

Caracterización del canal de RF y cálculo de cobertura en sistemas móviles

Por Ing. Jorge Matos Baucells

Especialista A en Telecomunicaciones, Gerencia Territorial Villa Clara, ETECSA

matos@vcl.tel.etcসা.су

Cuando se analiza el desempeño de un sistema móvil —en general cualquier sistema inalámbrico—, debe tenerse en cuenta la capacidad del sistema, la cobertura radioeléctrica y la calidad de la transmisión.

El primer aspecto está estrechamente vinculado a la ingeniería de tráfico del sistema con el objetivo de calcular el número de radiocanales necesarios por zona de cobertura para garantizar la Calidad de Servicio requerida. Los dos últimos aspectos están íntimamente relacionados y los propósitos básicos pueden enunciarse de la siguiente manera:

- ♦ Se desea distribuir la potencia promedio de RF en un área determinada de manera que se logre una comunicación confiable. Como el canal de RF es extremadamente variable, es necesario no sólo considerar la potencia promedio, sino también su variabilidad, es decir, cuánto se desvía de su valor medio.
- ♦ Los cálculos de potencia necesaria y cobertura deben garantizar la potencia mínima en el receptor (sensibilidad) o la relación portadora a ruido (mínima) para lograr la inteligibilidad requerida o un valor preestablecido en la tasa de error de bit (BER).

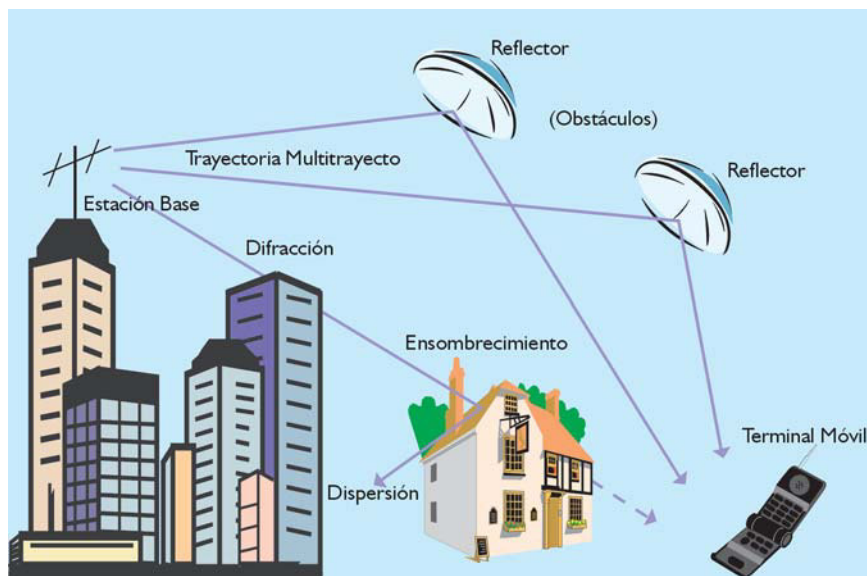


Figura 1 Escenario típico de propagación de un sistema móvil

En la figura 1 se muestra un escenario típico de propagación en un sistema móvil.

Existen tres fenómenos físicos que caracterizan la propagación: reflexión, difracción y dispersión, que dan origen a tres problemáticas de ingeniería: la propagación multitrayecto que se debe básicamente al mecanismo de reflexión; el ensombrecimiento debido a los fenómenos de difracción y dispersión; y la penetración en edificios y vehículos a causa de una combinación de los efectos físicos explicados anteriormente.

Propagación multitrayecto

La recepción de diferentes réplicas de la señal principal, proveniente de múltiples trayectos de reflexión, trae como consecuencias las rápidas variaciones en la amplitud de la señal recibida en el móvil —desvanecimiento rápido— y la dispersión del retardo.

Existen dos situaciones diferentes en la recepción multitrayecto: cuando hay una componente fuerte de señal en la línea de la visual —*Line-of-Sight (LOS)*— y cuando el resto de las componentes multitrayecto tienen poco peso relativo a esta componente principal. La distribución de probabilidad de las variaciones de amplitud sigue una ley de Rice y se denomina desvanecimiento de Rice;

la otra, cuando no existe una componente fuerte de señal en la línea de la visual y la señal recibida es la composición de múltiples componentes multitrayecto, también denominado NLOS —*Non Line-of-Sight*—. En este caso, la ley de distribución de probabilidad de las variaciones de amplitud sigue una ley de Rayleigh y se denomina desvanecimiento de Rayleigh.

