa máxima de cruzamento ocorre em $\rho = 1/\sqrt{2}$, que corresponde a um limiar 3 dB abaixo do nível rms [9, p. 224].

Implementou-se então um diagrama simples no VisSim/Comm, à parte da plataforma, com o objetivo de contar o número de cruzamentos positivos da envoltória do sinal gerado pelo bloco `Multipath fading generator`, conforme ilustra a Figura 19. Nelo, o bloco `crossDetect` monitora o valor em sua entrada e o compara com um limiar de referência especificado pelo usuário. Quando o valor de entrada cruza o limite, o bloco gera em sua saída o valor +1 (cruzamento positivo) ou -1 (cruzamento negativo). O limiar de referência configurado foi de $\rho = 1/\sqrt{2}$. O bloco de comparação considera apenas os cruzamentos positivos e o mostrador apresenta a contagem acumulada ao longo da simulação. A Figura 20 mostra um trecho das variações de magnitude do desvanecimento multipercurso escolhido aleatoriamente entre 1500 e 1550 metros, onde se podem observar os pontos de cruzamento positivo. É importante enfatizar que o bloco `crossDetect` foi configurado para um limiar $\rho = 1/\sqrt{2}$ em escala linear, enquanto a Figura 20 mostra tal limiar em escala logarítmica, ou seja, -3 dB.

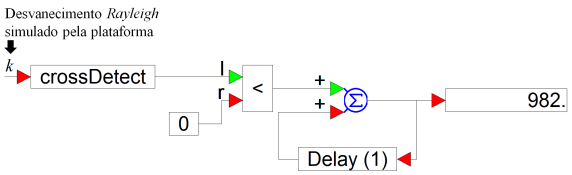

Fig. 19. Diagrama para contagem da taxa de cruzamentos de limiar.

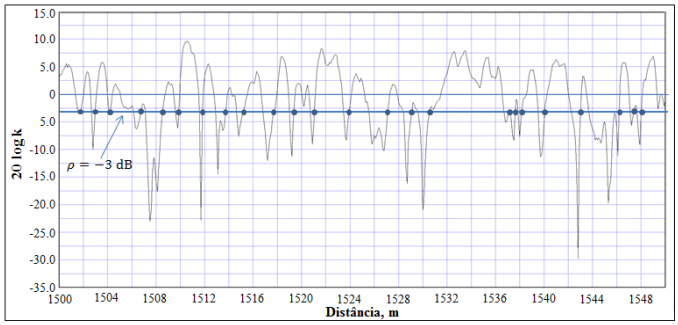

Fig. 20. Amostra do sinal que simula o desvanecimento multipercurso, em dBm.

Como se pode observar na Figura 19, ao longo dos 2.000 metros simulados pela plataforma foram contados 982 cruzamentos em uma única execução da simulação (este valor se altera ligeiramente a cada execução). Substituindo na equação (23) o valor de $\rho = 1/\sqrt{2}$ e de $f_m = 25$ Hz (conforme configurado na plataforma por meio do espalhamento Doppler correspondente ao percurso de $2f_m = 50$ Hz), obtém-se $N_R \approx 26{,}88$ cruzamentos por segundo. Dividindo o número de cruzamentos pela taxa de cruzamentos esperada obtém-se o intervalo de tempo simulado $982/26{,}88 \approx 36{,}54$ segundos. Assim, a velocidade simulada de movimento do receptor é de $v = 2.000/36{,}54 \approx 54{,}74$ metros por segundo. Como $f_m = v/\lambda$, obtém-se $\lambda = v/f_m = 54{,}74/25 \approx 2{,}2$ metros.

Sabe-se que em uma execução da simulação a plataforma gera, em sua configuração inicial, 20.000 amostras em 2.000 metros, já que a frequência de simulação é de 1000 Hz e sua duração é de 20 segundos. Logo, conclui-se que ela gera 10 amostras por metro, ou seja, aproximadamente 22 amostras por comprimento de onda.

De acordo com [51, p. 83] é possível separar as variações de potência recebida de curto prazo (pequena escala) das variações em larga escala, através de filtragem do sinal composto, $P(d)$, com tamanho da janela do filtro entre 5λ e 40λ. Para encontrar o comprimento mais adequado da janela do filtro de mediana foi utilizado o método de Monte-Carlo a partir de 100 execuções da simulação para cada comprimento de janela. Inicialmente o objetivo foi eliminar as variações de curto prazo nos valores de potência recebida instantânea, $P(d)$, restando apenas as variações de média local combinadas com as variações de média em área (larga escala). Para isso, variou-se o comprimento da janela do filtro entre 50 e 500, em passos de 50. Para cada comprimento de janela a para cada execução da simulação calculou-se o erro quadrático médio (MSE, *mean square error*) entre os valores de potência simulados pela plataforma e aqueles 'recuperados' por filtragem. Ao final de cada conjunto de 100 execuções calculou-se a média dos MSEs para aquele comprimento específico de janela, repetindo-se o procedimento até a janela de comprimento 500. Verificou-se então que o menor valor da média dos MSEs ocorreu para a janela com 150 amostras. Em seguida realizou-se um refinamento na análise, repetindo o método com comprimentos de janela variando entre 100 e 200, em passos de 10. O resultado final dessa análise pode ser visto no gráfico da Figura 21, a qual mostra que o menor valor médio dos MSEs foi de 6,338895, correspondente à janela de comprimento de 140 ou aproximadamente 6λ (lembrando que a plataforma gera aproximadamente 22 amostras por comprimento de onda).

