
Comunicaciones sin hilos

PID_00265435

Antonio Satué Villar

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 4 horas



**Antonio Satué Villar**

Doctor ingeniero en Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Cataluña, en el año 2007. Desde el año 1994 es profesor de la Escuela Universitaria Politécnica de Mataró y secretario académico desde el año 2009. Su línea de investigación se centra principalmente en el ámbito del reconocimiento de locutor y las aplicaciones biométricas. En este sentido, participa en distintos proyectos de ámbito nacional y europeo.

La revisión de este recurso de aprendizaje UOC ha sido coordinada por el profesor: Ferran Adelantado Freixer (2019)

Segunda edición: septiembre 2019
© Antonio Satué Villar
Todos los derechos reservados
© de esta edición, FUOC, 2019
Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona
Realización editorial: FUOC

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y de la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitido de ninguna manera ni por ningún medio, tanto eléctrico como químico, mecánico, óptico, de grabación, de fotocopia, o por otros métodos, sin la autorización previa por escrito de los titulares del copyright.

Índice

Introducción	5
Objetivos	6
1. Antecedentes históricos	7
2. Conceptos generales	9
2.1. Técnicas de acceso múltiple	9
2.2. Técnicas de diversidad	11
2.2.1. Técnicas de diversidad en espacio	11
2.3. Propagación	13
3. Sistemas celulares	15
3.1. La idea celular	15
3.2. Funciones de un sistema celular	20
4. Cobertura	22
4.1. Cálculo de la zona de cobertura	24
4.2. Desvanecimientos rápidos	26
5. Pérdidas de propagación en exteriores e interiores	28
5.1. Propagación sobre espacio libre	28
5.2. Propagación sobre tierra plana	29
5.3. Modelo de Lee	32
5.4. Modelo de Okumura-Hata	32
5.5. Modelo COST 231	33
5.6. Model Erceg	38
5.7. Modelo ECC-33	39
Actividades	41
Ejercicios de autoevaluación	41
Solucionario	43
Glosario	44
Bibliografía	44
Anexo	45

Introducción

El principal objetivo de esta asignatura es entender el funcionamiento de los sistemas telemáticos sin hilos que hay en el mercado actualmente. Pero, para hacerlo, debe verse previamente cuáles son las peculiaridades de las transmisiones sin hilos, y eso es lo que trataremos en este módulo.

En el primer apartado hacemos una recopilación de los datos más significativos en el avance de los sistemas de radiotelefonía pública que nos servirá para ubicar en el tiempo algunos de los sistemas sin hilos más importantes.

En el segundo apartado explicamos tres conceptos básicos: la manera en la que varios usuarios acceden al medio aire (métodos de acceso), maneras para hacer más robusta la comunicación (técnicas de diversidad) y finalmente realizamos una breve descripción de los factores que influyen en la propagación de las ondas.

En sistemas de gran alcance hay que poner varias antenas para dar servicio a los usuarios, ya que con una sola no llegamos a todo el mundo (es el caso de la cobertura de los sistemas de comunicaciones móviles, como GSM, 3G o 4G). En estos casos, las transmisiones que hacen las estaciones base hacia los terminales móviles tienen que estar coordinadas. Pensemos, por ejemplo, en un usuario que se encuentra justo en el límite de dos células (una célula es el área a la que llega la señal de una antena); dicho usuario tiene que saber cuándo y cómo hacer el cambio de célula. Todos estos procedimientos los veremos en el tercer apartado, dedicado a los sistemas celulares.

En el cuarto apartado calcularemos la cobertura de un sistema. Para hacerlo, aplicamos una expresión matemática que, por su importancia, deducimos en el texto.

Finalmente, en el quinto apartado hacemos una recopilación de métodos de cálculo de pérdidas de propagación. Algunos servirán para áreas abiertas, otros para áreas montañosas, otros para espacios cerrados, etc. Todos estos métodos son aproximados (la única medida exacta se obtiene yendo al lugar físico y midiendo), pero son una aproximación necesaria cuando queremos plantearnos el diseño de un sistema.