En general, se hará referencia siempre a un desvanecimiento de Rayleigh en las variaciones rápidas de la amplitud de la señal recibida, tomando la distribución de Rice como un caso especial. El desvanecimiento producido por el mecanismo de la reflexión se aparta aproximadamente media longitud de onda. En la medida que el móvil se aparta de la estación base o repetidor, la potencia promedio decrece. Este es el denominado desvanecimiento lento. El desvanecimiento rápido de tipo Rayleigh se superpone al decrecimiento lento de las pérdidas de trayecto. La potencia instantánea varía rápidamente cuando el móvil se mueve, pero los cambios de la señal promedio transcurren lentamente. Si el terminal móvil presenta dificultades en la recepción como consecuencia del desvanecimiento, puede moverse de su posición inicial y mejorar la recepción significativamente.

El desvanecimiento de Rayleigh afecta por igual a todas las frecuencias por lo que se denomina desvanecimiento plano —*flat fading*—. Otro efecto negativo asociado con la propagación multitrayecto es la dispersión del retardo —*delay spread*—. Cada réplica de señal reflejada recorre una distancia diferente a otras réplicas. Al producirse la detección de estos componentes, las

señales de banda base correspondientes se superponen con un defasaje en tiempo y producen distorsión —señales analógicas— o interferencias intersímbolos —señales digitales— que afectan la calidad de la recepción. Los valores típicos de la dispersión del retardo están entre 25 y 100 ms.

Ensombrecimiento

La variación lenta de la pérdida de trayecto se debe al bloqueo (obstrucción) o bloqueo parcial por la presencia de grandes objetos y el relieve del terreno. Estas variaciones siguen una ley de distribución de probabilidad del tipo log-normal, es decir, la variación de la pérdida de trayecto, en dB, sigue una ley normal de probabilidad. Este tipo de desvanecimiento lento proviene básicamente del fenómeno de dispersión en un gran número de objetos.

Penetración en vehículos y edificios

Los terminales móviles, por su tamaño pequeño, pueden utilizarse dentro de edificios y vehículos. Esto es típico en los sistemas celulares y terminales portátiles PMR y *trunking* en los cuales el terminal móvil en un vehículo posee una antena exterior a este; y en el caso de terminales fijos en edificios, la antena utilizada es exterior. En ambos casos no existe penetración radioeléctrica.

La predicción de niveles de señal en edificios es una tarea compleja. Un edificio es un conjunto de obstrucciones y elementos absorbentes. El mecanismo primario de propagación hacia y dentro del edificio es la difracción. La propagación hacia el interior del edificio posee un tipo de pérdida adicional denominada pérdida de penetración, en relación con el nivel de señal en el exterior. Los niveles de señales dentro del edificio están influenciados por el ángulo de incidencia de la señal desde la estación base externa, la geometría de las ventanas y otras aperturas para el acoplamiento de la potencia de RF hacia el interior del edificio, las características absorbentes y reflexivas de las paredes o superficies de edificios, la organización del mobiliario interno, la presencia de obstáculos internos como columnas de metal, etc. y los ductos energéticos como los canales de los elevadores.

Aunque se ha trabajado mucho para desarrollar fórmulas para el cálculo de la pérdida de propagación en edificios, la mayor parte de los diseñadores aún utilizan métodos estadísticos basados en mediciones, en lugar de un enfoque determinativo. En general, la pérdida de penetración en edificios y vehículos se modela por una distribución normal con un determinado valor medio y desviación estándar. Algunos valores típicos se brindan a continuación (Tabla 1).