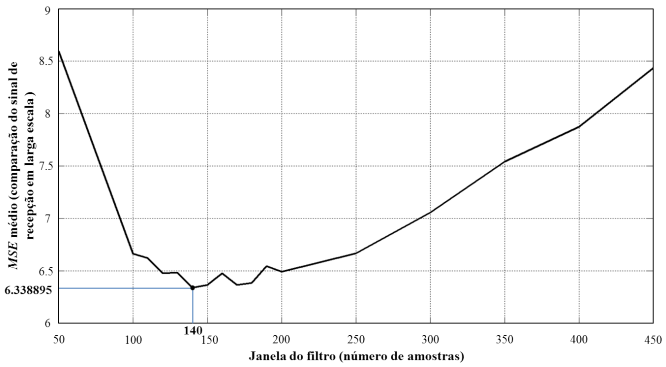

Fig. 21. Análise de MSE para escolha do tamanho da janela do filtro de mediana para 'recuperação' das variações de potência média local.

O mesmo procedimento foi utilizado para encontrar o melhor comprimento da janela do filtro com objetivo de recuperar as variações de potência recebida média em área

a partir do sinal composto, $P(d)$. Para tanto extraem-se das variações presentes no sinal composto as variações de curto prazo e as variações provocadas pelo sombreamento. Variou-se a janela do filtro de mediana entre 500 e 16.000 amostras, em passos de 500, executando-se a simulação 100 vezes para cada comprimento de janela. O resultado final pode ser visto na Figura 22, na qual observa-se que o menor valor médio do MSE foi de 3,995579, ocorrido por volta de 14.000 ou aproximadamente 636λ. No entanto, nota-se na Figura 22 que o MSE não voltou a crescer de forma notável a partir de 14.000, já que a análise foi limitada pelo comprimento máximo de 16.384 para a janela do filtro de mediana do VisSim/Comm.

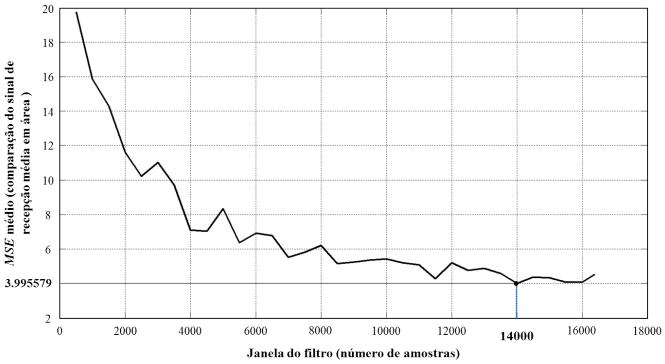

Fig. 22. Análise de MSE para escolha do tamanho da janela do filtro de mediana para 'recuperação' das variações de potência média em área.

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam os gráficos do bloco `Plot B` identificado na área Ⓔ da Figura 7, os quais permitem a comparação entre as variações de potência simuladas e recuperadas por filtragem em termos de desvanecimento por multipercurso, sombreamento e perda por distância, respectivamente. Na Figura 23, as variações referentes ao desvanecimento multipercurso presentes na variável `k` são comparadas com aquelas obtidas pela subtração entre $P(d)$ e as componentes de larga escala resultantes na saída do filtro `Median(140)`). Na Figura 24, as variações referentes ao sombreamento presentes na variável `Xsigma` são comparadas com aquelas obtidas pela subtração entre a componente média local combinada com a componente média em área resultante da saída do filtro `Median(140)` e a componente média em área resultante da saída do filtro `Median(14000)`. Finalmente, na Figura 25 é possível comparar as variações de potência média em área geradas pela simulação e presentes na variável `Li` com aquelas obtidas na saída do filtro `Median(14000)`. Neste último caso observa-se que a componente simulada possui dois pontos de quebra, $\mathrm{BP}_1 = 200$ m e $\mathrm{BP}_2 = 1000$, mas a componente recuperada apresenta um efeito de arrendondamento nos pontos de quebra provocado pelo filtro `Median(14000)`. Além disso, a realização de outras execuções da simulação permitem concluir que a diferença entre as variações de potência média em área recuperadas em relação às simuladas não é sempre pequena. Isto sugere que o processo de filtragem não e adequado para se obter tais variações a partir das variações compostas correspondentes a $P(d)$. Conjectura-se que resultados mais precisos podem ser obtidos a partir de procedimentos de aderência (*curve fitting*) das variações de média local combinada com média em área a funções lineares por partes (*piecewise linear*). Tais funções representariam então a queda de potência em função da distância em escala logarítmica.

