

Avaliação do Impacto do Efeito de Espalhamento Difuso na Predição de Rádio-Propagação

André Mendes Cavalcante

Instituto Nokia de Tecnologia, Mobile Services and Solutions - Telecom, Manaus, AM, 69.093-415, Brasil

João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa e Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante
Universidade Federal do Pará, Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado, Belém, PA, 66.075-900, Brasil

Resumo— Neste artigo um modelo de espalhamento difuso para ser usado em conjunto com técnicas de traçado de raios 3D para predição de rádio-propagação é apresentado. O impacto deste modelo e seu efeito em relação a uma abordagem puramente baseada em Óptica Geométrica (GO) e Teoria Uniforme da Difração (UTD) é avaliado através de simulações em um cenário urbano típico.

Palavras-chaves— rádio-propagação, espalhamento difuso, traçado de raios 3D.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o grande crescimento das comunicações sem fio e a necessidade de novos serviços móveis vêm requerendo o desenvolvimento de novas metodologias de avaliação rápidas e precisas para modelos de canais de rádio. A predição eficiente do canal sem fio imprime um importante papel na determinação de vários parâmetros de rede, tais como, cobertura, taxa de dados transmitidos, localização ótima dos rádios-transmissores, etc [1]. A necessidade de modelos eficientes de canais sem fio é ainda mais evidente quando se aumenta o interesse pela provisão de serviços em ambientes complexos (*indoor*, com espalhadores, vegetação, etc) e segundo as modernas técnicas de transmissão (e.g. *Multiple Inputs Multiple Outputs* - MIMO [2], antenas inteligentes, etc), onde são estabelecidos outros padrões para o comportamento do sinal. Neste contexto, modelos de predição baseados em técnicas de traçado de raios vêm se mostrando soluções promissoras no projeto, análise e desenvolvimento de sistemas sem-fio [1]. Entretanto, como geralmente contabilizam apenas os efeitos de campos que sofrem reflexão espelhada e difração, falham para descrever adequadamente o efeito de espalhamento difuso, que em muitos casos tem um significante impacto na propagação [1]-[9].

Neste sentido, o objetivo deste artigo é avaliar o impacto do efeito do espalhamento difuso na rádio-propagação e estabelecer um *frame-work* para ser aplicado em conjunto com técnicas de traçado de raios tridimensionais (3D).

O artigo está organizado da seguinte forma: Seção II apresenta o modelo de espalhamento difuso adotado. Seção III descreve aspectos de implementação computacional do modelo. A Seção IV apresenta resultados de simulações para avaliar o modelo apresentado. As conclusões são feitas na Seção V.

André Mendes Cavalcante, andre.cavalcante@indt.org.br, João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, jweyl@ufpa.br, Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, gervasio@ufpa.br. Tel/Fax: +55 92 2126-1110.

II. ESPALHAMENTO DIFUSO

Nas faixas de frequência de interesse para as comunicações móveis (UHF e parte da faixa de SHF), quando um campo incide em uma superfície plana (lisa) e homogênea, a contribuição dominante de campo é a componente refletida na direção espelhada. Nesse caso, uma abordagem assintótica baseada em Óptica Geométrica (GO) em conjunto com a Teoria Uniforme da Difração (UTD) para os mecanismos básicos (reflexão, difração) é suficiente para determinar as principais contribuições de campo. Entretanto, quando a superfície apresenta rugosidades, o campo incidente na mesma é espalhado em várias direções, ocorrendo o fenômeno denominado de *espalhamento difuso* [3].

Em ambientes reais, a maioria das paredes de edificações não podem ser consideradas lisas e nem muito menos constituídas por camadas homogêneas. Adicionalmente, as irregularidades presentes (janelas, sacadas, ornamentos decorativos, calhas d'água, linhas de transmissão, tubulações de gás e de aquecimento, etc.) possuem geralmente dimensões comparáveis ao comprimento de onda, o que evidencia ainda mais o efeito de espalhamento difuso. Entretanto, o mecanismo de espalhamento eletromagnético é um problema extremamente complexo, não sendo disponibilizado nenhuma solução simples para a contabilização de seu efeito. A solução deste problema através de métodos rigorosos (método dos elementos finitos, método das diferenças finitas no domínio do tempo - FDTD, método dos momentos - MoM) requer expressivos recursos computacionais, enquanto que por métodos assintóticos (GO, UTD, Óptica Física - PO, etc.) a limitação principal é a dificuldade no tratamento de espalhadores compostos, que é um caso comum. Além disso, a modelagem do espalhamento em edificações reais não pode ser considerada como um problema puramente determinístico [3].

