

## 4 CÁLCULO DA INTERFERÊNCIA DEVIDA AO ESPALHAMENTO PELA CHUVA

A interferência vem sendo reconhecida como um potencial problema para os sistemas de rádio comunicações por micro-ondas. A interferência é usualmente responsável da degradação do sinal, podendo ser descrita pela relação entre as potências dos sinais desejado e interferente recebidos por um usuário. Diferentes fatores podem ser responsáveis pela interferência em um sistema de telecomunicações. Entre eles, está a chuva. Um exemplo pertinente de interferência é devido ao espalhamento por hidrometeoros em sistemas sem fio operando em ondas milimétricas.

Quando partículas de precipitação estão presentes no volume comum formado pela interseção dos diagramas de radiação das antenas transmissora e receptora interferida de lances independentes de comunicações operando na mesma frequência, parte da energia eletromagnética propagada em uma direção pode ser espalhada na direção do receptor interferido, causando uma interferência no sinal recebido [4]. Esta situação está apresentada na Figura 4.1.

Entender a importância da interferência em termos estatísticos é muito importante para um correto dimensionamento de um sistema de comunicações operando nas frequências das ondas milimétricas. Esta necessidade nos motiva a estudar um método realista e aplicável para o cálculo dos níveis de interferência na faixa de ondas milimétricas devido ao espalhamento por chuvas em áreas urbanas. Para isso, descreveremos um método que será simulado no programa Matlab baseado nos pontos descritos abaixo.

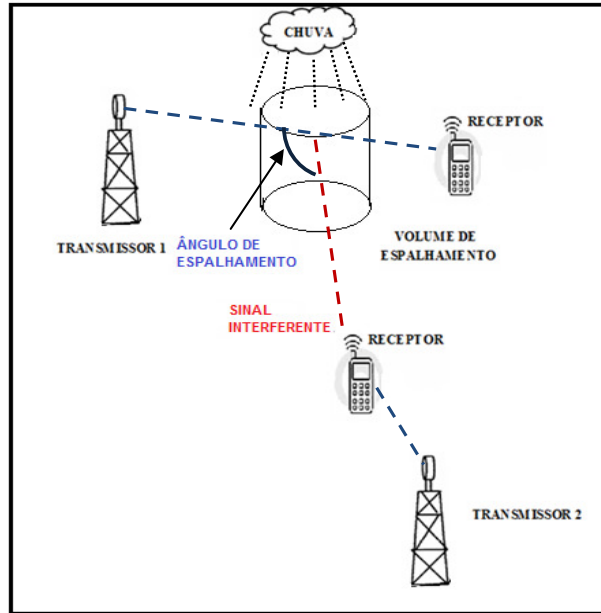


Figura 4.1: Geometria da interferência devida ao espalhamento pela chuva.

#### 4.1 Método Proposto Para o Cálculo da Interferência

A interferência cocanal devida ao espalhamento pela chuva ocorre quando duas ou mais entidades na mesma área geográfica transmitem na mesma frequência e interferem em um receptor. Como consequência, a relação sinal-interferência ( $S/I$ ) será reduzida. Por sua vez, o desempenho do sistema será reduzido, podendo, até mesmo, causar a interrupção da comunicação, quando a  $S/I$  cair abaixo do nível necessário para uma determinada tecnologia operar de forma eficaz.

Se os transmissores interferentes são muitos, como ilustra a Figura 4.2, a relação  $S/I$  pode ser representada por:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (4.1)$$

nesta equação,  $S$  é a potência do sinal desejado e  $I_i$  é a potência do  $n$ -ésimo sinal interferente, todas medidas no mesmo receptor interferido e apresentadas em unidades lineares. Para o cálculo das potências interferentes, será utilizada a equação do Radar.

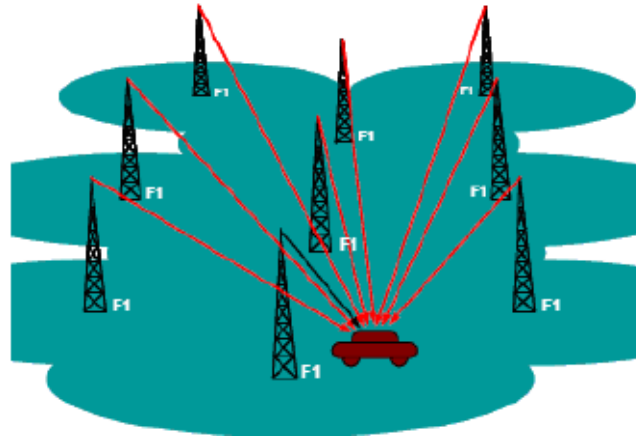


Figura 4.2: Interferência das múltiplas estações rádio bases em um terminal do usuário.