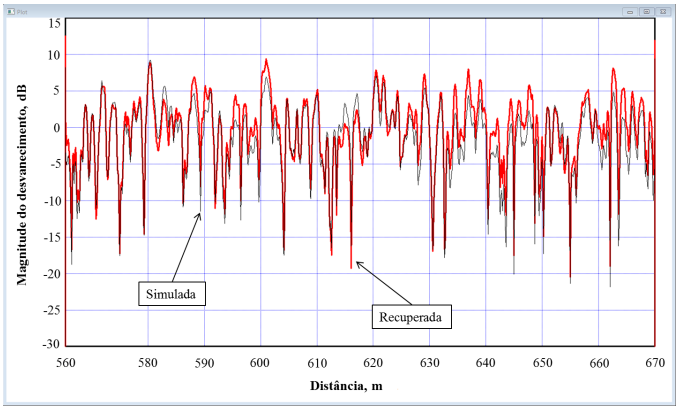

Fig. 23. Comparação entre as variações de curto prazo (desvanecimento por multipercurso) simulada e recuperada.

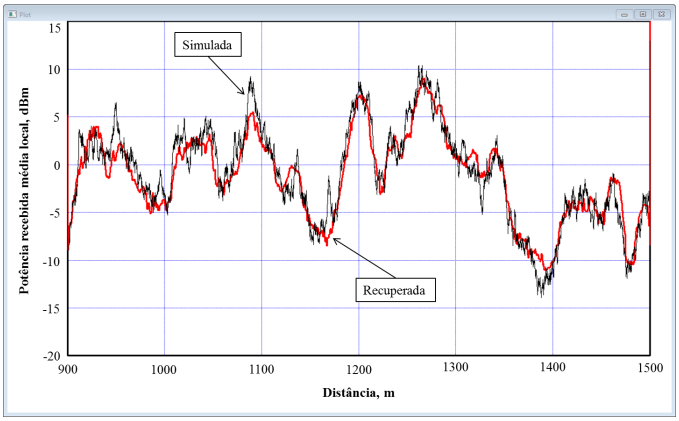

Fig. 24. Comparação entre as variações de longo prazo (sombreamento) simulada e recuperada.

V. Alguns Resultados Numéricos

Objetivando validar a plataforma de simulação e melhor ilustrar seu funcionamento, nesta Seção são apresentados e analisados alguns resultados numéricos obtidos a partir dos valores de potência recebida simulados.

O primeiro parâmetro a ser verificado é o sombreamento log-normal, o que se faz aqui por meio de sua distribuição e de sua correlação espacial. As Figuras 26 e 27 apresentam gráficos da variável aleatória X_σ, gerada na saída do bloco `Lognormal shadowing generator`, para valores de desvio padrão $\sigma = 5$ dB e $\sigma = 8$ dB, respectivamente, para uma descorrelação espacial fixa em $d_d = 20$ m. Já as Figuras 28 e 29 apresentam gráficos de X_σ para $d_d = 50$ m e $d_d = 5$ m, respectivamente, para um desvio padrão fixo em $\sigma = 5$ dB.

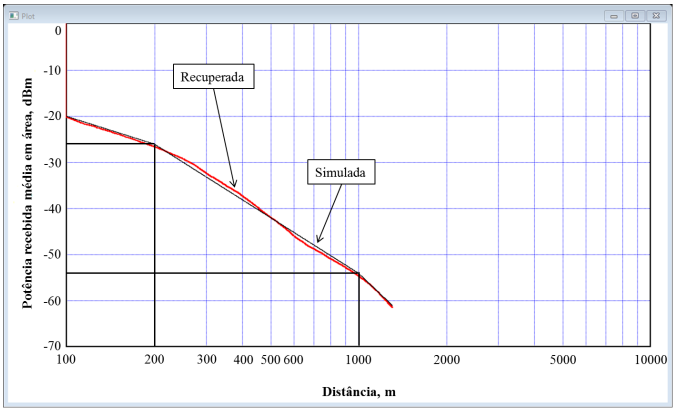

Fig. 25. Comparação entre as variações de longo prazo (perda por distância) simulada e recuperada.

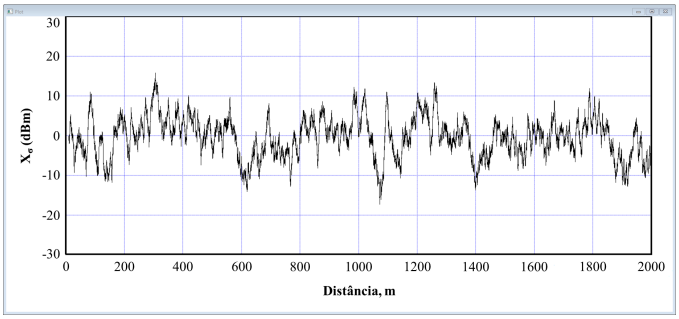

Fig. 26. Sombreamento log-normal para $\sigma = 5$ dB e $d_d = 20$ m.

