

Predição de Perda de Propagação de Ondas de Rádio em Ambientes Florestais: uma Revisão de Métodos Analíticos e Numéricos de Modelagem

Victor A. Dmitriev, Mateus G. Lima e Bruno W. Martins

Universidade Federal do Pará – Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá. CEP 66075-110. Caixa postal 479/ Belém - Pará - Brasil

Resumo — Modelos de propagação de ondas eletromagnéticas são importantes para desenvolvimento de projetos de sistema de comunicação, para análise estratégica, tática e operacional de ambientes florestais. Uma revisão da bibliografia sobre atenuação de ondas de rádio em ambientes florestais é apresentada. O foco deste trabalho é a revisão e resumo dos métodos analíticos clássicos e numéricos de modelagem de perda e predição de propagação. As descrições destes métodos fornecem informações sobre os processos físicos que as ondas de rádio sofrem enquanto se propagam através de uma floresta. Além disso, descrevemos o trabalho experimental feito nesta área e o desenvolvimento de modelos empíricos de predição de perdas de propagação.

Palavras-Chave — Modelos de propagação de ondas eletromagnéticas, Ambientes florestais, Predição de propagação.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alta taxa de dados e da limitada largura de banda disponível motiva o desenvolvimento da comunicação sem fio. A fim de prever, simular e projetar sistemas de comunicação de alto desempenho e características de propagação exata, a complexidade do ambiente tem que ser conhecida. Um ambiente complexo bem conhecido é a floresta. O aparecimento do meio de folhagem na trajetória do *link* de comunicação tem efeitos significativos sobre a qualidade do sinal recebido. Isto porque, espalhadores distintos na floresta, como as folhas distribuídas aleatoriamente, galhos, ramos e troncos de árvores podem causar atenuação, dispersão, difração e absorção da radiação de ondas de propagação. Isto irá restringir severamente a concepção de sistemas de comunicação e, por isso, tem sido um assunto de interesse para os pesquisadores há muitos anos.

Desde 1960, uma quantidade significativa de trabalhos têm investigado a propagação de ondas de rádio em ambiente florestal. Trabalhos analíticos e empíricos sobre a modelagem e caracterização de canais florestais foram realizados. Há muitos fatores externos que causam a variação da propagação de ondas de rádio e até mesmo o colapso completo do *link* de comunicação na floresta.

V. A. Dmitriev, victor@ufpa.br, Tel (91) 3201-8080; M. G. Lima, mateusl@ufpa.br; B.W. Martins, brwallacy@ig.com.br.
Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, através do Projeto RH-TV Digital: Antenas e Modelos de Propagação Eficientes para SBTVD-T.

Trabalhos analíticos [1, 2] e experimentais [3] têm sido realizados sobre os ambientes florestais. No entanto, ainda há uma quantidade significativa do trabalho de investigação que precisa ser realizado, especialmente para o trabalho empírico, que é específico do local, e limita a aplicação prática do trabalho de investigação existente. O emprego com êxito das técnicas existentes em ambiente florestal requer o conhecimento detalhado dos efeitos da folhagem sobre a propagação de ondas de rádio.

No caso específico da floresta Amazônica, algumas características devem ser observadas na análise da propagação de ondas eletromagnéticas neste ambiente. Primeiro de tudo, a floresta Amazônica é de alta umidade. A vegetação e o terreno possuem morfologia dinâmica que muda de acordo com as variações climáticas periódicas anualmente, modificando alguns parâmetros físicos. O ambiente de vegetação pode ser caracterizado por alguns parâmetros [4], tais como:

- (1) o tipo de vegetação: altura média, a forma e a distribuição dos elementos (troncos, galhos e folhas);
- (2) a densidade do espaço: número de árvores por unidade de área;
- (3) o teor de água da vegetação: o volume de água depositada na superfície dos elementos e no interior dos troncos e galhos. Outros parâmetros importantes são as características elétricas do solo [5].

Para a faixa de frequência onde os espalhadores são pequenos, comparados com o comprimento de onda, o espalhamento pode ser estimado utilizando parâmetros efetivos do meio. A constante dielétrica pode ser obtida através de modelos teóricos ou de fórmulas semi-empíricas. Entretanto, as fórmulas, em muitos casos, possuem pouca versatilidade.