Tipo de edificio por área	Valor medio de la pérdida de penetración (dB)
Área urbana densa	20
Área urbana	15
Área suburbana o rural	10

Tabla 1 Valores típicos de la pérdida de penetración

Ecuación de transmisión

El concepto de espacio libre identifica una condición hipotética (ideal) de propagación donde sólo están involucrados un transmisor y un receptor. Se considera que existe un transmisor radiando una potencia P_t a través de una antena isotrópica. Entonces, la densidad del flujo de potencia (DFP) en un punto P distante d metros será:

$$DFP = \frac{P_t}{4\pi d^2}, \frac{w}{m^2} \quad (1)$$

Si se sustituye la antena isotrópica por otra de ganancia G_t , la densidad del flujo de potencia será ahora:

$$DFP = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (2)$$

Si en el punto P se coloca una antena receptora de área de abertura efectiva A_e y ganancia G_r —relativa a una fuente isotrópica— en la dirección de transmisión, se sabe que:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_r, m^2 \quad (3)$$

la potencia recibida P_r en los terminales de la antena receptora será:

$$P_r = DFP \cdot A_e \quad (4)$$

donde se supone que existe adaptación de impedancia entre la antena receptora y el receptor asociado. Sustituyendo (2) y (3) en (4) se obtiene:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_b} \quad (5)$$

donde L_b queda definida como:

$$L_b = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda} \quad (6)$$

y se conoce como pérdida de espacio libre —*free space loss*—. En decibels se obtiene:

$$Pr(dB) = Pt(dB) + Gt(dB) + Gr(dB) - Lb(dB) \quad (7)$$

La ecuación (7) se conoce con el nombre de ecuación de transmisión —ecuación o fórmula de Friis— para el espacio libre. En general, la ecuación (5) puede ser extendida para incorporar cualquier otro tipo de pérdida adicional. Así:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_b L_a} \quad (8)$$

donde L_a tiene en cuenta la pérdida adicional. Desde el punto de vista práctico existen las siguientes pérdidas adicionales:

- ♦ Pérdida en los circuitos de acople entre los equipos terminales —transmisor o receptor— y sus antenas correspondientes (L_{tx} , L_{rx}).
- ♦ Pérdida por inadaptación de impedancia en el acoplamiento del transmisor y la antena transmisora $L_{roe(tx)}$ y entre la antena receptora y el receptor $L_{roe(rx)}$. Así:

$$L_a = L_{roe(tx)} \cdot L_{roe(rx)} \cdot L_{tx} \cdot L_{rx}$$

En decibels:

$$L_a(dB) = L_{roe(tx)}(dB) + L_{roe(rx)}(dB) + L_{tx}(dB) + L_{rx}(dB) \quad (9)$$

En general, L_{roe} puede calcularse a partir de conocer el coeficiente de reflexión ρ como:

$$L_{roe} = -10 \log(1 - \rho^2), dB \quad (10)$$

Si se conoce la razón de onda estacionaria (Roe), entonces:

$$\rho = \frac{Roe - 1}{Roe + 1} \quad (11)$$

Ecuación de transmisión en condiciones reales de propagación

La formalización obtenida para condiciones de espacio libre puede usarse para condiciones reales de propagación. En este nuevo caso, L_b no representa la pérdida de espacio libre, ahora representa la pérdida básica de trayecto. En general, la pérdida del trayecto puede escribirse como:

$$L_b = k \cdot d^n \quad (12)$$

donde k es un parámetro que depende de la frecuencia y n es un exponente real positivo. En el caso de espacio libre $n = 2$, para sistemas móviles terrestres n está en el intervalo ($3 \leq n \leq 4$) siendo $n = 3,4$ un valor típico.

Modelos de propagación

Cuando va a implementarse un sistema móvil, el pronóstico de la pérdida del trayecto reviste especial importancia. No existen modelos teóricos que puedan contener la variabilidad del perfil del terreno, por lo tanto, se utilizan modelos empíricos que se basan en fórmulas ajustadas

a mediciones realizadas durante años y en diversos escenarios de propagación. Entre los modelos más utilizados está el de Okumura-Hata y el COST 231 —*Walfish-Ikegami*—. El método de Okumura-Hata es muy popular debido a sus buenos resultados. Este se deriva del reporte original de Okumura sobre mediciones de propagación. El modelo de Hata reproduce en un grupo de fórmulas los resultados llevados a cabo por Okumura con un error de ± 3 dB en el valor calculado de L_b . El modelo puede aplicarse si se tienen en cuenta restricciones como frecuencia —150-1500 MHz—, altura de la antena de la estación base —30-200 m—, altura de la antena del móvil —1-10 m—, y la distancia de separación —1-20 km—.