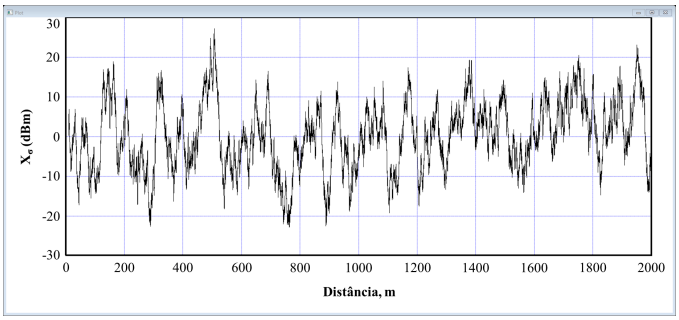

Fig. 27. Sombreamento log-normal para $\sigma = 8$ dB e $d_d = 20$ m.

Uma simples análise visual das Figuras 26, 27, 28 e 29 confirma que o aumento no desvio padrão do sombreamento está produzindo o desejado aumento na dispersão dos valores de potência média local representados por X_σ. Confirma também que o aumento na distância de descorrelação d_d está produzindo o desejado aumento de correlação entre os valores de potência média local ao longo do tempo. Deve-se atentar aqui para o fato de que a variação temporal do sombreamento está associada à variação da posição espacial do receptor em relação ao transmissor conforme o tempo passa, devido ao movimento relativo. Portanto, o aumento na correlação espacial pode ser observado pelo aumento na correlação temporal das amostras nas formas de onda das

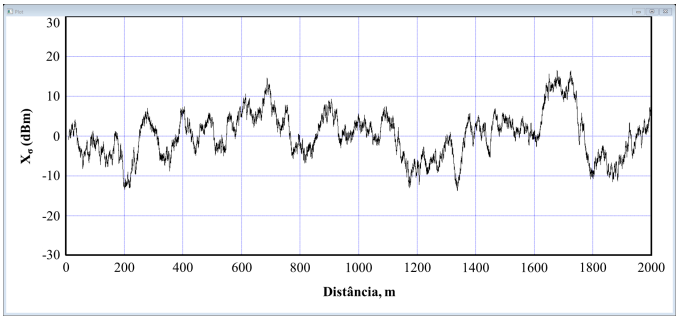

Fig. 28. Sombreamento log-normal para $d_d = 50$ m e $\sigma = 5$ dB.

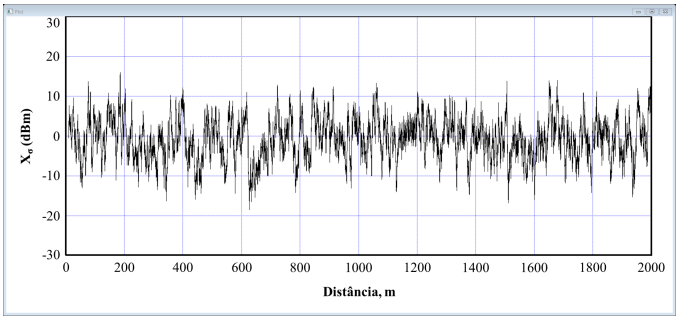

Fig. 29. Sombreamento log-normal para $d_d = 5$ m e $\sigma = 5$ dB.

figuras em questão.

A primeira caracterização estatística do sombreamento consiste em se obter as suas funções densidade de probabilidade empírica e teórica, o que é feito aplicando-se testes de aderência (*goodness-of-fit*) [52, Capítulo 2]. Há várias ferramentas para esse fim disponíveis em aplicativos de cálculo como o Matlab e o Excel, e outras específicas como, por exemplo, o Easyfit [53]. A Figura 30 apresenta a função densidade de probabilidade empírica (histograma normalizado) do sombreamento X_σ referente à Figura 29, juntamente com a função densidade de probabilidade Gaussiana de média nula e desvio padrão de 5 dB que melhor se encaixou, de acordo com o EasyFit, aos valores de potência média local simulados. Como o sombreamento tem média nula e foi configurado na plataforma de simulação para $\sigma = 5$ dB, conclui-se que ele está sendo simulado corretamente. Vale recordar que a distribuição log-normal corresponde a uma distribuição Gaussiana em escala logarítmica, a qual está associada aos valores de desvio de potência média local em torno da potência média em área, ambos em escala logarítmica.