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão abrangente da propagação de ondas de rádio através da floresta, com foco na previsão de perda de propagação. Este artigo de revisão deve servir como uma referência para futuros estudos de propagação de ondas de rádio florestais, e também pode servir como um elemento fundamental para a implementação de modernos sistemas de comunicação sem fio, como sistemas MIMO e UWB em ambiente florestal. Os resultados publicados a partir do ano de 1960 até 2009 são revistos.

Ambos os estudos analíticos e empíricos estão incluídos nesta revisão. Modelagem de perda por caminho e previsão de perda na floresta são comentados na Seção II e,

finalmente, algumas considerações e eventuais perspectivas futuras são propostas na Seção III.

II. PREDIÇÃO E MODELAGEM DE PERDA POR CAMINHO

Nas últimas décadas foram desenvolvidos e aperfeiçoados modelos para a propagação de ondas eletromagnéticas. Esses modelos são desenvolvidos analiticamente e/ou empiricamente. Descrevemos alguns desses modelos e as técnicas utilizadas para melhorar a eficiência dos mesmos.

A. Modelos analíticos e numéricos

Em 1967, Tamir [6] analisou a propagação de ondas de rádio em ambientes florestais na banda 1-100 MHz, onde um bloco dissipativo é empregado para descrever a configuração da floresta. Ele explicou o fenômeno associado à penetração de uma folhagem extensa por um modo de propagação de onda lateral. Posteriormente, Dence e Tamir [7] e Tamir [8] estenderam o estudo teórico sobre a propagação em um ambiente florestal, com a consideração do efeito de solo na propagação de ondas de rádio na faixa de frequência de 2-200 MHz.

Ao contrário dos estudos de caso originais feito por Tamir em [6], e mais tarde com Dence em [7], onde tanto o transmissor quanto o receptor estão localizados dentro da floresta, Tamir, no trabalho [8] tratou do caso em que qualquer um dos terminais está localizado fora da floresta. Neste trabalho, ele usou a abordagem *ray-tracing* para lidar com a propagação de ondas de rádio, por meio de uma aplicação do princípio da equivalência ou de Huygens, onde o modelo de três camadas (camada de ar, camada da floresta e camada de solo) foi implementado na banda VHF para estudar a propagação de ondas de rádio na floresta.

Recentemente, o algoritmo para Equação Parabólica (PE) de onda completa [9] e a técnica de integração do campo em superfícies [10], que conduz a uma solução semi-exata para o campo recebido, foram utilizados para estudar a propagação de ondas de rádio na floresta. Entretanto, ao contrário de Tamir [8], a assimetria perceptível no tratamento de *links* ascendente e descendente é experimentada quando um dos terminais está localizado fora da floresta.

Em [2], Liao e Sarabandi relatam que o *ray-tracing* utilizado em [8] fornece resultados precisos em pontos distantes do plano de truncamento da vegetação, quando a altura do receptor é grande em relação ao comprimento de onda. No entanto, este método tende a subestimar a perda por caminho para o caso quando o receptor estiver próximo do chão. Recentemente, a solução exata da integral de Sommerfeld foi implementada com sucesso para o modelo de um bloco de três camadas anisotrópicas na banda de 25-100 MHz por Li e Ling [10], onde a permissividade efetiva e condutividade da floresta são extraídos para cada camada, mostrando anisotropia considerável e dependência com a frequência.

A representação da floresta como um bloco dielétrico dissipativo [6 - 10] torna-se pobre para frequências acima de 200 MHz, onde a vegetação não pode ser considerada como um meio homogêneo, uma vez que as dimensões da vegetação têm magnitude da ordem do comprimento de onda. Após o sucesso em analisar o referido modelo de três camadas usando as funções diádicas de Green em [11],

Cavalcante *et al.* então propuseram um modelo de quatro camadas em [12] (uma camada de ar, uma camada de copa, uma camada do tronco e uma camada de solo), tendo em conta a não-homogeneidade vertical das florestas com o modo de propagação da onda lateral, quando a frequência está acima de 200 MHz (principalmente em UHF). Em seu trabalho, duas camadas dielétricas isotrópicas e homogêneas, colocadas sobre um plano de terra semi-infinito, são usadas para representar as camadas da copa das árvores e dos troncos de uma floresta.