Uma outra dificuldade encontrada na modelagem do espalhamento difuso é que as irregularidades não são disponibilizadas nas bases de dados do cenário e *a priori* são desconhecidas. Apenas algumas características gerais das edificações e algumas irregularidades esperadas são conhecidas, devendo ser adotada então, uma abordagem totalmente estatística ou uma abordagem híbrida determinística-estatística para solução do problema [3].

Diversas abordagens para o espalhamento eletromagnético em superfícies são relatadas na literatura [3]-[5]. Entretanto, a maioria delas são baseadas na abordagem de *Kirchhoff*, que é limitada para rugosidades com distribuições Gaussianas ou desvios de superfície pequenos comparados ao comprimento de onda. Assim, essas abordagens não se enquadram numa situação realista em muitos casos [3].

O modelo adotado neste artigo é baseado na abordagem proposta inicialmente em [6], denominada de Modelo de Rugosidade Efetiva (ER - *Effective Roughness*). A escolha desta abordagem deve-se ao fato de ser um modelo tridimensional (3D), baseado em raios e que vem sendo usado recentemente com bom resultados [3],[7].

A. Modelo de Rugosidade Efetiva (ER)

Neste modelo, para cada parede (superfície) do cenário é associado uma espécie de rugosidade efetiva (ER), que leva em consideração a real rugosidade da parede assim como as irregularidades do volume no qual a parede faz parte. A contribuição de campo espalhado provida pelo modelo é calculada diretamente das distâncias e das orientações da parede em relação ao transmissor (Tx) e o receptor (Rx), usando fórmulas analíticas simples. Adicionalmente, tais expressões dependem também de um parâmetro chamado de coeficiente de espalhamento (S), definido adiante.

O modelo é usado de diferentes formas dependendo da posição relativa da parede considerada em relação aos rádios-transceptores (Tx e Rx).

1) Espalhamento Difuso para Paredes “Próximas”:

Quando a parede está “próxima” dos terminais de rádio (Tx e Rx), ou seja, quando os dois ou três primeiros elipsóides de *Fresnel*, cujos focos são o Tx e a imagem de Rx com relação à parede, são completamente interceptados pela parede, a contribuição de campo pode ser considerada dominante na direção especular e de intensidade igual à reflexão em uma superfície infinita [3]. Então, a contribuição do modelo de rugosidade efetiva (ER) para paredes “próximas” pode ser apenas considerada se o percurso raio direto-refletido não está presente (e.g., ele está obstruído).

Quando um tubo de raio de abertura $d\Omega$ incide em um elemento genérico de superfície da parede dS , (vide Fig.1), parte da potência é refletida em um tubo de raio especular, também de abertura $d\Omega$, parte (P_p) é transmitida e parte (P_s) é espalhada no semi-espacô superior. Cada elemento de superfície é considerado para produzir uma onda espalhada esférica não-uniforme e não-coerente, cuja amplitude é da forma $E_s = E_{s0}G_s$, onde G_s é o padrão de espalhamento da superfície [7].

Expressando o fluxo de potência através do tubo como o produto da densidade de potência e a seção transversal do mesmo, a contribuição do campo espalhado no ponto de recepção (Rx) pode ser obtida da seguinte relação [3]:

$$S^2 E_i^2 d\Omega r_i^2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} E_s^2 r_s^2 \sin\theta_s d\theta_s d\phi_s \quad (1)$$

onde E_i e E_s são as amplitudes do campo incidente e espalhado, respectivamente. O coeficiente de espalhamento S é