Objetivos

Los contenidos de este módulo deben permitir a los estudiantes:

1. Describir la filosofía celular.
2. Conocer la diversidad en redes móviles.
3. Diferenciar los métodos de acceso.
4. Describir las funciones de un sistema celular.
5. Describir los elementos que definen la cobertura.
6. Conocer los fenómenos que causan las pérdidas.
7. Calcular coberturas.
8. Calcular pérdidas en medios abiertos y cerrados.
9. Comparar los órdenes de magnitud de las pérdidas en medios abiertos.

1. Antecedentes históricos

En este apartado haremos un breve recorrido por los momentos más significativos de la telefonía móvil.

En 1921, en las ciudades de Nueva York y Detroit, se realizan experimentos a una frecuencia de 2 MHz para transmitir mensajes de aviso a los coches de policía para que se detengan y llamen a la central con un teléfono convencional. En 1927 en Detroit cerraron el sistema debido a los constantes errores.

En 1929, en Cleveland, instalan un sistema en AM (modulación de amplitud) que permite la transmisión de mensajes de voz desde la central a los coches. En 1930, en Bayonne (Nueva Jersey), funciona un sistema *full-duplex* (permite la transmisión bidireccional desde la central a los coches y desde los coches a la central), pero con poca calidad.

En 1935, Edwing Armstrong inventa la FM (modulación en frecuencia), que tiene una calidad mejor que la AM. En 1939, en Connecticut se implementa el primer sistema móvil de FM bidireccional.

En 1946, la empresa AT&T establece en San Louis una red móvil. Era un sistema manual, en el que un operador/a situado en la estación base encaminaba la llamada. Además, disponía de un único transmisor potente (radio de alcance de unos 50 km) con los problemas típicos de congestión (cuando un móvil entra, pregunta qué frecuencia puede utilizar y quizás no hay ninguna libre).

Poco después, en 1947, los laboratorios Bell proponen las bases del sistema celular: se divide el espacio en pequeñas zonas (de radio inferior a 30 km) donde se pueden reutilizar frecuencias. Así, si una celda tiene mucho tráfico, la podremos dividir en celdas más pequeñas y al mismo tiempo disminuirémos la potencia de emisión.

No es hasta 1979 cuando nace el primer sistema celular: AMPS (*advanced mobile phone service*) en Chicago.

En 1981, Noruega, Suecia, Finlandia y Dinamarca crean el NMT (*nordic mobile telephone*). En España aparece en 1982 como NMT-450 (que utiliza la banda de 450 MHz).

En 1985, Gran Bretaña crea el TACS (*total access communication system*), que es una variación del AMPS. En España aparece en 1990 con el nombre *TACS-900* (va a 900 MHz), también conocido como *Moviline*. A estos sistemas celulares descritos hasta ahora se les conoce como la primera generación celular. Se caracterizan por utilizar modulación FM y acceso FDMA (cada comunicación dispone de una banda frecuencial durante todo el tiempo).

El gran aumento de usuarios hace necesaria una modulación digital con el fin de incrementar la capacidad sin aumentar la banda frecuencial necesaria. Serán los sistemas de segunda generación. En 1982, dentro de la CEPT (*Conference of European Post and Telecommunications Administration*) se crea el GSM (*groupe special mobile*).

En 1992 aparece el GSM en Europa (va a 900 MHz; y emplea un acceso TDMA, donde cada comunicación utiliza una banda frecuencial pero sólo durante un tiempo). En el año 1993 aparece el DCS en Europa, un sistema análogo a GSM pero que trabaja a la frecuencia de 1.800 MHz y, por lo tanto, permite un mayor número de usuarios. En Japón utilizan el JDC y en América el D-AMPS (estándar IS-54).

GSM nació como un sistema pensado para transmitir voz. Pero la aparición de internet y una necesidad creciente de transmisión de datos han originado nuevos sistemas pensados para datos. Siglas como GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA, HSUPA, HSPA+, LTE, LTE-A y NR hacen referencia a la evolución de estos sistemas, en los que el principal reclamo ha sido conseguir más velocidad de datos.