As anisotropias foram posteriormente introduzidas no meio dielétrico do modelo de quatro camadas por Seker e Schneider em [13], e Seker em [14], utilizando o método dos potenciais de Hertz para a faixa de frequência de 200-2000 MHz, para melhorar o modelo de quatro camadas proposto por Cavalcante *et al.* em [12].

Nos anos mais recentes, Li *et al.* [15, 17 e 18] e Koh *et al.* [16] realizaram um extenso estudo da propagação de ondas de rádio em um meio de quatro camadas de floresta, nas bandas VHF e UHF, através da utilização de uma análise de onda completa, usando as funções diádicas de Green. Inicialmente é assumido que todas as camadas na geometria de quatro camadas são isotrópicas e homogêneas em [15, 16], onde a forma fechada dos campos elétricos é obtida por meio da aproximação quase-estática, técnica *saddle-point* e integração *branchcut* no plano complexo. Assim, a propagação do campo elétrico pode ser expressa em termos de ondas diretas, ondas multi-refletidas e ondas laterais. O trabalho de pesquisa também foi conduzido para o caso em que o receptor está localizado na camada dos troncos e para o caso onde o receptor está localizado na camada da copa das árvores. Para ambos os casos, o transmissor fica dentro da camada dos troncos.

Li *et al.* [15] e Koh *et al.* [16] concluíram que, embora as ondas laterais que se propagam ao longo das interfaces ar-copa, copa-tronco e tronco-solo tenham um papel importante no mecanismo de propagação, apenas as ondas laterais ao longo da parte superior da interface ar-copa dominam o campo total na zona distante. Posteriormente, eles estenderam os seus estudos [17, 18] para um caso mais geral, com duas camadas eletricamente anisotrópicas no intervalo de frequências de 200-2000 MHz: uma camada de copa de árvores e uma camada de troncos.

Concluimos que em todas as publicações citadas anteriormente, as ondas laterais ao longo da parte superior da interface ar-copa desempenham um papel mais importante na comunicação através de uma floresta densa e espessa nas bandas VHF e UHF. Ondas laterais ao longo de outras interfaces; copa-tronco e tronco-solo etc., e ondas multi-refletidas a partir das interfaces entre camadas adjacentes nos modelos multi-camada, também desempenham um papel importante para a propagação de ondas de rádio em florestas.

Além disso, Sarabandi e Koh [19] realizaram um estudo sobre o efeito da rugosidade da interface ar-copa na propagação de ondas em florestas nas bandas HF e VHF. A formulação analítica baseia-se na equação integral volumétrica em conjunto com a aproximação de Born distorcida. É demonstrado que a rugosidade da interface atenua ligeiramente a onda lateral e a taxa de atenuação aumenta quando o nível do valor quadrático médio (RMS) da rugosidade da interface aumenta.

Mais tarde, Liao e Sarabandi [1] estenderam o trabalho de investigação a partir de [19] para o cenário em que tanto o

transmissor ou o receptor, ou ambos, estão localizadas acima da camada dielétrica. Em tal cenário, as ondas de Norton são observadas. Apesar das ondas de Norton estarem localizadas próximas da interface ar/dielétrico, elas contribuem de forma significativa para a forma da propagação de ondas de rádio sobre o meio florestal.

No entanto, à medida que a frequência aumenta para micro-ondas em uma floresta grande e densa, as ondas milimétricas laterais deixam de existir [6]. Isso acontece porque a intensidade RMS da rugosidade da interface ar-copa aumenta significativamente em relação ao comprimento de onda do sinal de propagação [19]. Portanto, a rugosidade da interface ar-copa atenua a propagação da onda ao longo da copa das árvores (ou seja, a onda lateral) de forma significativa.

Desde que a onda lateral seja atenuada severamente, o espalhamento múltiplo [20] devido a objetos dielétricos, tais como galhos, ramos e folhas dentro da floresta contribuem significativamente para a propagação de ondas de rádio sobre uma grande floresta.

Koh *et al.* [21] aplicaram uma técnica de onda completa numérica, método dos momentos (MOM), para calcular o espalhamento a partir de um conjunto de folhas em 35 GHz. Eles relataram que a aproximação de Foldy, utilizada em conjunto com a teoria de espalhamento único, superestima a taxa de atenuação em ondas de frequências milimétricas.