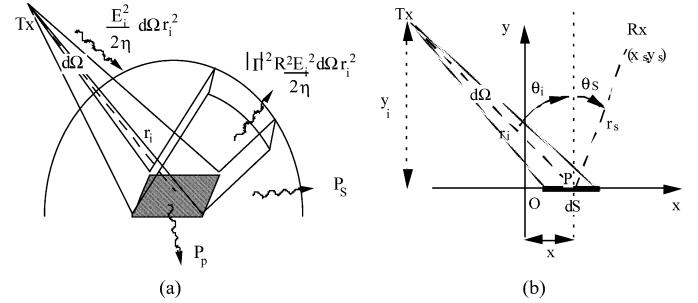


Fig. 1. Sistema do espalhamento difuso: (a) vista de elemento genérico de superfície com os diferentes fluxos de potência e (b) vista 2-D no plano xy com o elemento de superfície dS localizado na distância x do ponto de reflexão.

definido como a relação entre a amplitude do campo espalhado e a amplitude do campo incidente na vizinhança da superfície.

Com base na Eq.(1) e sabendo-se que E_i é proporcional a $(1/r_i)$ (i.e., $E_i = K_0/r_i$) e $d\Omega = (dS \cos \theta_i)/r_i^2$, o campo espalhado pelo elemento de superfície dS no ponto de recepção (Rx), para um determinado padrão de espalhamento G_s , pode ser expresso por:

$$dE_s = K_0 \cdot S \cdot G_s \sqrt{\frac{dS \cos \theta_i}{\pi}} \frac{K}{r_i r_s} \quad (2)$$

onde $K_0 = \sqrt{60 P_{TX} G_{TX}}$, com P_{TX} sendo a potência de transmissão [W] e G_{TX} o ganho de potência máxima da antena transmissora. Os demais parâmetros são conforme definidos na Fig.1. A constante K depende do padrão de espalhamento da superfície dS e é determinada de forma a manter válida a igualdade expressa pela Eq.(1). O valor do campo espalhado total ($E_{s_{total}}$) pode ser calculado pela integração da expressão (2) sobre a superfície inteira da parede (S_{parede}), ou seja:

$$E_{s_{total}} = \int_{S_{parede}} K_0 \cdot S \cdot G_s \sqrt{\frac{dS \cos \theta_i}{\pi}} \frac{K}{r_i r_s} \quad (3)$$

Com base na Fig.1, o seguinte balanço de potência deve ser satisfeito:

$$\frac{E_i^2}{2\eta} d\Omega r_i^2 = |\Gamma|^2 R^2 \frac{E_i^2}{2\eta} d\Omega r_i^2 + S^2 \frac{E_i^2}{2\eta} d\Omega r_i^2 + P_p \quad (4)$$

com η sendo a impedância intrínseca do espaço-livre. Sabendo-se que $\frac{E_i^2}{2\eta} d\Omega r_i^2$ é igual a potência P_i incidente no elemento de superfície dS , tem-se que a Eq.(4) pode ser reduzida a:

$$1 = |\Gamma|^2 R^2 + S^2 + \frac{P_p}{P_i} \quad (5)$$

O fator R representa o coeficiente de atenuação que deve ser aplicado ao coeficiente de reflexão Γ para se contabilizar a redução de energia na direção especular devido ao espalhamento. Para o caso geral, o mesmo deve ser estimado. Valores típicos de S e de R encontrados para edificações são $S = 0,316$ (10% da potência incidente é espalhada, $S^2 = 0,1$) e $R = 0,6$ [7].

O padrão de espalhamento onde $G_s = \sqrt{\cos\theta_s}$ é denominado na literatura de padrão Lambertiano, apresentando um lóbulo de radiação de espalhamento máximo na direção perpendicular ao elemento de superfície dS . Este padrão foi examinado com detalhes nos trabalhos anteriores de Vittorio Degli *et al.* ([3],[6]-[7]), apresentando bons resultados. Recentemente, Vittorio Degli *et al.* em [8], propuseram o uso de outros três padrões de espalhamento de lóbulo simples. Estes novos padrões apresentam um lóbulo de radiação de espalhamento máximo na direção de reflexão espelhada (θ_r). Através de verificação experimental (medidas) realizada na mesma referência ([8]), tais padrões apresentaram desempenho superior ao provido pelo padrão clássico Lambertiano.

