

4

Propagação sobre espaços vegetados

A abordagem do problema da propagação em meios vegetados em ambientes de interesse prático, como descritos no capítulo I, usualmente é de complicada modelagem e se constitui em um problema de propagação eletromagnética de grande complexidade.

A onda que se propaga sobre tais ambientes, sofre diversos efeitos como: absorção, espalhamento, atenuação e despolarização [27]. Esses efeitos estão associados a diversos parâmetros como frequência, condições atmosféricas, altura das antenas, propriedades elétricas dos meios, densidade da vegetação, morfologia das espécies vegetais, etc. Tal número de variáveis torna bastante intrincada a modelagem, por introduzirem aleatoriedade e não-linearidade.

Neste capítulo, serão introduzidas algumas abordagens e modelos utilizados para a compreensão da propagação sobre estes espaços.

4.1

Modelo de Tamir

O modelo de Tamir [28-30], apresentado nos anos 60 e 70, para faixas de frequência abaixo de 200 MHz, foi um dos trabalhos precursores sobre o tema e é muito citado até os dias de hoje.

Tamir analisou o mecanismo de propagação de onda lateral, que se propaga ao longo da copa das árvores, utilizando uma metodologia assintótica de estimação do campo irradiado por uma antena dipolo, de dimensões infinitesimais. Foi abordado o caso das antenas estarem posicionadas dentro de uma floresta, que foi modelada como um meio homogêneo, com índice de refração maior que o da atmosfera.

O modelo parte da hipótese de terra plana e meio de propagação composto por três camadas uniformes: solo, floresta e ar. A floresta é modelada como uma camada dielétrica, com perdas, de condutividade finita, posicionada entre o ar e o solo. Considera-se, também, que não há efeito de borda, isto é, os meios são infinitos sobre o plano horizontal, conforme a figura 4.1.

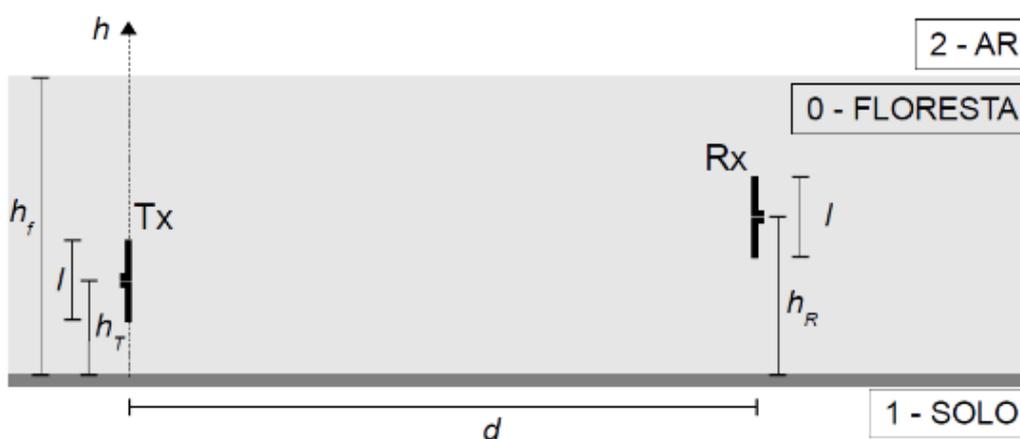


Figura 4.1 - Modelo de três camadas.

A altura média do topo das copas das árvores define a altura da camada floresta h_f . Tamir caracterizou a floresta em três tipos: fina, média e densa. Suas propriedades elétricas podem ser vistas na tabela 4.1.

Floresta	σ_f (mS/m)	ϵ_f	σ_s (mS/m)	ϵ_s	h_f (m)
Fina	0,03	1,03	1	5	5
Média	0,1	1,1	10	20	10
Densa	1,3	1,3	100	50	20

Tabela 4.1 - Características elétricas e tipos de florestas.

ϵ_f é a permissividade relativa da floresta, ϵ_s é a permissividade relativa do solo, e as condutividades relativas da floresta e solo são, σ_f e σ_s , respectivamente.

Segundo este modelo, que é válido para a propagação de ondas cujo comprimento de onda é da ordem da altura média do topo das copas e para distâncias entre as antenas não muito longas, onde se pode desconsiderar o campo recebido por reflexões na atmosfera, o mecanismo predominante é a onda de superfície que se propaga na interseção entre a floresta e o ar, decorrente da refração existente nesta interface (fig. 4.2), também chamada de onda lateral.