Wang e Sarabandi [22] usaram a aproximação distorcida de Born para modelar o espalhamento por objetos dielétricos em macro modelos nas florestas. Ao incluir efeitos de múltiplos espalhamentos no modelo de simulação, a concordância obtida para a média e o desvio-padrão da perda por caminho são muito melhores. O efeito sobre a redução de recursos computacionais para a simulação é executada em seu trabalho posterior, em [23].

Correspondente à abordagem anterior com base na teoria das ondas, a teoria da transferência radiativa tem sido também utilizada para prever e analisar a propagação de ondas em florestas, para micro-ondas e frequências de ondas milimétricas [24]. No entanto, a abordagem de transferência radiativa é geralmente aplicada a um meio homogêneo. A fim de superar esta limitação, e torná-la aplicável a um meio de folhagem não homogêneo, uma versão melhorada, nomeada como o modelo de transferência radiativa discreto (modelo dRET), foi proposta por Diadascalou *et al.* para os espécimes de vegetação isolados [25]. Este modelo é reforçado por Fernandes *et al.* [26]. No entanto, esse algoritmo reforçado requer discretização da folhagem em pequenas células e, portanto, é numericamente intratável para grandes distâncias de propagação, como relatado em [23].

B. Modelos empíricos e semi-empíricos

Muitos estudos têm sido realizados para caracterizar e modelar os efeitos da vegetação experimentalmente. Eles foram examinados e sumarizados em vários modelos conhecidos de perda através de vegetação, como o modelo de decaimento exponencial modificado de Weissberger [27], recomendação ITU (ITU-R) [28], o modelo COST235 [29] e estão resumidos a seguir.

O modelo de decaimento exponencial modificado de Weissberger é aplicável quando o caminho do raio está bloqueado por árvores, encontradas em climas temperados, de folhagem densa e seca. É aplicável em situações onde a

propagação é susceptível de ocorrer por entre um bosque de árvores, em vez de difração ao longo do topo das árvores. Ele é dado pela expressão a seguir:

$$L_W (dB) = \begin{cases} 1.33 \times f^{0.284} d^{0.588} & 14 m < d \leq 400 m \\ 0.45 \times f^{0.284} d & 0 m < d \leq 14 m \end{cases}, \quad (1)$$

onde L_W é a perda na vegetação em dB, f é a frequência em GHz e d é a espessura das árvores em metros. A diferença na perda por caminho nas folhas das árvores e fora delas é relatada a ser cerca de 3 a 5 dB.

A recomendação da ITU (ITU-R) foi desenvolvida a partir de medidas realizadas principalmente em UHF, e foi proposta para os casos em que tanto o emissor ou o receptor estiverem perto de um pequeno bosque de árvores ($d < 400 m$), de modo que a maior parte do sinal se propague através das árvores:

$$L_{ITU-R} (dB) = 0.45 \times f^{0.3} d^{0.6} \quad (2)$$

O modelo COST235, que foi proposto com base em medições feitas em frequências de onda de milimétricas (9,6 GHz a 57,6 GHz), através de um pequeno bosque de árvores ($d < 200 m$) é

$$L_{COST} (dB) = \begin{cases} 26.6 \times f^{-0.2} d^{0.5} & \text{sem folhagem} \\ 15.6 \times f^{-0.009} d^{0.26} & \text{com folhagem} \end{cases}. \quad (3)$$

No modelo COST235, Eq. (3), as medições foram realizadas sobre duas temporadas, quando as árvores estão com folhagem e quando eles estão sem folhagem. Tanto para o modelo ITU-R quanto para o COST235, L_{ITU-R} e L_{COST} são as perdas pela vegetação, em dB, f é a frequência em MHz e d é a extensão da camada de árvores em metros.

A partir do estudo dos modelos já estabelecidos, constatamos que a perda por caminho através da vegetação, em geral, pode ser bem representada pela seguinte expressão,

$$L_{folhagem} (dB) = A \times f^B d^C. \quad (4)$$

Os três parâmetros, A , B e C na Eq. (4) podem ser empiricamente otimizados, através de técnicas de regressão baseados em dados de medidas específicas. Uma campanha de otimização foi realizada, utilizando dados de medição em 11,2 e 20 GHz ($d < 120 m$) por Al-Nuaimi e Stephens [30], e o modelo Adaptado da ITU-R (FITU-R) é proposto como,

$$L_{FITU-R} (dB) = \begin{cases} 0.37 \times f^{0.18} d^{0.59} & \text{sem folhagem} \\ 0.39 \times f^{0.39} d^{0.25} & \text{com folhagem} \end{cases}, \quad (5)$$

onde L_{FITU-R} é a perda na vegetação em dB, f é a frequência em MHz e d é a espessura das árvores em metros.

