

# Propagação de Microondas sobre a Camada de Floresta

Alves, D. S. V. e Orlando, A. J. F.

Departamento de Microondas e Optoeletrônica, ITA, 12.228-900, São José dos Campos-SP, Brasil

**Resumo** — Para o desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio para regiões de vegetação, o conhecimento detalhado do mecanismo de propagação envolvido é essencial. Neste artigo nós utilizamos o método das diferenças finitas no domínio do tempo (DFDT) como técnica numérica para integrar diretamente as equações rotacionais de Maxwell para o cálculo de parâmetros de propagação sobre a camada de floresta, em contraste com muitos trabalhos sobre propagação através da camada de floresta, onde ocorre alta perda de transmissão. Este artigo descreve uma estrutura computacional inicial para futura implementação de parâmetros físicos aleatórios da rugosidade do topo da camada de floresta.

**Palavras-chaves** — DFDT, Meios Estratificados, Microondas.

## I. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista da propagação de ondas eletromagnéticas em floresta, a Amazônia tem algumas características específicas. Primeiramente, é uma região de alta umidade. A vegetação e o solo possuem características, que mudam de acordo com as variações anuais do clima, modificando alguns parâmetros físicos. O cálculo da propagação de ondas eletromagnéticas nesse tipo de ambiente mostra que o meio impõe severas perdas de transmissão. Para garantir comunicação sem fio na floresta, nas apresentamos uma análise sobre propagação de microondas sobre o topo da floresta para estimar as propriedades do duto de propagação natural e verificar as condições de enlace entre tropas na floresta, enlace entre a tropa e helicóptero de apoio, enlace entre a tropa e a corveta de apoio e enlace através de descontinuidades da camada de floresta sobre rio e ilha.

## II. MODELO DE 3 CAMADAS PARA A FLORESTA

A floresta úmida da Amazônia apresenta uma característica de distribuição de vegetação peculiar, que deve ser levada em consideração no desenvolvimento de um modelo de propagação de ondas eletromagnéticas nesse ambiente.

O modelo de 4 camadas considerado por Cavalcante[1] tem sido adotado em vários trabalhos. Entretanto nós vamos considerar um modelo de 3 camadas[2], onde a floresta é representada em uma única camada. Isto porque a floresta úmida de Amazônia, em contraste com a floresta da Europa e América do Norte, é tipicamente densa, com folhas distribuídas também na altura dos troncos, compondo uma única camada, onde as propriedades elétricas dos constituintes, troncos, galhos e folhas, deve ser consideradas.

Assim, nosso modelo estratificado consiste de 3 camadas horizontais. De acordo com a figura-1, a camada superior é o

espaço livre semi-infinito, a camada intermediária representa a floresta e a camada inferior é o solo.

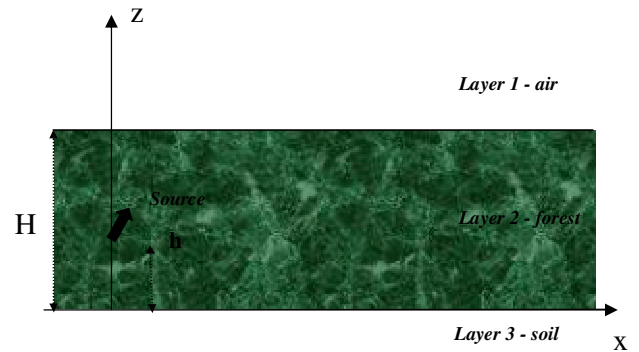


Figura 1: Modelo de 3 camadas para a floresta

Resultados numéricos são computados no presente trabalho na banda de 3-11GHz. Os parâmetros do problema são os seguintes: A posição da antena transmissora (dipolo) acima do solo é  $h=1,5m$ , a altura da camada de vegetação é  $H=30m$ . A permissividade efetiva da camada de floresta  $\epsilon_2=1,12$  e a condutividade  $\sigma_2=0,12mS/m$  foram definidas. Os parâmetros definidos para o solo são permissividade  $\epsilon_3=50$  e condutividade  $\sigma_3=100mS/m$ .

A condutividade elétrica muda com a variação da quantidade de água em cada elemento constituinte da floresta. A Amazônia apresenta um alto índice de umidade, o que a torna um meio de alta absorção para ondas de rádio. A faixa de condutividade é  $0,01-0,5mS/m$ , sendo esses valores extremos típicos para a floresta seca e úmida respectivamente. A polarização  $\alpha$  é variada desde  $0^\circ$  (polarização horizontal) até  $90^\circ$  (polarização vertical) em torno do ângulo limite de refração,  $71^\circ$ , com o objetivo de fazer a onda propagar sobre a camada de floresta, pois a permissividade da floresta é maior que a do ar, resultado 4, de acordo com a figura-2.