A Figura 31 apresenta a função de autocorrelação espacial desejada do sombreamento, $R(\delta) = e^{-|\delta|/d_d}$, bem como aquela estimada a partir de amostras de sombreamento geradas pela simulação, para uma distância de descorrelação $d_d = 25$ m, valor este arbitrariamente escolhido sem perda de generalidade. Para computar a função de autocorrelação, utilizou-se o estimador assintoticamente não polarizado

$$R(\delta_j) = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n-i} x_j x_{j+1}, \tag{24}$$

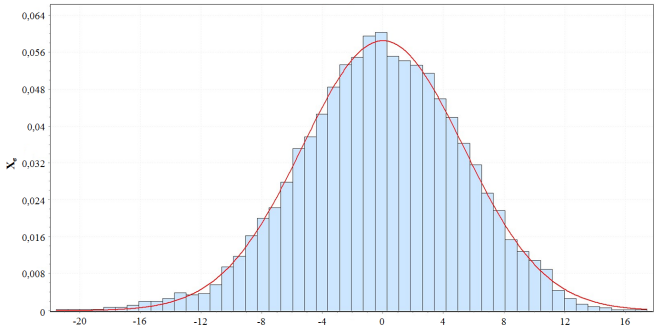

Fig. 30. Funções densidade de probabilidade empírica e teórica (Gaussiana) da variável aleatória X_σ.

a partir das amostras do arquivo `Shadowing.dat` exportadas para o Matlab. Nessa função, x_j é o valor da j-ésima amostra de potência média local referente ao sombreamento apenas, medida à distância δ_j.

Analisando a Figura 31 observa-se que a plataforma é fiel ao gerar amostras correlacionadas do sombreamento de acordo com a distância de descorrelação configurada, a qual é destacada na figura como a distância δ_j em que a função chega ao valor de $1/e \approx 0{,}368$.

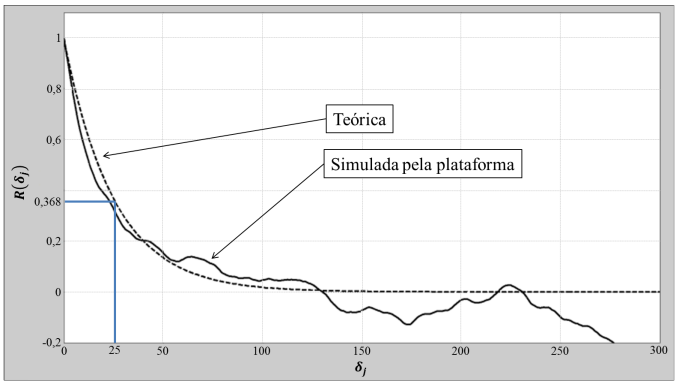

Fig. 31. Função de autocorrelação espacial do sombreamento teórica e estimada, para $d_d = 25$ m.

A Figura 32 apresenta o gráfico da variável k que simula o desvanecimento multipercurso, o qual provoca variações de curto prazo na potência do sinal recebido. Arbitrariamente configurou-se o espalhamento Doppler do canal para 50 Hz para melhor visualização, mas sem perda de generalidade. Observa-se nessa figura que as variações de ganho estão condizentes com o que se espera do desvanecimento por multipercurso.

A caracterização estatística do desvanecimento por multipercurso pode ser feita a partir das suas amostras em termos de magnitude, as quais devem ter densidade de probabilidade de Rayleigh. Utilizando procedimento análogo àquele anteriormente descrito com relação ao sombreamento obteve-se o resultado apresentado na Figura 33, que mostra a função densidade de probabilidade empírica da magnitude do desvanecimento, k, referente à Figura 33, juntamente com a função densidade de probabilidade de Rayleigh que melhor se encaixou, de acordo com o EasyFit, aos valores instantâneos de ganho do canal simulados. Por meio dessa figura se pode concluir que a plataforma de simulação está adequadamente gerando as variações de potência instantânea causadas pelo desvanecimento multipercurso.

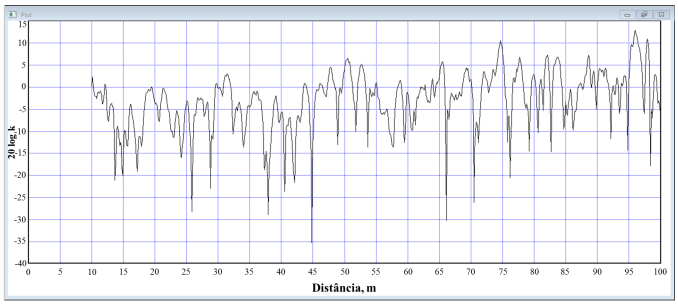

Fig. 32. Ganho do canal, k, referente ao desvanecimento por multipercurso, para espalhamento Doppler de 50 Hz.