B. Espalhamento Difuso para Paredes “Distantes”

Quando a parede está “distante” dos terminais de rádio (Tx e Rx), ou seja, quando o segundo ou o terceiro elipsóide de *Fresnel* são parcialmente interceptados pela parede, ou sem interceptação alguma, é adotado uma versão simplificada da abordagem ER. Dado que o ângulo de espalhamento (θ_s na Fig.1) é quase o mesmo para todos os elementos de superfície, a integral da expressão (3) pode ser substituída pela seguinte expressão:

$$E_{s_{total}} = K_0 \cdot S \cdot G_s \sqrt{\frac{A \cdot \cos\theta_i}{\pi}} \frac{K}{r_i r_s} \quad (6)$$

onde A é a área da superfície da parede. Esta abordagem simplificada corresponde à consideração de um padrão de espalhamento G_s para a superfície inteira da parede “distante”. Neste caso, o raio espalhado é considerado como originando-se do baricentro da parede.

III. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A seguir alguns aspectos importantes para a implementação computacional do modelo de ER são descritos ou discutidos:

A. Ordem de espalhamento, combinação a outros mecanismos

Neste artigo, por simplicidade, apenas o espalhamento de primeira ordem será considerado para o modelo. Apesar da extensão para múltiplos espalhamentos ser simples e direta, espera-se que a contribuição do espalhamento de segunda ordem ou de ordens superiores seja desprezível [9], devido principalmente ao campo espalhado decair com o produto das distâncias r_i e r_s . A combinação do efeito de espalhamento difuso com outros mecanismos (reflexão e difração) também será desconsiderada neste trabalho.

B. Identificação da abordagem (“próxima” ou “distante”)

A identificação de qual abordagem do modelo de ER deve ser utilizada é realizada através da verificação se a parede intercepta os dois ou três primeiros elipsóides de *Fresnel* cujos focos são o Tx e a imagem de Rx (Rx') com relação à mesma. Para a verificação do teste de obstrução do(s) elipsóide(s) com a parede no espaço tridimensional (3D), foi proposta uma metodologia baseada na geometria apresentada na Fig.2.

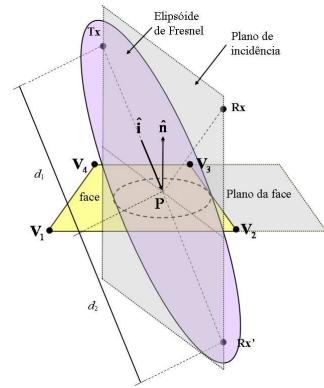


Fig. 2. Geometria para determinação dos raios dos elipsóides de *Fresnel* em pontos potenciais de obstrução (vértices da face da parede).

Com base na geometria da Fig.2 é possível definir:

P = ponto potencial de reflexão no plano que contém a face da parede (este ponto não necessariamente deve pertencer à face);

$S_i = V_i - P$;

V_i = vértice i da face da parede;

\hat{i} = diretor do raio incidente;

\hat{n} = normal à face;

d = $d_1 + d_2$ = distância entre o Tx e a imagem de Rx (Rx');

d_1 = distância entre o Tx e o ponto P ;

d_2 = distância entre o ponto P e Rx' ;

$z_i = d_1 + (S_i \cdot \hat{i})$ = ponto ao longo do eixo axial do elipsóide onde deve ser calculado o raio para um determinado vértice i ;

$R_i = |S_i \times \hat{i}|$ = distância perpendicular de V_i ao raio \hat{i} .

A identificação segue o seguinte procedimento:

- Para cada vértice i , verifica-se se o mesmo provoca obstrução no 2º e no 3º elipsóides, ou seja:
 - Se P estiver sobre a face: $R_i > R_f(n, z_i, d, \lambda)$
 - Se P não estiver sobre a face: $R_i < R_f(n, z_i, d, \lambda)$
 onde $R_f(n, z_i, d, \lambda)$ é o raio do n -ésimo elipsóide de *Fresnel* para o ponto z_i , distância d e comprimento de onda λ .
- Se para todos os vértices os testes acima forem verdadeiros, a face pode ser considerada como “próxima”. Se para algum vértice o teste falhar, a face é então considerada como “distante”. É importante comentar que basta um teste resultar em falso para que a face seja enquadrada como “distante”, podendo dessa forma, se reduzir o número de testes totais necessários para tal definição.