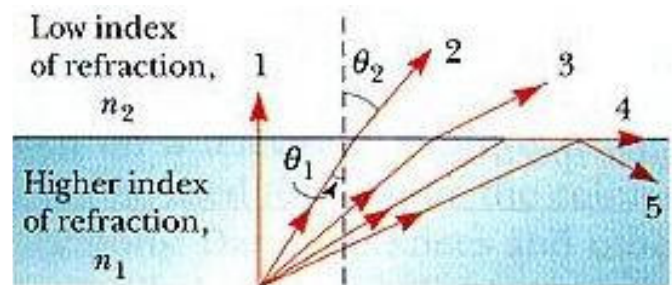


Figura-2: Propagação sobre a camada de floresta

### III. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA DFDT

As equações de Maxwell para duas dimensões, com  $E_x$ ,  $E_y$  e  $H_z$  são:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \sigma E_x \right) \text{ e } \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right)$$

$$\text{e } \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (1)$$

As respectivas equações diferenças para  $E_x$ ,  $E_y$  e  $H_z$  são:

$$E_x^{n+2}(i, j) = E_x^n(i, j) - \frac{\Delta t \cdot \sigma(i, j)}{\varepsilon(i, j)} E_x^n(i, j)$$

$$+ \frac{\Delta t}{\Delta y \cdot \varepsilon(i, j)} [H_z^{n+1}(i, j+1) - H_z^{n+1}(i, j)] \quad (2)$$

$$E_y^{n+2}(i, j) = E_y^n(i, j) - \frac{\Delta t \cdot \sigma(i, j)}{\varepsilon(i, j)} E_y^n(i, j)$$

$$+ \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot \varepsilon(i, j)} [H_z^{n+1}(i+1, j) - H_z^{n+1}(i, j)] \quad (3)$$

$$H_z^{n+1}(i, j) = H_z^{n-1}(i, j)$$

$$+ \frac{\Delta t}{\Delta y \cdot \mu} [E_x^n(i, j+1) - E_x^n(i, j)] \quad (4)$$

$$- \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot \mu} [(E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i, j))]$$

O método DFDT é muito simples em conceito e execução. DFDT é uma solução direta das equações rotacionais de Maxwell dependentes do tempo[3]. O método aplica uma aproximação de diferenças centradas de segunda ordem nas derivadas espacial e temporal dos campos elétrico e magnético diretamente nos operadores diferenciais das equações rotacionais.

O método gera um conjunto de dados amostrados do campo eletromagnético contínuo em um volume do espaço sobre um período de tempo. Simplesmente, DFDT é um procedimento de marcha temporal.

A cada passo temporal, o sistema de equações que atualiza as componentes de campo é completamente explícito e a memória e o tempo computacionais exigidos são proporcionais ao volume modelado.

### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para verificar a estabilidade numérica, o programa foi processado em condições de espaço livre para obter as características de campo próximo em 3 instantes.

A solução não apresenta ondas refletidas pela fronteira de absorção, que simula a propagação para o infinito.

O resultado da computação de propagação de microondas com os valores reais das propriedades constitutivas da subsuperfície, floresta e ar é apresentado na figura-3. A

propagação no ar, acima da cota 60, é livre. A propagação na floresta, entre as cotas 30 e 60 e evidentemente na subsuperfície apresenta velocidade menor. No segundo e terceiro gráficos pode-se observar as múltiplas reflexões na camada de floresta da interface com o ar, quota 60, e da interface com a subsuperfície, quota 30.

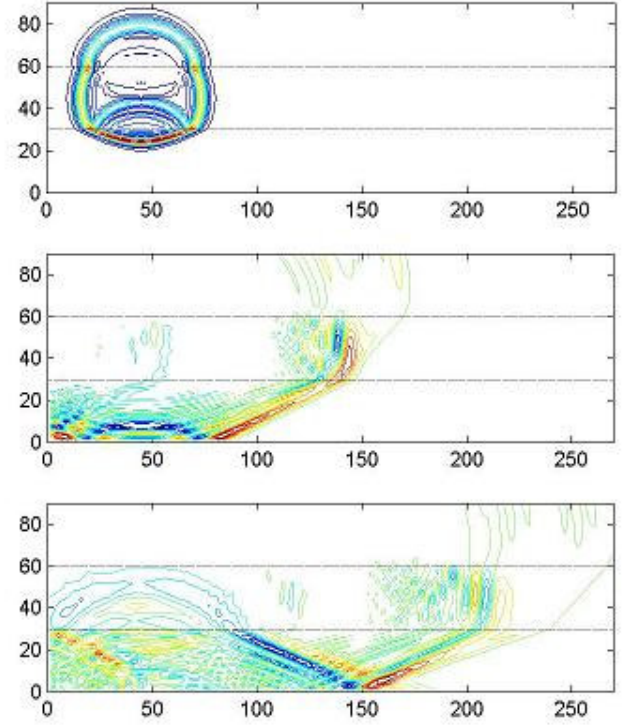


Figura-3: Propagação do pulso no meio de 3 camadas

Sobre a camada de floresta existe um duto de propagação. No segundo gráfico, na abscissa 150, sobre a camada de floresta, a onda de superfície apresenta baixa atenuação. O mesmo comportamento é observado no terceiro gráfico na abscissa 250.

A transmissão através da floresta apresenta perda severa. A transmissão através do duto de propagação, sobre a camada de floresta, permite propagação de pulsos de microondas para enlace de comunicação e radar. A refração de microonda da floresta para o ar ocorre na banda de 3-11GHz para valores de umidade de floresta seca e floresta úmida, durante ou após a chuva.

### REFERENCES

- [1] G. P. S. Cavalcante, D. A. Rogers and A. J. Giardola, "Radio loss in forest using a model with four layered media", Radio Sci. Vol. 18, 691-695, 1983.
- [2] D. S. V. Alves, V. Dmitriev, "Propagation of electromagnetic waves in rain forest environment", SIGE-2006.
- [3] A. Taflov, "Computational electrodynamics", 2000.