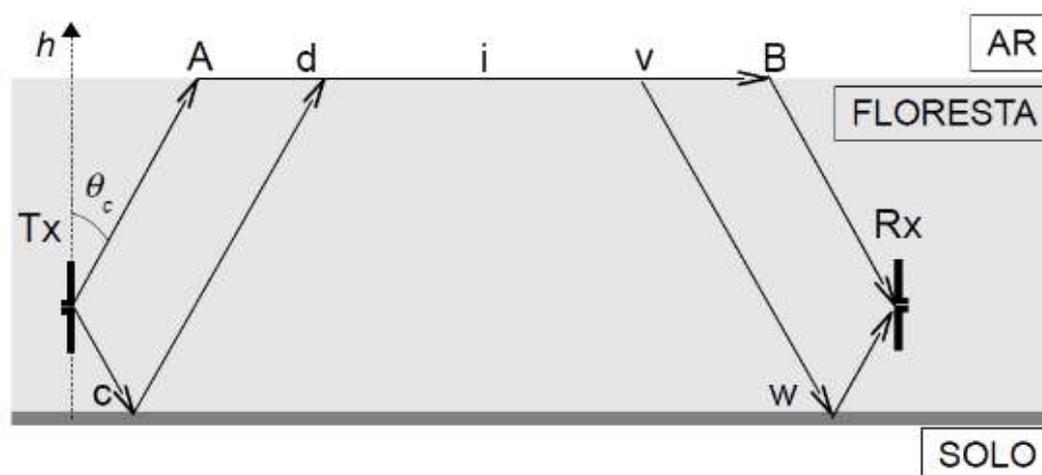


Figura 4.2 - Onda lateral de Tamir, percurso Tx-A-B-Rx (primeira ordem) e percursos Tx-c-d-v-w-Rx e Tx-c-d-B-Rx (segunda ordem).

Os limites de aplicabilidade deste modelo foram discutidos em vários trabalhos posteriores. Existem alguns fatores que limitam o uso deste modelo [31], podemos destacar a faixa de frequências utilizada (2 a 200 MHz) e a distância entre as antenas.

Em relação à frequência, para frequências mais baixas, onde o comprimento de onda supera a altura média do topo das copas, a floresta atua como uma perturbação no campo, e a onda predominante não é a lateral [31]. Em frequências mais altas, com o comprimento de onda bem menor, a contribuição de cada elemento da árvore, tais como galhos, folhas e troncos, já se faz notar com mais intensidade, e tira a eficiência do modelo idealizado por Tamir.

Em relação à distância entre as antenas, a aplicação do modelo fica restrita a 100 km, que é o ponto a partir do qual se espera que o campo recebido seja bastante influenciado pela energia proveniente da refração ionosférica e celeste [28]. De acordo com Barnnet e Lewis [31], fatores impactantes não foram abordados explicitamente por Tamir, que são as contribuições dos demais mecanismos de propagação, em especial a onda direta, pois apesar de existir uma grande quantidade de troncos nas florestas, que absorvem a energia deste mecanismo nos limites superiores de frequência, em frequências mais baixas pode-se esperar que este mecanismo assuma maior importância. E ainda o modelo de terra plana considerado por Tamir, que desconsidera a curvatura da terra, apresenta menos acuidade em longas distâncias.

Analisando as condições de contorno entre a floresta e o ar, onde a propagação se dá de um meio mais denso e com perdas (floresta), para um meio menos denso e sem perdas (ar), o ângulo crítico é dado por:

$$\theta_c = \arctg \left(\frac{1}{\operatorname{Re}[\sqrt{\hat{\epsilon}_f - 1}]} \right) \quad (4.1)$$

$\hat{\epsilon}_f$ é a permissividade relativa complexa da floresta e é dada por [30]:

$$\hat{\epsilon}_f = \epsilon_f - j \left(\frac{\sigma_f}{\omega \epsilon_0} \right) \quad (4.2)$$

ω é a frequência angular e ϵ_0 é a permissividade do vácuo e σ_f é a condutividade da floresta.

O valor do campo recebido, considerado como predominantemente oriundo da onda lateral, para uma antena dipolo infinitesimal, polarizada verticalmente, é dado por:

$$\mathbf{E} = -j \frac{60 I L e^{[-jK_0(d+S)\sqrt{n_f^2-1}]} }{(h_f^2-1) d^2} \cdot F_t(90^\circ, h_t) \cdot F_t(90^\circ, h_r) \quad (4.3)$$

I é a corrente na entrada da antena, L é o comprimento da antena de recepção, K_0 é a constante de fase no espaço livre, d é a distância entre as antenas, h_t e h_r são as alturas das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, e ainda:

$$S = 2n_f - h_t - h_r \quad (4.4)$$

E:

$$F_t(\varnothing, h) = \frac{1+B(\varnothing, h)}{1-B(\varnothing, h)} \quad (4.5)$$

Onde:

$$B(\varnothing, h) = G(\varnothing) e^{-j2K_0 n \sqrt{n_f^2 - 1}} \quad (4.6)$$

E:

$$G(\varnothing) = \frac{n_s^2 \sqrt{n_f^2 - \text{sen}^2 \varnothing} - n_f^2 \sqrt{n_s^2 - \text{sen}^2 \varnothing}}{n_s^2 \sqrt{n_f^2 - \text{sen}^2 \varnothing} + n_f^2 \sqrt{n_s^2 - \text{sen}^2 \varnothing}} \quad (4.7)$$

n_f e n_s são os índices de refração da floresta e do solo, respectivamente, e são calculados por:

$$n_k = \sqrt{\varepsilon_k - j \frac{\sigma_k}{\omega \varepsilon_0}} \quad (4.8)$$

Onde k é o índice que indica o meio em questão (n_f ou n_s).