C. Critério de divisão das faces em quadrículas

Para paredes consideradas “próximas” o campo espalhado total pode ser calculado pela integração da expressão (2) sobre a superfície inteira da parede (S_{parede}). Entretanto, para a avaliação numérica desta integral o elemento de superfície é considerado um pequena quadrícula de dimensão proporcional ao comprimento de onda adotado. O critério para a divisão das faces em quadrículas é então um parâmetro do modelo.

D. Agrupamento de Resultados GO/UTD e ER

O agrupamento de resultados providos entre as abordagens GO/UTD e ER pode ser realizado em uma fase de pós-processamento, devendo considerar os seguintes aspectos:

- Os campos providos pelo modelo GO/UTD são ditos coerentes, pois consideram além da amplitude dos campos, a polarização e a fase dos mesmos. Já os campos providos pela abordagem ER são ditos incoerentes, justamente por considerarem apenas a informação de amplitude dos campos. Assim, para se somar as contribuições das duas abordagens, deve-se ou atribuir uma polarização e fase arbitrárias aos percursos de raios providos pelo modelo ER e somar as contribuições das duas abordagens de forma coerente, ou realizar a soma incoerente (sem considerar polarização e fase) das contribuições resultantes dos modelos GO/UTD e ER.
- É importante enfatizar que a soma incoerente pode gerar interpretações inconsistentes do campo resultante das duas abordagens, dado que os campos GO/UTD e ER, neste caso, nunca seriam interferências destrutivas, o que pode ocorrer na prática. A abordagem por soma coerente pode prover resultados mais realistas, sendo a arbitrariedade da fase e polarização dos campos ER modelada geralmente por distribuições uniformes.

IV. RESULTADOS

Para investigar o impacto do espalhamento difuso em situações onde a componente coerente do campo (reflexão/difração) pode não representar um mecanismo muito eficiente de difusão de energia, foi considerado o cenário mostrado na Fig.3. Nestes casos, a propagação se dá principalmente ao redor dos prédios ao invés de sobre os mesmos, podendo o espalhamento difuso representar uma forma eficiente de transferência de potência entorno das esquinas de ruas.

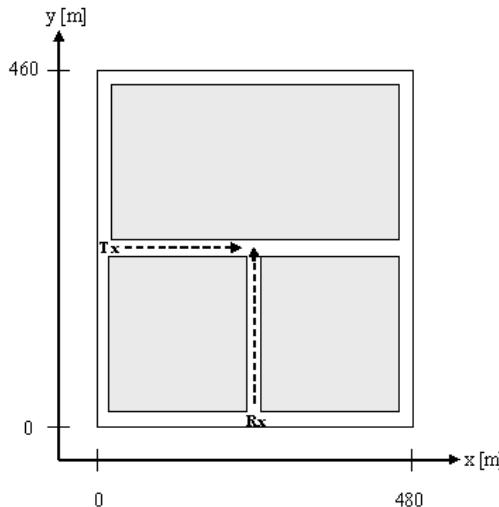


Fig. 3. Cenário: Interseção de ruas no formato de “T”.

No cenário apresentado, o Tx está a uma altura de 8,5 m e os pontos de recepção a uma altura de 1,5 m. Todas as

antenas são dipolos de meia onda verticalmente polarizadas. O algoritmo de traçado de raios usado foi o modelo clássico SBR (*Shooting-and-Bouncing-Rays*) 3D juntamente com a GO/UTD, brevemente descritos em [1]. Os campos foram calculados a uma frequência de 1 GHz com percursos envolvendo até 5 reflexões e 2 difrações. A adoção deste dois últimos valores foi determinada após a verificação de que o aumento dos mesmos não gerava mudanças significativas na predição de campo, além de aumentar consideravelmente o custo computacional requerido. Os efeitos de percursos que difratam sobre os topos dos prédios foram desprezados devido as antenas transmissora e receptoras estarem bem abaixo das alturas dos mesmos (altura dos prédios igual a 30 m). Nesses casos, tais percursos apresentam níveis de potência muito baixos comparados com os outros percursos que propagam entre os prédios [1]. Seguindo a sugestão apresentada em [3], foi adotado um valor para a permissividade relativa de todas as paredes dos prédios de 7, e uma condutividade de 0,2 S/m. Uma permissividade relativa de 15 e uma condutividade de 0,05 S/m foram usadas para o solo. O padrão de espalhamento adotado foi o Lambertiano.