Em comparação com o modelo de decaimento exponencial [27]-[30], Seville e Craig [31] propuseram um modelo de gradiente diferente de zero (NZG) em ondas milimétricas para alta capacidade no link ponto-a-ponto, dado por,

$$L_{NZG} (dB) = R_\infty d + k \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-(R_0 - R_\infty) d}{k} \right] \right\} \quad (6)$$

onde L_{NZG} é a atenuação em dB, R_0 e R_∞ são os valores inicial e final da atenuação em dB/m, d é a espessura da floresta em metros, k é a atenuação do deslocamento final, em dB.

Com a consideração da geometria local, o modelo de Gradiente Dual (DG) [32] foi desenvolvido com base no estudo do modelo NZG. Este modelo usa antenas de largura de feixes diferentes, para acomodar a diferença nos níveis de sinal recebido. O modelo DG é então dado como,

$$L_{DG} (dB) = \frac{R_{\infty}}{f^a w^b} d + \frac{k}{w^c} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-(R_0 - R_{\infty}) w^c d}{k} \right] \right\}, \quad (7)$$

onde L_{DG} é a atenuação pela vegetação em dB, f é a frequência em GHz, w é a largura de acoplamento efetivo máxima entre as antenas transmissora e receptora e a, b, c são constantes estimadas.

Um estudo comparativo entre os modelos ITU-R, FITU-R e NZG foi realizado por Al-Nuaimi e Stephens em [30]. Eles relataram que o modelo FITU-R produz o menor erro RMS para ambos os casos genéricos: com folhagem e sem folhagem; em comparação com os resultados medidos. Por isso, é considerado o melhor modelo dos três em teste. Além disso, o modelo DG [32] não é recomendado, devido algumas lacunas e imprecisões que foram reveladas em [33], quando comparado ao modelo NZG e outros.

Além disso, em comparação com os modelos de perda através da vegetação propostos nos estudos e pesquisas em [27]-[33], para a propagação de ondas de rádio em florestas, outros componentes de propagação, tais como a onda refletida no solo [34] e a onda lateral [6] etc., também devem ser considerados. Estes têm sido o foco do estudo de propagação em florestas desde 1960.

Recentemente, há um crescente interesse nas comunicações próximas ao solo em áreas de floresta em VHF e UHF, devido ao aumento das aplicações militares e científicas [1]-[3] e [35, 36], etc. Portanto, um conhecimento aprofundado e modelagem do canal da floresta são necessários. Goldman e Swenson [35], Joshi *et al.* [3] e Meng *et al.* [36] iniciaram o trabalho através da realização de uma caracterização experimental da perda por caminho próximo ao solo em bosques, com uma expressão simplificada,

$$PL_{\text{floresta}} (dB) = a + b \log_{10}(d), \quad (8)$$

onde a e b são duas constantes com base nos dados medidos, e a interpretação física de b é a atenuação pela distância.

Os parâmetros do canal estimados pela Eq. (8) em [35,36] são muito precisos, mas são específicos para certos lugares. Por exemplo, embora a estimativa de b em [35] e [36] mantivesse o mesmo comportamento assintótico conforme a frequência aumentava, os valores de b em [36] são maiores que os encontrados em [35] para a mesma banda de frequência. Além disso, medições de perda por caminhos similares e modelagem de comunicações próxima ao solo para sistemas celulares [37] e aplicação UWB [38] também foram realizadas em florestas tropicais e temperadas, com diferentes densidades de árvores, respectivamente. Concluímos, obviamente, que não há provas de que os parâmetros do modelo estimado podem ser universalmente aplicáveis.

Portanto, a fim de fornecer um modelo empírico mais genérico, pesquisadores ([3] e [39], por exemplo) passaram a tratar a modelagem da perda de propagação em florestas, combinando os modelos de perda através de vegetação e reflexão no solo.

III. CONCLUSÕES

Através da análise desses estudos teóricos, verifica-se que estes modelos analíticos invariavelmente requerem o uso de métodos de análise numérica, para fornecer soluções para as formulações matemáticas intratáveis e exigem pesados recursos computacionais. No entanto, estes modelos baseados em física nos fornecem conhecimento inestimável da propagação de ondas de rádio nas florestas em diferentes frequências e são úteis para a investigação.