4.2

Modelo de Weissberger e desenvolvimentos

Weissberger [41], em 1982, propôs um modelo de perda de propagação conhecido como exponencial modificado (MED, em inglês), que surgiu após a análise de modelos de decaimento exponencial, na faixa de frequências entre 230 MHz e 96 GHz.

O modelo é válido para casos em que o caminho de propagação está obstruído com árvores com folhas em situação seca, encontradas em climas temperados, como proposto na figura 4.3.

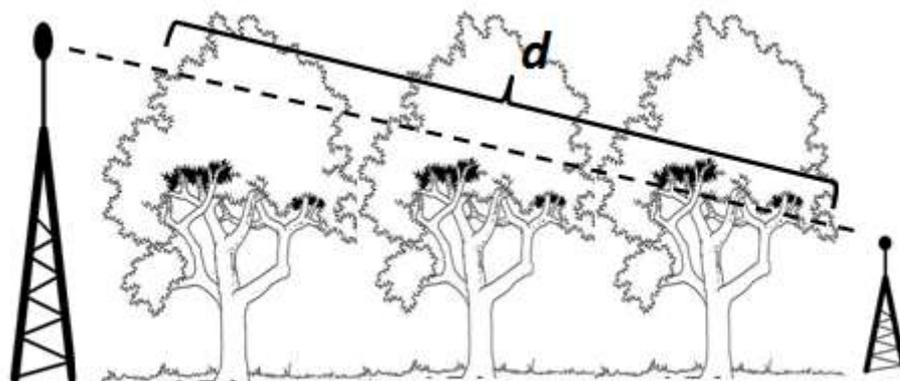


Figura 4.3 - (d) distância de propagação em árvores.

A perda pode ser expressa por:

$$\begin{cases} L(dB) = 0,45f^{0,284} d & , \text{para } d \leq 14 \text{ metros} \\ L(dB) = 1,33f^{0,284} d^{0,588} & , \text{para } 14 \leq d \leq 400 \text{ metros} \end{cases} \quad (4.9)$$

Com a frequência f em GHz e o percurso sobre as árvores, d , em metros. Este modelo é apropriado para casos em que a propagação ocorre, principalmente, através da copa das árvores.

Em 1988, a Organização Internacional de Telecomunicações (ITU), desenvolveu um modelo para a perda devido à propagação em percursos com árvores, utilizando as mesmas técnicas de Weissberger. Este modelo ficou conhecido como *early ITU model*, e é expresso por:

$$L(\text{dB}) = 0,2f^{0,3}d_f^{0,6} \quad (4.10)$$

d_f é o equivalente ao d na figura 4.3.

Posteriormente, a ITU lançou o modelo que ficou conhecido como *Fitted ITU-R (FITU-R)*, que foi proposto por Al-Nuaimi *et al.*, em 1998. Neste modelo, a faixa de aplicação é entre 10 e 40 GHz, mas agora são consideradas árvores com e sem folhas, e a expressão da perda em excesso do sinal é calculada por:

$$\begin{cases} L(\text{dB}) = 0,39f^{0,39}d_f^{0,25} & , \text{para árvores com folhas} \\ L(\text{dB}) = 0,37f^{0,18}d_f^{0,59} & , \text{para árvores sem folhas} \end{cases} \quad (4.11)$$

Um modelo bastante popular é o COST 235 [32], que também considera a folhagem como parâmetro, e é dado por:

$$\begin{cases} L(\text{dB}) = 15,6f^{-0,009}d^{0,26} & , \text{com folhas} \\ L(\text{dB}) = 26,6f^{-0,2}d^{0,5} & , \text{sem folhas} \end{cases} \quad (4.12)$$

Com f em MHz e d , que é equivalente ao da figura 4.3, em metros.

4.3

Modelo de Chen e Kuo

No início da década passada, Chen e Kuo [33] estudaram as perdas em ambientes florestais, utilizando medições entre 1 e 100 GHz. Propuseram um modelo baseado na teoria geométrica da difração e a floresta foi suposta como sendo composta por quatro camadas: ar, copa das árvores, troncos e solo. As medições foram tomadas em intervalos de 10 metros, para polarização vertical e horizontal, e as fórmulas empíricas obtidas são:

$$L_v = (0,001f + 0,2)d + 0,5f + 3, \quad \text{polarização vertical} \quad (4.13)$$

$$L_h = (0,0002f + 0,2)d + 0,03f + 2, \quad \text{polarização horizontal} \quad (4.14)$$

Com f em GHz e d , que é equivalente ao da figura 4.3, em metros.