A diferença de nível de sinal recebido entre a contribuição incoerente (P_{ER} - espalhamento difuso) e a contribuição coerente (P_{UTD}) ao longo do percurso (vide Fig.3) para diversas posições do Tx ($x = 40, 80, 120, 160$ e 200 m) é mostrada na Fig.4.

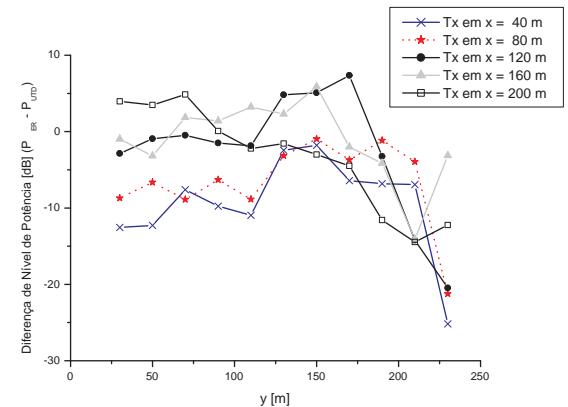


Fig. 4. Diferença de nível de potência [dB] ($P_{ER} - P_{UTD}$).

É possível evidenciar que a contribuição da ER é várias vezes comparável ou maior que a da GO/UTD, especialmente quando o transmissor Tx está próximo da interseção da rua (mas não em visada - LOS). É importante comentar ainda que a contribuição da GO/UTD foi sobreestimada, pois nenhum coeficiente de atenuação R foi aplicado para as componentes coerentes de campo (reflexão/difração).

Um outro parâmetro de rede importante no qual o espalhamento difuso tem um impacto significante é o espalhamento temporal rms (*rms delay spread*) [3]. A Fig.5 mostra a variação de tal parâmetro para o percurso de recepção adotado considerando apenas a contribuição GO/UTD. O efeito da adição do espalhamento difuso no espalhamento temporal rms é mostrado na Fig.6.