Por outro lado, a medição direta nos fornece as características exatas do cenário de comunicação em um lugar específico. Baseado em um conjunto de medidas, modelos empíricos geralmente podem ser desenvolvidos através de técnicas de regressão. Em comparação com os modelos analíticos, a vantagem dos modelos empíricos é a simplicidade das expressões matemáticas finais que descrevem os cenários e, conseqüentemente, a sua aplicação direta, embora estes modelos empíricos não apresentem qualquer indicação sobre os processos físicos envolvidos na propagação de ondas de rádio dentro do canal.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Liao and K. Sarabandi, "Near-earth wave propagation characteristics of electric dipole in presence of vegetation or snow layer", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, n° 11, p. 3747-3756, 2005.
- [2] D. Liao and K. Sarabandi, "Modeling and simulation of near-earth propagation in presence of a truncated vegetation layer", IEE Trans. Antennas Propag., vol. 55, n° 3, p. 949-957, 2007.
- [3] G. G. Joshi, C. B. Dietrich, C. R. Anderson, W. G. Newhall, W. A. Davis, J. Isaacs and G. Barnett, "Near-ground channel measurements over line-of-sight and forested paths", IEEE Proc. Microw. Antennas Propag., vol. 152, n° 6, p. 589-596, 2005.
- [4] A. A. Chukhlantsev, "Microwave Emission and Scattering from Vegetation Canopies," J. Electromagn. Waves Appl., vol. 6, n° 8, p. 1043, 1992.
- [5] N. R. Peplinski, F. T. Ulaby and M. C. Dobson, "Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3 GHz Range," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 33, n° 3, p. 803-807, 1995.
- [6] T. Tamir, "On radiowave propagation in forest environments", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 15, n° 6, p. 806-817, 1967.
- [7] D. Dence and T. Tamir, "Radio loss of lateral waves in forest environments", Radio Sci., vol. 4, n° 4, p. 308-318, 1969.
- [8] T. Tamir, "Radio waves propagation along mixed paths in forest environments", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 25, n° 4, p. 471-477, 1977.
- [9] M. Le Palud, "Propagation modeling of VHF radio channel in forest environments", Proc. IEEE Military Commun. Conf., p. 609-614, Monterey, CA, 2004.
- [10] Y. Li and H. Ling, "Numerical modeling and mechanism analysis of VHF wave propagation in forested environments using the equivalent slab model", Progress In Electromagnetics Research – PIER, vol. 91, p. 17-34, 2009.
- [11] G. P. S. Cavalcante and A. J. Giarola, "Optimization of radio communication in media with three layers", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 31, n° 1, p. 141-145, 1983.
- [12] G. P. S. Cavalcante, D. A. Rogers, and A. J. Giardola, "Radio loss in forests using a model with four layered media", Radio Sci., vol. 18, n° 5, p. 691-695, 1983.
- [13] S. S. Seker and A. Schneider, "Stochastic model for pulsed radio transmission through stratified forests", IEE Proc. Microw. Antennas Propag., Vol. 134, n° 4, p. 361-368, 1987.
- [14] S. S. Seker, "Radio pulse transmission along mixed paths in a stratified forest", IEE Proc. Microw. Antennas Propag., vol. 136, n° 1, p. 13-18, 1989.
- [15] L. W. Li, T. S. Yeo, P. S. Kooi, and M. S. Leong, "Radio wave propagation along mixed paths through a four-layered model of rain forest: An analytic approach", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 46, n° 7, p. 1098-1111, 1998.

