

Capítulo III

Modelo sugerido de propagación

En este capítulo se utilizó el estudio bibliográfico para desarrollar un modelo de propagación que tome en cuenta los diferentes factores que afectan las ondas mientras se propagan. Se utilizó como modelo base el modelo de propagación en el espacio libre. Más adelante se ingresaron factores de pérdidas a este modelo con base en las recomendaciones de la International Telecommunications Union. Este modelo se analizó con programación en matlab y Visual Basic para obtener los resultados de cómo se espera que la señal E_m varíe la intensidad de señal. Algunos de estos parámetros no podrán comprobarse en la experimentación por no tener equipo lo suficientemente potente para comprobarlo.

3.1 Representación matemática de neblina

El modelo base es el modelo de Friis (Ver ecuación 2.1). Tomando en cuenta la recomendación ITU P.840-3 la neblina generalmente consiste de pequeñas partículas de menos de 0.01 cm de diámetro. La aproximación de Rayleigh es válida, según esta recomendación, para frecuencias menores a las 200 GHz y es posible expresar la atenuación en términos del contenido de agua total por unidad de volumen [1]. Así la atenuación en neblina puede escribirse como

$$g_c = K_1 M \quad \text{dB/km} \quad (3.1)$$

Donde:

γ_c : La atenuación específica en neblina (dB/km)

K_1 : Coeficiente de atenuación específica ((dB/km)/(g/m³))

M : Densidad de agua líquida en la neblina (g/m³).

Un modelo matemático basado en la dispersión de Rayleigh que usa un modelo “double-Dye” para la permitividad dieléctrica del agua ($\epsilon(f)$) puede usarse para calcular el valor de K_1 para frecuencias de hasta 1000 Ghz [1]:

$$K_1 = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3) \quad (3.2)$$

Donde:

f: Es frecuencia en Ghz y

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (3.3)$$

e: es la permitividad dieléctrica compleja del agua

La permitividad dieléctrica compleja del agua está dada por:

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{fp[1 + (f/fp)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{fs[1 + (f/fs)^2]} \quad (3.4)$$

$$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1 + (f/fp)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{[1 + (f/fs)^2]} + \epsilon_2 \quad (3.5)$$

Donde:

$$\epsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1) \quad (3.6)$$

$$\epsilon_1 = 5.48 \quad (3.7)$$

$$\epsilon_2 = 3.51 \quad (3.8)$$

$$\theta = 300 / T \quad (3.9)$$

Con T como temperatura en grados Kelvin.

Las frecuencias secundarias fp y fs son:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \text{ GHz} \quad (3.10)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \text{ GHz} \quad (3.11)$$

La figura presentada en el apéndice D muestra los valores de K1 para frecuencias de 5 a 200 Ghz y temperatura entre -8° C y 20° C.

Conforme a lo establecido anteriormente se agrega directamente esta atenuación al modelo de Friis del espacio libre.

$$L_p \text{ (dB)} = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d + K1M \quad (3.12)$$

Dónde:

L_p : Pérdidas por trayectoria

F: frecuencia en Mhz

d: Distancia en kilómetros

M: Densidad de agua líquida en la neblina (g/m^3).

K1: Coeficiente de atenuación

3.2 Representación matemática de la lluvia

Para seguir ingresando elementos al model de propagación analizaremos otra condición climatológica importante. La lluvia se presenta muy frecuentemente el mar. Estas gotas de agua absorben bastante energía y la atenuación es relativamente grande. La reflexión de las gotas de agua es tal que los radares pueden ser utilizados para detectar células de lluvia y evitarlas cuando se viaja en el mar [14].

Ahora utilizaremos la información de la recomendación ITU-R 838-2 sobre atenuación por lluvia para integrarlo en el modelo

La atenuación específica por lluvia en dB por km es obtenida a través del razón de lluvia R (mm/h) usando la relación:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (3.13)$$

Los coeficientes k y α están dados en la tabla 1 que aparece en el apéndice D para polarización lineal y rutas horizontales. De acuerdo a la recomendación los valores de la tabla 1 han sido probados y han demostrado

ser suficientemente precisos para calcular la atenuación hasta frecuencias de 55 Ghz [3].

Los coeficientes k y α se pueden determinar como una función de la frecuencia que se deriva de un proceso llamado “curve-fitting” de cálculos previos.

$$\log k = \sum_{j=1}^3 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log f + c_k \quad (3.14)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^4 \left(a_i \exp \left[- \left(\frac{\log f - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \right) + m_\alpha \log f + c_\alpha \quad (3.15)$$

Donde:

f : frecuencia en Ghz

k : puede ser k_H o k_V (horizontal o vertical)

α : puede ser α_H o α_V .

Los valores de k_H y k_V también se pueden rescatar de la tabla 1 en el apéndice D

Los valores de los demás coeficientes se encuentran en las tablas 2 y 3 del apéndice D

Para polarizaciones lineal y circular y para todas las geometrías del camino los coeficientes de la ecuación 1.1 pueden ser calculados de los valores de la tabla 1 del apéndice D usando las siguientes ecuaciones:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2 \quad (3.16)$$

$$a = [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k \quad (3.17)$$

Donde θ es el ángulo de elevación y τ es el ángulo de inclinación de la polarización con respecto de la horizontal ($\tau = 45^\circ$ para polarización circular).

Agregando esta atenuación nuestro modelo entonces obtenemos un modelo que incluye la atenuación por lluvia. kR^α .

$$L_p \text{ (dB)} = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d + KIM + kR^\alpha \quad (3.18)$$

Dónde:

k : Coeficiente de atenuación en lluvia

R: razón de lluvia R (mm/h)

L_p : Pérdidas por trayectoria

F: frecuencia en Mhz

d: Distancia en kilómetros

M: Densidad de agua líquida en la neblina (g/m^3).