La fórmula para evaluar L_b es:

$$L_b = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d \quad (13)$$

donde:

f : frecuencia de operación, en MHz.

h_b : altura de la antena de la estación base, en m.

h_m : altura de la antena del móvil, en m.

d : distancia de separación, en km.

$a(h_m)$: factor de corrección.

En la tabla 2 se muestran las expresiones para el factor de corrección.

Ciudad mediana / pequeña	$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7)h_m - 1,56 \log f + 0,8$
Gran ciudad	$a(h_m) = 8,29(\log 1,54 h_m)^2 - 1,1$ (para f 200 MHz)
	$a(h_m) = 3,2(\log 11,75 h_m)^2 - 4,97$ (para f 400 MHz)
Área suburbana	$L_{bs} = L_b - 2(\log(f / 28))^2 - 5,4$
Área abierta	$L_{bs} = L_b - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94$

Tabla 2 Factor de corrección

Con el desarrollo de nuevos sistemas como el GSM 1800 —versión en 1800 MHz del sistema GSM—, se realizó una revisión del modelo de Hata con el empleo de extrapolaciones similares. Este método se denomina COST 231- Hata. El valor de L_b es:

$$L_b = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d + C_m, \text{ dB} \quad (14)$$

donde $a(h_m)$ tiene las mismas expresiones del modelo original para una ciudad mediana/pequeña y C_m es igual a 0 dB para ciudades medianas y zonas suburbanas con una densidad promedio de árboles y 3dB para centros metropolitanos. El intervalo de aplicación para el modelo es el mismo que el del modelo original, excepto que ahora el intervalo de frecuencia está entre 1 500 y 2 000 MHz. El modelo COST 231 está más orientado a áreas urbanas.

Ruido

Los sistemas móviles están afectados por ruido externo (térmico) y ruido interno. El primero está caracterizado por la temperatura de ruido de la antena T_a —en kelvin—, y el segundo por la temperatura de ruido del receptor T_r —debido principalmente a los elementos activos de las primeras etapas—. La calidad de la recepción viene determinada por el valor de la relación portadora a ruido (C/N) a la entrada del demodulador, donde $(C/N)_0$ representa el umbral necesario para garantizar una calidad requerida y se expresa como:

$$(C/N)_0 = \frac{Pr}{KTB_{afi}} \quad (15)$$

Si la temperatura de ruido del sistema es $T = T_a + T_r$ y el ruido captado por la antena es de origen térmico provocado por la temperatura real de la superficie terrestre, entonces $T_a = T_o = 290 \text{ K}$ y, por lo tanto, expresando en términos de figura de ruido se obtiene:

$$T = T_o F_r \quad (16)$$

Suponiendo que la ganancia de la etapa RF/FI afecte por igual a la portadora y al ruido, puede demostrarse con la sustitución de (17) y (18) en (19):

$$S(\text{dBm}) = (C/N)_0(\text{dB}) + F_r(\text{dB}) + B_{aFi}(\text{dBHz}) - 174 \quad (17)$$

donde:

- ♦ $S(\text{dBm})$: representa la potencia mínima requerida (sensibilidad) en los terminales para garantizar una buena recepción.
- ♦ F_r : cifra de ruido del receptor, determinada en gran medida por el elemento activo de la primera etapa, por lo cual es muy usual que se emplee un dispositivo de baja cifra de ruido en la primera etapa del receptor superheterodino.
- ♦ B_{aFi} : ancho de banda del amplificador de FI.