- [16] J. H. Koh, L. W. Li, P. S. Kooi, T. S. Yeo, and M. S. Leong, "Dominant lateral waves in canopy layer of a four-layered forest", *Radio Sci.*, vol. 34, n° 3, p. 681-691, 1999.
- [17] L. W. Li, T. S. Yeo, P. S. Kooi, M. S. Leong, and J. H. Koh, "Analysis of electromagnetic wave propagation in forest environment along multiple paths", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 13, n° 8, p. 1057-1059, 1999.
- [18] L. W. Li, C. K. Lee, T. S. Yeo, and M. S. Leong, "Wave mode and path characteristics in an inhomogeneous anisotropic forest environment", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, n° 9, p. 2445-2455, 2004.
- [19] K. Sarabandi and I. S. Koh, "Effect of canopy-air interface roughness on HF-VHF wave propagation in forest", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 50, n° 2, p. 111-121, 2002.
- [20] P. D. Matthaeis and R. H. Lang, "Microwave scattering models for cylindrical vegetation components", *Progress In Electromagnetics Research – PIER*, vol. 40, p. 131-153, 2003.
- [21] I. S. Koh, F. Wang, and K. Sarabandi, "Estimation of coherent field attenuation through dense foliage including multiple scattering", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, n° 5, p. 1132-1135, 2003.
- [22] F. Wang and K. Sarabandi, "An enhanced millimeter-wave foliage propagation model", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, n° 7, p. 2138-2145, 2005.
- [23] F. Wang and K. Sarabandi, "A physics-based statistical model for wave propagation through foliage", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, n° 3, p. 958-968, 2007.
- [24] F. K. Schwering, E. J. Violette, and R. H. Espeland, "Millimeter-Wave propagation in vegetation: Experiments and theory", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 26, n° 3, p. 355-367, 1988.
- [25] D. Didascalou, M. Younis, and W. Wiesbeck, "Millimeter-wave scattering and penetration in isolated vegetation structures", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 38, n° 5, p. 2106-2113, 2000.
- [26] T. Fernandes, R. Cladeirinha, M. O. Al-Nuaimi, and J. Richter, "A discrete RET model for millimetre-wave propagation in isolated tree formations", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E88-B, n° 6, p. 2411-2418, 2005.
- [27] M. A. Weissberger, "An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by foliage", *Electromagnetic Compatibility Analysis Center, Annapolis, MD, ECAC-TR-81-101*, 1981.
- [28] CCIR, "Influences of terrain irregularities and vegetation on troposphere propagation", *CCIR Report*, p. 235-236, Geneva, 1986.
- [29] COST235, "Radio propagation effects on next-generation fixed-service terrestrial telecommunication systems", *Final Report*, Luxembourg, 1996.
- [30] M. O. Al-Nuaimi and R. B. L. Stephens, "Measurements and prediction model optimization for signal attenuation in vegetation media at centimetre wave frequencies", *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.*, vol. 145, n° 3, p. 201-206, 1998.
- [31] A. Seville and K. H. Craig, "Semi-empirical model for millimetre-wave vegetation attenuation rates", *Electron. Lett.*, vol. 31, n° 17, p. 1507-1508, 1995.
- [32] A. Seville, "Vegetation attenuation: Modeling and measurements at millimetric frequencies", *Proc. 10th IEE Int. Conf. Antennas Propag.*, 2.5-2.8, Edinburgh, Scotland, 1997.
- [33] N. C. Rogers, A. Seville, J. Richter, D. Ndzi, N. Savage, R. Cladeirinha, A. Shukla, M. Al-Nuaimi, K. Craig, E. Vilar, and J. Austin, "A generic model of 1-60GHz radio propagation through vegetation-Final report", *Tech. Report*, Radiocommunications Agency, 2002.
- [34] Y. Ziade, H. Roussel, M. Lesturgie, and W. Tabbara, "A coherent model of forest propagation - application to detection and localization of targets using the DORT method", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, n° 4, p. 1048-1057, 2008.
- [35] J. Goldman and G. W. Swenson, Jr., "Radio wave propagation through woods", *IEEE Mag. Antennas Propag.*, vol. 41, n° 5, p. 34-36, 1999.
- [36] Y. S. Meng, Y. H. Lee, and B. C. Ng, "Near ground channel characterization and modeling for a tropical forested path", *Proc. 29th URSI General Assembly*, Chicago, USA, 2008.
- [37] S. Phaiboon and S. Somkumpanich, "Mobile path loss characteristics for low base station antenna height in different forest densities", *Proc. First Int. Symp. Wireless Pervasive Computing*, Phuket, Thailand, 2006.
- [38] C. R. Anderson, H. I. Volos, W. C. Headley, F. C. B. Muller, and R. M. Buehrer, "Low antenna ultra wideband propagation measurements and modeling in a forest environment", *Proc. IEEE Wireless Commun. Networking Conf.*, p. 1229-1234, Las Vegas, USA, 2008.
- [39] Y. S. Meng, Y. H. Lee, and B. C. Ng, "Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, n° 5, p. 1461-1468, 2009.