#### 4.1.1 Equação do Radar Biestático

A metodologia a ser utilizada no cálculo de interferências devidas ao espalhamento pela chuva é baseada na aplicação da equação do radar biestático descrita por Crane [45], Capsoni e D'Amico [46] e Gibbins [47]. Esta equação relaciona a potência  $P_r$  recebida por um usuário procedente do espalhamento devido à chuva à potência  $P_t$  transmitida por uma estação transmissora interferente:

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iiint \frac{G_t G_r \eta A}{r_t^2 r_r^2} dV \quad (4.2)$$

nesta equação:

$\lambda$ : Comprimento de onda [m];

$G_t$ : Ganho da antena transmissora (Linear);

$G_r$ : Ganho da antena receptora (Linear);

$\eta$ : Seção transversal de espalhamento por unidade de volume [ $m^2/m^3$ ];

$A$ : Atenuação ao longo do trajeto do transmissor ao receptor (Linear);

$r_t$ : Distância do transmissor para o elemento de volume comum de espalhamento [m];

$r_r$ : Distância do elemento de volume comum de espalhamento ao receptor [m].

O Volume Comum efetivo de espalhamento é a interseção entre os dois diagramas de radiação das antenas de transmissão dos pontos de acesso e de recepção do terminal móvel.

Os efeitos de propagação do sinal interferente entre o transmissor interferente e o usuário são múltiplos. Entretanto, somente serão consideradas a atenuação devida ao espaço livre, o espalhamento devido à chuva, assim como a atenuação por chuvas e por gases atmosféricos, com base nos parâmetros apropriados. As equações para estes cálculos já foram descritas no capítulo 3.

#### 4.1.1.1 Cálculo da seção transversal de espalhamento

De acordo com a aproximação de Rayleigh [48], ou seja, supondo a gota de chuva como uma partícula esférica de diâmetro  $D$  muito menor que o comprimento de onda  $\lambda$  da energia interceptada, a seção reta de espalhamento  $\eta_R$  [ $m^2/m^3$ ] será dada pela seguinte expressão:

$$\eta_R = \frac{2\pi^5}{3\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 Z_R \quad \left[ \frac{m^2}{m^3} \right] \quad (4.3)$$

Nesta equação:

$m$ : Índice de refração complexo da água, que depende da frequência e das condições atmosféricas;

$f$ : Frequência (GHz);

$Z_R$ : Refletividade medida pelo radar [ $m^6/m^3$ ] ao nível do solo, que pode ser expressa em termos de taxa de precipitação  $R$  (mm/h).

As condições para a validade do espalhamento Rayleigh não se verificam na faixa de ondas milimétricas. De fato, a relação  $D/\lambda$  é próxima da unidade, podendo até excedê-la. No trabalho, será utilizado o fator de correção  $S$  desenvolvido por Tarducci e Tao [49] que relaciona, com boa aproximação, as seções transversais de espalhamento por unidade de volume resultantes das teorias de espalhamento Mie e Rayleigh. De acordo com Capsoni e D'Amico [46],

$\eta = \eta_R/S$ , onde  $S = 1$  para frequências inferiores a 10 GHz e, para frequências  $f$  [GHz] superiores a 10 GHz:

$$10 \log S = \begin{cases} R^{0.4} 10^{-3} \left[ 4 (f - 10)^{1.6} \left( \frac{1 + \cos \varphi}{2} \right) + \right. \\ \left. 5 (f - 10)^{1.7} \left( \frac{1 - \cos \varphi}{2} \right) \right] \text{ [dB]} \end{cases} \quad (4.4)$$

Isolando  $S$ , tem-se:

$$S = 10^{R^{0.4} 10^{-4} \left[ 4 (f - 10)^{1.6} \left( \frac{1 + \cos \varphi}{2} \right) + 5 (f - 10)^{1.7} \left( \frac{1 - \cos \varphi}{2} \right) \right]} \quad (4.5)$$

Nesta expressão,  $\varphi$  é o ângulo de espalhamento observado na Figura 4.1 e  $R$  é a taxa de precipitação (mm/h).

Para o presente interesse, o fator de correção  $S$  foi calculado em função do ângulo de espalhamento, para a frequência de 30 GHz, como observado na Figura 4.3a. O mesmo fator foi calculado para diferentes frequências, como observado na Figura 4.3b.