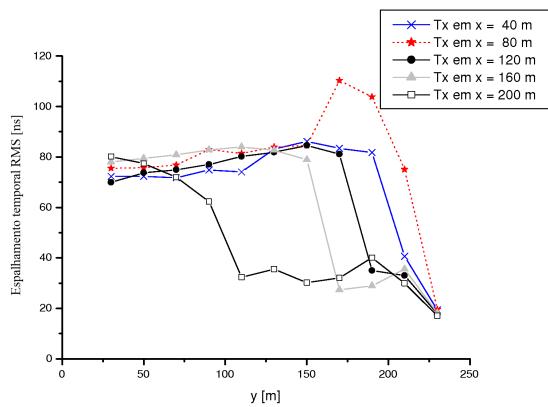


Fig. 5. Espalhamento temporal RMS para apenas a contribuição da GO/UTD

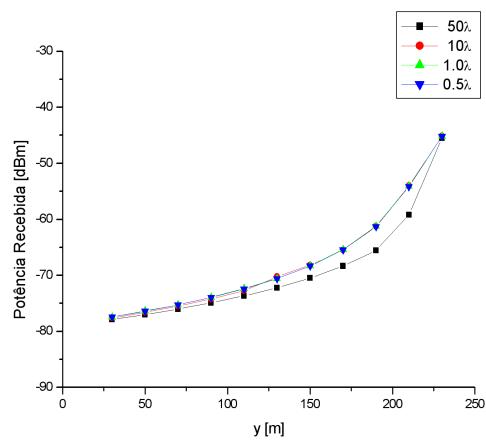


Fig. 7. Potência recebida (ER) para vários critérios de divisão de faces

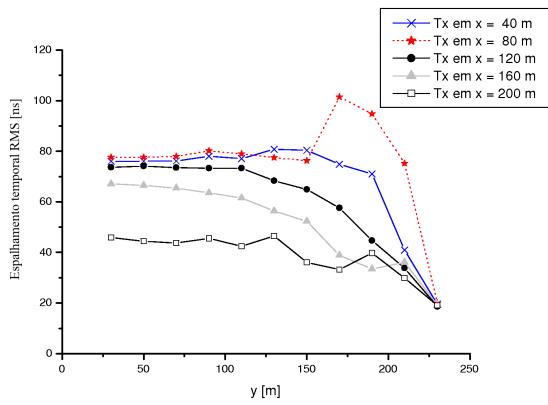


Fig. 6. Espalhamento temporal RMS considerando GO/UTD + ER

É evidente que a contribuição da ER tem um importante impacto no valor do espalhamento temporal rms. Na Fig.6 as curvas apresentam um padrão de comportamento mais uniforme e realista em relação às curvas apresentadas na Fig.5.

É interessante avaliar também o impacto do critério de divisão das faces adotado (quando as faces forem consideradas como “próxima”) na precisão de predição do campo espalhado. A Fig.7 apresenta a potência recebida ao longo do percurso de recepção com o Tx localizado em $x = 160$ m para quatro critérios de divisão ($\lambda/2$, λ , 10λ e 50λ).

Nota-se que a potência recebida não se altera significativamente com a redução do número de quadrículas geradas (i.e., com o uso de critérios de divisões maiores). Entretanto, para o critério de 50λ , a curva apresenta divergências importantes em alguns trechos do percurso, o que pode gerar grandes erros de previsão em alguns casos. A escolha de um critério de divisão adequado deve-se levar em consideração o compromisso entre precisão de predição e recursos computacionais exigidos. É importante enfatizar que o uso de critérios de divisão muito pequenos acarreta um aumento considerável do consumo de recursos computacionais (processamento e memória) sem trazer grandes melhorias significativas na precisão de predição.

V. CONCLUSÕES

Um modelo de espalhamento de difuso (denominado de Rugosidade Efetiva - ER) usado na predição de rádio-propagação foi descrito para ser usado em conjunto com técnicas de traçado de raios 3D. A avaliação do impacto desta abordagem em relação a uma puramente baseada em GO/UTD foi realizada através de simulações em um ambiente urbano típico. Foi constatado que em alguns casos a intensidade de campo provida pela abordagem ER é maior ou comparável à intensidade de campo provida pela abordagem GO/UTD. Adicionalmente, verificou-se que a contribuição da abordagem ER altera consideravelmente o parâmetro de espalhamento temporal rms, o que enfatiza a importância deste efeito na propagação. Questões de precisão e recursos computacionais requeridos pela abordagem foram também discutidas.

REFERÊNCIAS

- Chen, Z., Delis, A., Bertoni, H.L., “Radio-wave propagation predictions using ray-tracing techniques on a network of workstations (NOW),” *J. Parallel Distrib. Comput.*, 64 (2004) 1127-1156.
- Cerasoli, C., “The use of ray tracing models to predict MIMO performance in urban environments,” *Military Communications Conference - MILCOM 2006*, Washington, pp.1-8, Oct. 2006.
- Degli-Esposti, V., Guiducci, D., de'Marsi, A., Azzi, P., Fuschini, F., “An advanced field prediction model including diffuse scattering,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, Issue: 7, July 2004, pp. 1717 - 1728.
- Beckmann, P. and Spizzichino, A., *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Oxford, U.K.: Pergamon Press, 1963.
- Fuks, I. M., “Wave diffraction by a rough boundary of an arbitrary plane-layered medium,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, pp.630-639, Apr. 2001.
- Degli-Esposti, V., “A diffuse scattering model for urban propagation prediction,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, pp. 1111-1113, July 2001.
- Degli-Esposti, V. and Bertoni, H. L., “Evaluation of the role of diffuse scattering in urban microcellular propagation,” in *Proc. IEEE-VTC 99-Fall*, Amsterdam, The Netherlands, Sept. 19-22, 1999.
- Degli-Esposti, V., Fuschini, F., Vitucci, E. and Graziani, D., “Measurements and modelling of scattering from building walls,” *1st Mobile & Wireless Communication Summit*, Dresden - GERMANY, June, 2005.
- Kanatas, A.G. and Constantinou, P., “A propagation prediction tool for urban mobile radio systems,” *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 49, no. 4, July 2000.