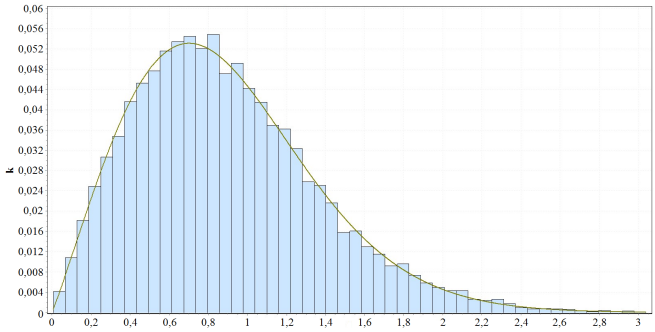

Fig. 33. Funções densidade de probabilidade empírica e teórica (Rayleigh) da variável aleatória k.

Por fim, a Figura 34 apresenta resultados de uma realização das medidas simuladas de potência instantânea recebida, $P(d)$, em dBm, em função da distância d entre transmissor e receptor, juntamente com os valores simulados de potência média em área, os quais correspondem às funções lineares-por-partes também mostradas. As variações de potência instantânea combinam: i) sombreamento com desvio padrão $\sigma = 5$ dB, ii) desvanecimento Rayleigh com atenuação média de potência unitária e espalhamento Doppler de 50 Hz e iii) perdas por distância de acordo com o modelo multi-declives para $d_0 = 10$ m, $P(d_0) = 0$ dBm, pontos de quebra $\mathrm{BP}_1 = 200$ m e $\mathrm{BP}_2 = 1000$ m, e expoentes de atenuação $n_1 = 2$, $n_2 = 4$ e $n_3 = 6$.

VI. Sumário e Oportunidades de Melhoria

Este artigo descreveu uma plataforma para simulação dos principais mecanismos de propagação de sinais de radiofrequência em canais rádio móveis externos, utilizando o software VisSim/Comm. São simuladas a atenuação da potência recebida média em área em função da distância

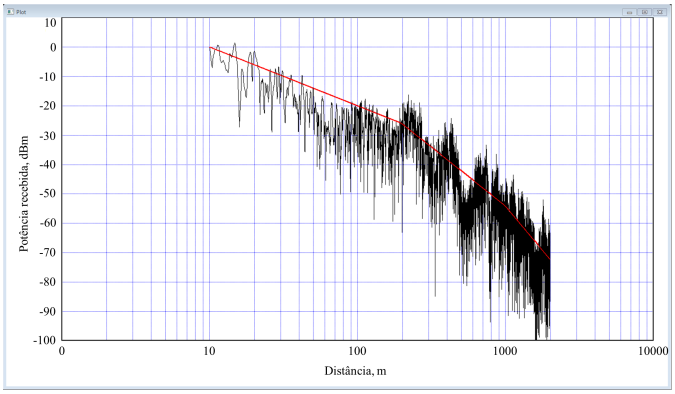

Fig. 34. Realização de valores simulados de potência de recepção instantânea combinando variações de média em área, média local e por desvanecimento multipercurso. A lei de variação da potência média em área segundo o modelo multi-declives é também destacada como referência.

entre transmissor e receptor sob o modelo multi-declives, a variação da potência média local em torno da média em área, e a variação instantânea provocada pelo desvanecimento multipercurso. A plataforma conta com uma interface de configuração de vários parâmetros que afetam a propagação do sinal, bem como gráficos de apresentação de resultados e a possibilidade de que os valores sumulados de potência recebida e distância sejam exportados para que outras análises possam ser realizadas, por exemplo, com o auxilio de softwares como o Matlab, o Mathcad, o Mathematica ou mesmo o Excel.

A plataforma proposta e os conceitos aqui abordados podem compor uma importante ferramenta de auxílio ao estudo sobre a propagação em grande e em pequena escalas no canal rádio móvel externo, servindo ainda para fundamentar conceitos análogos relacionados à propagação em canais internos.

Como sugestão para futuros trabalhos, coloca-se o desafio de modificar a plataforma de forma a adaptá-la para as características específicas da propagação de sinais em sistemas operando com ondas milimétricas, uma vez que, devido às altas frequências, o tamanho da célula pode ser reduzido para poucas centenas de metros e talvez o modelo multi-declives e as características do desvanecimento multipercurso e do sombreamento necessitem ser modificadas.

Outro desafio consiste em buscar novos métodos diferentes da filtragem, para obtenção da queda de potência média em área a partir das medidas de potência instantânea, o que poderia ser feito a partir de procedimentos de aderência de uma função linear-por-partes às variações de média local combinada com média em área. A partir desse procedimento poder-se-ía então validar a simulação do ponto de vista da geração adequada do efeito multi-declive na atenuação por distância.

REFERÊNCIAS

[1] International Telecommunication Union - ITU, "ICT Indicators database 2015," Mar. 2016. [Online]. Available: http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/publications/wtid.aspx.

[2] Cisco Systems, "Visual Networking Index- VNI," Nov. 2015. [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html

[3] International Telecommunication Union - ITU, "ITU Towards IMT for 2020 and beyond," Nov. 2015. [Online]. Available: http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx

[4] 5GPPP Home Page, "The 5G Infrastructure Public Private Partnership," Nov. 2015. [Online]. Available: https://5g-ppp.eu/

[5] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work!" *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.