Desvanecimiento

Las variaciones en el perfil del terreno en un área de cobertura determinada puede afectar la pérdida del trayecto para diferentes sitios teniendo en cuenta la misma distancia transmisor-receptor. En consecuencia, el nivel de señal real medido puede variar en relación con el valor promedio pronosticado. Uno de los objetivos es conocer cuánto se desvía el nivel de señal real del valor medio pronosticado. Como existen tantas variables aleatorias independientes que introducen la variabilidad de la potencia recibida a su valor promedio, entonces esta variabilidad puede modelarse como una distribución normal. Consideremos que la variabilidad de la potencia recibida es producto de una pérdida adicional por desvanecimiento que se denomina L_f . Así se puede reescribir (8) de la siguiente manera:

$$Pr = \frac{PtGtGr}{L_b L_a L_f} \quad (18)$$

Se introduce ahora el concepto de probabilidad de cobertura como la probabilidad de que el nivel de señal recibido supere la sensibilidad del receptor $S(\text{dBm})$ en cualquier punto (emplazamiento) dentro del área de cobertura específica. Un valor típico es 75 %, lo cual significa que en un

75 % del área de la zona de cobertura se garantiza una comunicación confiable. Sea P_{cob} la probabilidad de cobertura, entonces:

$$P_{cob} = Prob (L_f \leq M_f) \quad (19)$$

En este caso M_f es un valor determinado de la variabilidad de L_f y se denomina margen de desvanecimiento. Considerando el margen de desvanecimiento, la ecuación de transmisión quedaría de la siguiente manera:

$$Pr(dBm) = Pt(dBm) + Gt(dBi) + Gr(dBi) - L_b(dB) - L_a(dB) - M_f(dB) \quad (20)$$

Este margen de desvanecimiento puede calcularse —para una probabilidad de cobertura de un 75% lo cual resulta ser un valor típico de planificación y diseño— utilizando la siguiente expresión:

$$M_f = \sigma \cdot 0,675 + \mu, \text{ dB} \quad (21)$$

En la tabla 3 se muestran valores típicos de σ y de μ .

μ	σ
<p>Área Urbana Densa: 20 dB</p> <p>Área Urbana: 15 dB</p> <p>Área Suburbana: 10 dB</p> <p>Área Rural (en vehículo): 8 dB</p> <p>Área Rural (abierto): 0 dB</p>	<p>8 dB VHF</p>
	<p>10 dB UHF</p>

Tabla 3 Valores típicos de σ y μ

Conclusiones

El intercambio de información radioeléctrica entre una estación base —o repetidor— y el terminal móvil se hace a través de un canal de radio propagación de características muy variables, dependiendo del punto donde esté situado el móvil dentro de la zona de cobertura. Esta variabilidad del nivel de señal recibido por el móvil depende de muchos factores como el perfil del terreno, presencia de obstáculos, absorción de energía de RF, etc. Por consiguiente se producen los fenómenos multitrayecto, ensombrecimiento y penetración en edificios y vehículos. La propagación multitrayecto da origen a las variaciones rápidas de la envolvente de la señal, la dispersión del retardo y la variación de la frecuencia de la portadora por la presencia del efecto Doppler. A su vez, la dispersión del retardo trae como consecuencia la superposición de varias señales de banda base distorsionando la información. Como resultado se observan dos tipos de

variaciones: rápidas y lentas. Las variaciones rápidas o desvanecimiento rápido son consecuencias de la superposición de varias réplicas de la señal transmitida por la estación base, en el terminal móvil, debido al multitrayecto. Por su parte, el desvanecimiento lento es consecuencia del ensombrecimiento que ocurre en el trayecto estación baseterminal móvil producto de obstáculos. Los cálculos de potencia de la estación base y cobertura radioeléctrica se realizan a partir de las variaciones lentas de Pr . Según Kamilo Feher, para el diseño del sistema, el requisito de calidad de transmisión (BER) se obtiene a partir del desempeño del sistema en un entorno de desvanecimiento de Rayleigh sin el ensombrecimiento log-normal. La interrupción de la cobertura —*outage*, evento complementario de la probabilidad de cobertura— es calculada a partir de un desvanecimiento log-normal y la ley de pérdida básica del trayecto vs. distancia. ▀

Bibliografía

- AMPS/TDMA System Design Fundamentals. Northern Telecom, 1999.
- Feher, Kamilo. *Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications*. Ed. 1ª: E.U.A.: Prentice-Hall, 1995.
- Hernández, José M.; Pérez-Fontán, F. *Introduction to Mobile Communication Engineering*. Boston: Artech House Publishers, 1999.
- Huidoro, José Manuel. *Comunicaciones Móviles*. Madrid: Thomson-Paraninfo, 2002.