K1: Coeficiente de atenuación

3.3 Representación matemática de gases atmosféricos

La siguiente característica del medio que se ingresará en el modelo son las atenuaciones que tenemos al no observar obstáculo alguno. A menudo, se refiere a espacio libre cuando no hay obstáculos visibles en el camino de propagación de las ondas electromagnéticas, sin embargo, por muy pequeño que sean, los gases invisibles que están en el camino producen atenuación de la onda electromagnética. A continuación se ingresa la representación matemática de la ITU para calcular las pérdidas por propagación por gases atmosféricos.

Con ayuda de la recomendación ITU-R P.676-5 se puede agregar las pérdidas por aire seco y vapor de agua. Estas variables son dependientes de la presión y de la temperatura.

Para un recorrido horizontal, típico de un radar, la atenuación por gases atmosféricos se puede escribir como [4]:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB} \quad (3.19)$$

Donde:

r_0 = distancia en kilómetros

γ_o : atenuación por aire seco

γ_w : atenuación por vapor de agua.

La atenuación para el aire seco γ_o (dB/km) está dada por:

$$\gamma_o = \left[\frac{7.34 r_p^2 r_t^3}{f^2 + 0.36 r_p^2 r_t^2} + \frac{0.3429 b \gamma_o'(54)}{(54 - f)^a + b} \right] f^2 \times 10^{-3} \quad (3.20)$$

para $f \leq 54$ GHz

donde:

f : frecuencia (GHz)

p : presión (hPa)

$r_p = p/1013$

$r_t = 288/(273 + t)$

t : temperatura en (°C), donde la temperatura media se puede obtener de los valores presentados en la recomendación la tabla del apéndice c tomado de la recomendación ITU-R P.1510

y la atenuación por vapor de agua (γ_w) está dada por:

$$\begin{aligned}
\gamma_w = & \left\{ 3.13 \times 10^{-2} r_p r_t^2 + 1.76 \times 10^{-3} \rho r_t^{8.5} + r_t^{2.5} \left[\frac{3.84 \xi_{w1} g_{22} \exp(2.23(1-r_t))}{(f-22.235)^2 + 9.42 \xi_{w1}^2} \right. \right. \\
& + \frac{10.48 \xi_{w2} \exp(0.7(1-r_t))}{(f-183.31)^2 + 9.48 \xi_{w2}^2} + \frac{0.078 \xi_{w3} \exp(6.4385(1-r_t))}{(f-321.226)^2 + 6.29 \xi_{w3}^2} \\
& + \frac{3.76 \xi_{w4} \exp(1.6(1-r_t))}{(f-325.153)^2 + 9.22 \xi_{w4}^2} + \frac{26.36 \xi_{w5} \exp(1.09(1-r_t))}{(f-380)^2} \\
& + \frac{17.87 \xi_{w5} \exp(1.46(1-r_t))}{(f-448)^2} + \frac{883.7 \xi_{w5} g_{557} \exp(0.17(1-r_t))}{(f-557)^2} \\
& \left. \left. + \frac{302.6 \xi_{w5} g_{752} \exp(0.41(1-r_t))}{(f-752)^2} \right] \right\} f^2 \rho \times 10^{-4}
\end{aligned} \tag{3.21}$$

para $f \leq 350$ GHz

dónde:

$$\xi_{w1} = 0.9544 r_p r_t^{0.69} + 0.0061 \rho \tag{3.22}$$

$$\xi_{w2} = 0.95 r_p r_t^{0.64} + 0.0067 \rho \tag{3.23}$$

$$\xi_{w3} = 0.9561 r_p r_t^{0.67} + 0.0059 \rho \tag{3.24}$$

$$\xi_{w4} = 0.9543 r_p r_t^{0.68} + 0.0061 \rho \tag{3.25}$$

$$\xi_{w5} = 0.955 r_p r_t^{0.68} + 0.006 \rho \tag{3.26}$$

$$g_{22} = 1 + (f - 22.235)^2 / (f + 22.235)^2 \tag{3.27}$$

$$g_{557} = 1 + (f - 557)^2 / (f + 557)^2 \tag{3.28}$$

$$g_{752} = 1 + (f - 752)^2 / (f + 752)^2 \tag{3.29}$$

Donde ρ es la densidad de vapor de agua (g/m^3).

La figura 5 presentada en el apéndice H representa la atenuación específica de 1 a 350 ghz a nivel del mar.

De este modo nuestro modelo hasta el momento es el siguiente:

$$L (dB) = 32.4 + 20\log f + 20\log d + K1M + kR^\alpha + (\gamma_o + \gamma_w)r_0 \quad (3.30)$$

Dónde:

k : Coeficiente de atenuación en lluvia

R : razón de lluvia R (mm/h)

L : Pérdidas por trayectoria

F : frecuencia en Mhz

d : Distancia en kilómetros

M : Densidad de agua líquida en la neblina (g/m^3).

$K1$: Coeficiente de atenuación

r_0 = distancia en kilómetros

γ_o : Atenuación por aire seco

γ_w : Atenuación por vapor de agua.

Hasta este momento solo se ha intregado al modelo de espacio libre los factores de atenuación como lluvia, neblina y gases atmosféricos. Los resultados como se presentan en el anexo C nos indican que las atenuaciones por lluvia, gases y neblina se vuelven significativas cuando la distancia es muy larga. En nuestro experimento como se presenta en el siguiente capítulo se realiza a distancia cortas en donde las pérdidas por estos factores no son apreciables. Sin embargo, se agregaron otros factores de pérdidas como la vegetación y follaje en el camino de ondas que están en la banda milimétrica.