[6] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug 1999.

[7] Altair Engineering, Inc. (former Visual Solutions, Inc.), "VisSim: A graphical language for simulation and model-based embedded development," Nov. 2016. [Online]. Available: http://www.vissim.com/products/vissim/comm.html

[8] D. A. Guimarães, *Digital transmission: a simulation-aided introduction with VisSim/Comm*. http://link.springer.com/book/10.1007& Business Media, 2009.

[9] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2002.

[10] K. Bullington, "Radio propagation for vehicular communications," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 4, pp. 295–308, Nov. 1977.

[11] H. Xia, H. L. Bertoni, L. R. Maciel, A. Lindsay-Stewart, and R. Rowe, "Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 10, pp. 1439–1447, Oct 1993.

[12] S. Büyükçorak, M. Vural, and G. K. Kurt, "Lognormal mixture shadowing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 10, pp. 4386–4398, Oct 2015.

[13] U. S. F. C. C. N. T. D. Division, *Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications*, ser. Bulletin (United States. Federal Communications Commission. Office of Engineering and Technology). Federal Communications Commission, Office of Engineering and Technology, New Technology Development Division, 1997. [Online]. Available: https://books.google.com.br/books?id=JXA5GwAACAAJ

[14] T. Rappaport, R. Heath, R. Daniels, and J. Murdock, *Millimeter Wave Wireless Communications*, ser. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series from Ted Rappaport. Pearson Education, 2014. [Online]. Available: https://books.google.com.br/books?id=0Jh6BAAAQBAJ

[15] L. Wei, R. Q. Hu, Y. Qian, and G. Wu, "Key elements to enable millimeter wave communications for 5G wireless systems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 136–143, December 2014.

[16] M. R. Akdeniz, Y. Liu, M. K. Samimi, S. Sun, S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1164–1179, June 2014.

[17] S. Hur, S. Baek, B. Kim, Y. Chang, A. F. Molisch, T. S. Rappaport, K. Haneda, and J. Park, "Proposal on millimeter-wave channel modeling for 5G cellular system," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 3, pp. 454–469, April 2016.

[18] X. Zhang and J. G. Andrews, "Downlink cellular network analysis with multi-slope path loss models," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 5, pp. 1881–1894, May 2015.

[19] C. B. Andrade and R. P. F. Hoefel, "On indoor coverage models for industrial facilities." in *The 7th International Telecommunications Symposium (ITS 2010)*, Manaus, AM, Brazil, September 2010.

[20] T. Abbas, K. Sjoberg, J. Karedal, and F. Tufvesson, "A Measurement Based Shadow Fading Model for Vehicle-to-Vehicle Network Simulations," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2015, pp. 190 607–, 2015. [Online]. Available: http://lup.lub.lu.se/record/7761043/file/7761061.pdf

[21] L. Cheng, B. Henty, D. Stancil, F. Bai, and P. Mudalige, "Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 GHz dedicated short range communication (DSRC) frequency band," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 25, no. 8, pp. 1501–1516, Oct 2007.

[22] H. Masui, T. Kobayashi, and M. Akaike, "Microwave path-loss modeling in urban line-of-sight environments," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 20, no. 6, pp. 1151–1155, Aug 2002.

[23] A. Alomainy and Y. Hao, "Radio channel models for uwb body-centric networks with compact planar antenna," in *Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, IEEE*, July 2006, pp. 2173–2176.

[24] J. C. Reyes-Guerrero, G. Sisul, and L. A. Mariscal, "Measuring and estimating the propagation path loss and shadowing effects for marine wireless sensor networks at 5.8 GHz," in *Telecommunications Forum (TELFOR), 2012 20th*, Nov 2012, pp. 323–226.

[25] A. A. Goulianos, T. W. C. Brown, B. G. Evans, and S. Stavrou, "Wideband power modeling and time dispersion analysis for uwb indoor off-body communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 7, pp. 2162–2171, July 2009.

[26] R. Chen and Z. Zhong, "Analysis on v2v connectivity under dual-slope path loss model in urban scenarios," in *General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI*, Aug 2014, pp. 1–4.

[27] Y. Chang, S. Baek, S. Hur, Y. Mok, and Y. Lee, "A novel dual-slope mm-wave channel model based on 3d ray-tracing in urban environments," in *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on*, Sept 2014, pp. 222–226.

[28] N. Garg, S. Singh, and J. Andrews, "Impact of dual slope path loss on user association in hetnets," in *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Dec 2015, pp. 1–6.

[29] R. Chen, Z. Sheng, M. Ni, Z. Zhong, and D. G. Michelson, "Channel capacity under measurement-based model for cooperative vehicular ad hoc networks," in *Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015 IEEE International Symposium on*, July 2015, pp. 302–303.