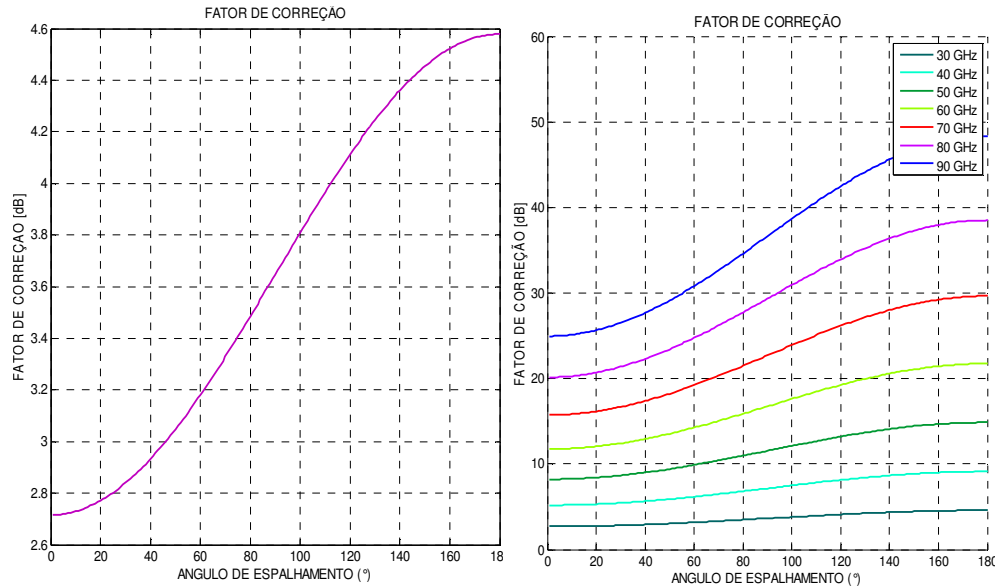


Figura 4.3: (a) Fator de correção  $S$  para uma frequência de 30 GHz, baseada na taxa de precipitação de 75 mm/h. (b) Fator de correção para diferentes frequências na faixa de ondas milimétrica, baseados na taxa de precipitação de 75 mm/h.

Lembrando, que o ângulo de espalhamento foi calculado a partir da posição do ponto de acesso desejado e o ponto de acesso interferente em relação à posição do volume comum.

#### 4.1.1.2 Cálculo do índice de refração

Primeiramente, para o cálculo do índice de refração tem-se a seguinte equação:

$$m = (n_r - in_i) \quad (4.6)$$

onde  $n_r$  e  $n_i$  são as componente real e imaginária do índice de refração. Estes parâmetros também são parte das equações da permissividade complexa descritas seguidamente:

$$\epsilon' = (n_r^2 - n_i^2) \quad (4.7)$$

$$\epsilon'' = 2n_r n_i \quad (4.8)$$

Para o cálculo da permissividade complexa, tem-se as seguintes equações descritas por Debye, que dependem da temperatura [50]:

$$\epsilon = (\epsilon' - i\epsilon'') \quad (4.9)$$

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{(1 + (\frac{\lambda_s}{\lambda})^2)} \quad (4.10)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)(\frac{\lambda_s}{\lambda})}{(1 + (\frac{\lambda_s}{\lambda})^2)} \quad (4.11)$$

onde  $\epsilon_s$  é a constante estática,  $\epsilon_\infty$  é a constante dielétrica de alta frequência e  $\lambda_s$  é o comprimento de onda de relaxamento, dados por:

$$\epsilon_s = 78.54[1.0 - 4.579 \times 10^{-3}(t - 25.0) + 1.19 \times 10^{-5}(t - 25.0)^2 - 2.8 \times 10^{-3}(t - 25.0)^3] \quad (4.12)$$

$$\epsilon_\infty = 5.27137 + 0.0216474 t - 0.00131198 t^2 \quad (4.13)$$

$$\lambda_s = 0.00033836 \exp\left(\frac{2513.98}{(t + 273)}\right) \quad (4.14)$$

Nas equações acima,  $t$  é a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $\lambda$  é o comprimento de onda (m).

A Figura 4.4 mostra o índice de refração complexo calculado para as frequências de 1 GHz a 80 GHz, para a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ .

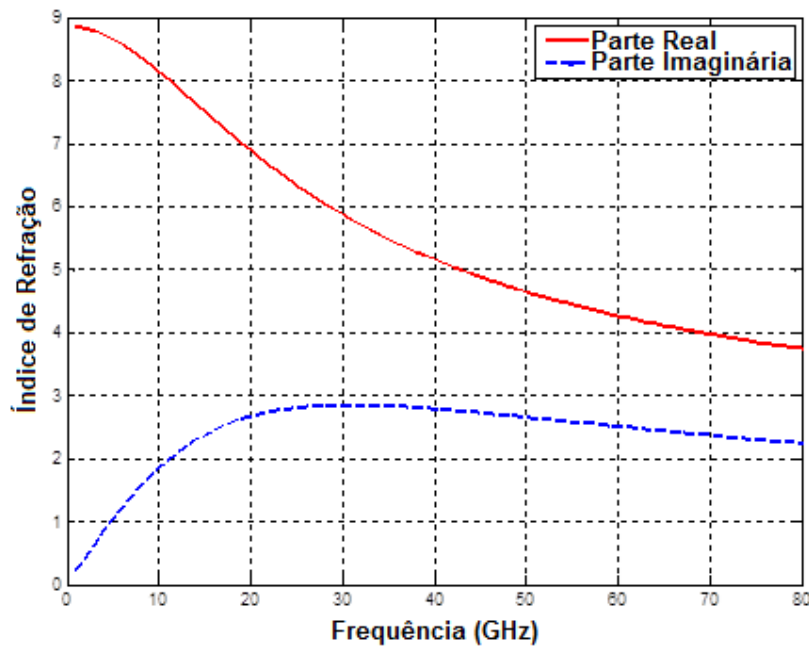


Figura 4.4: Variação do índice de refração complexo para frequências de 1 GHz a 80 GHz e temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.1.1.3 Cálculo da refletividade do radar

O fator de refletividade do radar  $Z$  [ $\text{m}^6/\text{m}^3$ ] pode ser calculado através da seguinte equação:

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (4.15)$$

onde  $N(D) dD$  é o número de gotas de diâmetros compreendidos entre  $D$  e  $D+dD$  por unidade de volume. Por sua vez,  $N(D)dD$  pode ser associado ao valor de  $D$ , através das equação 3.3 do capítulo 3 [51].

$$N(D)dD = N_o D^p \exp(-\Lambda D^q) dD$$

onde  $N_o$ ,  $\Lambda$ ,  $p$  e  $q$  são parâmetros de forma da distribuição.

Para desenvolver as simulações, foi selecionada a distribuição de De Wolf [38], que elimina duas dificuldades associadas com a distribuição exponencial de Marshal-Palmer [36] (não é consistente com o cálculo da taxa de precipitação  $R$  e indica valor máximo para partículas de diâmetro nulo), mas que aproxima reproduz resultados experimentais [37], com boa precisão. A distribuição de De Wolf é um caso especial da apresentada acima, com os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} N_o &= 1.98 \times 10^7 \\ \Lambda &= 5.38 \times R^{-0.384} \text{mm}^{-1} \\ p &= 2.93 \text{ e } q = 1 \end{aligned}$$

Isto é

$$N(D) = 1.98 \times 10^7 R^{-0.384} D^{2.93} \exp(-5.38 R^{-0.186} D)$$

sendo  $R$  apresentada em mm/h,  $D$  em mm e  $N(D)$  em  $\text{m}^{-4}$ . Em seguida, expressando  $D$  em m, tem-se

$$N(D) = 1.98 \times 10^7 R^{-0.384} (D \times 10^3)^{2.93} \exp(-5.38 R^{-0.186} (10^3 \times D))$$

$$N(D) = 1.22 \times 10^{16} R^{-0.384} D^{2.93} \exp(-5.38 \times 10^3 R^{-0.186} D)$$

Na equação imediatamente acima, o diâmetro  $D$  é expresso em m e  $N(D)$  em  $\text{m}^{-4}$ .



Substituindo na equação da refletividade (4.15), obtém-se:

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD = 1.22 \times 10^{16} R^{-0.384} \int_0^{\infty} D^{8.93} \exp(-5.38 \times 10^3 R^{-0.186} D) dD$$

Utilizando a função Gama para calcular a integral, chega-se ao resultado:

$$Z = 1.22086 \times 10^{16} R^{-0.384} \frac{\Gamma(9.93)}{(5.38 \times 10^3 R^{-0.186})^{9.93}}$$

$$Z = 3.39953 \times 10^{-16} R^{1.46298} \quad (4.16)$$

sendo  $R$  apresentada em mm/h, e  $Z$  em  $\text{m}^6/\text{m}^3$ .