[30] Y. Ibdah and Y. Ding, "Mobile-to-mobile channel measurements at 1.85 GHz in suburban environments," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 2, pp. 466–475, Feb 2015.

[31] X. Zhang and J. Andrews, "Downlink cellular network analysis with multi-slope path loss models," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 63, no. 5, pp. 1881–1894, May 2015.

[32] L. A. Hannah and D. B. Dunson, "Multivariate Convex Regression with Adaptive Partitioning," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 14, pp. 3261–3294, 2013. [Online]. Available: http://jmlr.org/papers/v14/hannah13a.html

[33] Z. Raida *et al.*, "Communication subsystems for emerging wireless technologies," *Radioengineering*, vol. 21, no. 4, pp. 1036–1049, Dec. 2012.

[34] J. D'Errico, "SLM: Shape language modeling," Apr. 2016. [Online]. Available: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24443-slm-shape-language-modeling

[35] OriginLab Corporation, "Origin: A software application for data analysis and graphing," Nov. 2015. [Online]. Available: http://www.originlab.com/index.aspx?go=PRODUCTS/Origin

[36] Statistical Methodology and Applications Branch, Surveillance Research Program, National Cancer Institute, "Joinpoint Regression Program, Version 4.2.0," Apr. 2015. [Online]. Available: http://surveillance.cancer.gov/joinpoint/

[37] H.-J. Kim, M. P. Fay, E. J. Feuer, and D. N. Midthune, "Permutation tests for joinpoint regression with applications to cancer rates," *Statistics in Medicine*, vol. 19, no. 3, pp. 335–351, 2000. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1097-0258(20000215)19:3%3C335::aid-sim336%3E3.0.co;2-z

[38] D. A. Guimarães, "VisSim/Comm simulation diagram for small-scale and large-scale propagation mechanisms," Mar. 2016. [Online]. Available: http://www.inatel.br/lambda/downloads/resources-s221253-1/8-threeslopepathlosssimulatorautorestart-s858894-1/file

[39] T. Abbas, J. Ka, and F. Tufvesson. (2012, Sep.) "a measurement based shadow fading model for vehicle-to-vehicle network simulations". [Online]. Available: http://lup.lub.lu.se/record/7761043/file/7761061.pdf.

[40] B. Delgutte, "Course materials for HST.582J / 6.555J / 16.456J, Biomedical Signal and Image Processing, Spring 2007." Massachusetts Institute of Technology, MIT OpenCourseWare. [Online]. Available: http://ocw.mit.edu

[41] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2145–2146, Nov 1991.

[42] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.

[43] S. S. Ghassemzadeh, R. Jana, C. W. Rice, W. Turin, and V. Tarokh, "Measurement and modeling of an ultra-wide bandwidth indoor channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 10, pp. 1786–1796, 2004.

[44] R. He, Z. Zhong, B. Ai, and C. Oestges, "Shadow fading correlation in high-speed railway environments," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 64, no. 7, pp. 2762–2772, July 2015.

[45] R. He, A. F. Molisch, Z. Zhong, B. Ai, J. Ding, R. Chen, and Z. Li, "Measurement based channel modeling with directional antennas for high-speed railways," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*, Apr. 2013, pp. 2932–2936.

[46] R. He, Z. Zhong, B. Ai, and B. Zhang, "Measurement-based autocorrelation model of shadow fading for the high-speed railways in urban, suburban, and rural environments," in *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2014 IEEE*, Jul. 2014, pp. 949–950.

[47] T. S. Rappaport, S. Y. Seidel, and R. Singh, "900-mhz multipath propagation measurements for us digital cellular radiotelephone," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 132–139, May 1990.

[48] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "900 mhz path loss measurements and prediction techniques for in-building communication system design," in *Vehicular Technology Conference, 1991. Gateway to the Future Technology in Motion., 41st IEEE*, May 1991, pp. 613–618.

[49] R. He, O. Renaudin, V. M. Kolmonen, K. Haneda, Z. Zhong, B. Ai, and C. Oestges, "Statistical characterization of dynamic multi-path components for vehicle-to-vehicle radio channels," in *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2015, pp. 1–6.

[50] M. H. Unar, I. A. Glover, J. Heaton, C. Williams, and P. S. Cannon, "Wide-band mobile radio channel characterisation in uhf band for residential suburban areas," in *Antennas and Propagation, 2003. (ICAP 2003). Twelfth International Conference on (Conf. Publ. No. 491)*, vol. 1, March 2003, pp. 262–265 vol.1.

[51] I. Misra, *Wireless Communications and Networks: 3G and Beyond*. Tata McGraw Hill Education, 2013. [Online]. Available: https://books.google.com.br/books?id=XoHvAwAAQBAJ

[52] J. E. Gentle, *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*, 2nd ed. Springer, 2005.

[53] MathWave Technologies, Inc., "EasyFit – distribution fitting software," Nov. 2016. [Online]. Available: http://www.mathwave.com/easyfit-distribution-fitting.html