Hasta la segunda generación surgieron sistemas de telefonía inalámbrica (de corto alcance, pensados inicialmente para sustituir el hilo del teléfono por un enlace de radio), de mensajería (cuando la comunicación es intrínsecamente unidireccional) y redes privadas (cuando el grupo de usuarios del sistema móvil es reducido). Desde la tercera generación, estos sistemas quedaron absorbidos por los que se han comentado en el párrafo anterior.

En la tabla siguiente se muestra, de manera resumida, la evolución de los sistemas móviles. Para hacerlo, se han clasificado en cuatro bloques. Observamos que la tendencia ha sido integrar todos los sistemas en uno solo.

		1980	1990	2000	2010	2020
		1G	2G	3G	4G	5G
Gran público (\$\$)	Telefonía pública	NMT TACS	GSM DCS	GPRS HSDPA HSPA+ UMTS EDGE HSUPA	LTE LTE-A	NR
	Telefonía inalámbrica	CT1 CT2	DECT			
	Mensajería	POCSAG	ERMES			
	Telefonía privada	MPT1327	TETRA			

2. Conceptos generales

En este apartado expondremos algunos conceptos generales básicos cuando hablamos de comunicaciones sin hilos: los métodos que utilizan los usuarios para acceder al medio aire, las técnicas de diversidad que permiten hacer más robusta la comunicación y los factores que influyen en la propagación de las ondas.

2.1. Técnicas de acceso múltiple

En los servicios de radiocomunicaciones móviles multiusuario, los usuarios del sistema tienen que compartir un canal de transmisión común. Así, deben habilitarse técnicas para que los usuarios puedan acceder al canal y que el sistema pueda saber cuál es la señal de cada usuario.

Las técnicas actuales de compartición de canales pueden dividirse en:

- **Acceso aleatorio** (por ejemplo, *aloha*, donde lanzamos un paquete de datos y esperamos que no haya colisión).
- **Transmisión simultánea** (dividimos la frecuencia o el tiempo en ranuras, y permitimos el acceso a éstas).

Las técnicas de transmisión simultánea más importantes son TDMA, FDMA, CDMA y OFDMA. A continuación comentaremos sus aspectos básicos:

FDMA (*frequency division multiple access*)

La banda total disponible se divide en un determinado número de radiocanales (normalmente, las bandas de emisión y recepción están separadas en frecuencia).

El número total de radiocanales asignados a una determinada célula están disponibles para aquellos usuarios que quieren iniciar una llamada o aquellos que la reciben.

Cada frecuencia soporta una única comunicación simultánea.

A cualquier usuario del sistema se le puede asignar cualquiera de los canales que se encuentren disponibles en cualquiera de sus transmisores.

TDMA (*time division multiple access*)

Cada radiocanal soporta un determinado número de “circuitos” multiplexados en tiempo.

La estructura de un canal TDMA es más complicada que la de un canal FDMA. El sistema TDMA crea una matriz tiempo-frecuencia: en cada frecuencia existe un determinado número de ranuras en tiempo. Cada posición de la matriz es un “circuito” al que puede accederse por cualquier móvil (un móvil accede a una ranura de una determinada frecuencia). Cada móvil con acceso a uno de estos canales transmite la información a ráfagas dentro de la ranura de tiempo asignada.

Resumiendo, a cada usuario se le adjudica un intervalo temporal durante el cual se le asigna toda la banda.

CDMA (*code division multiple access*)

Todos los usuarios comparten la misma banda de frecuencias y transmiten simultáneamente. Cada usuario ocupa toda la banda durante todo el tiempo.

Cada móvil tiene asignada una secuencia de código única, diferente del resto de códigos y, en teoría, ortogonal a todas ellas. Hablaremos con más profundidad en el apartado 3.2 del cuarto módulo.

Resumiendo, la información de cada usuario se codifica con unos códigos de identificación. En el receptor, con un proceso de correlación, se puede separar la información útil.

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)

En OFDMA, dividimos el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos dependiendo de las necesidades de distintos usuarios. En función de las condiciones del canal aire y las necesidades de los usuarios, se va cambiando la asignación de subportadoras a cada usuario.

Este sistema es robusto a los multicaminos, ya que la duración de los símbolos que hay que transmitir es mayor que si no dividiésemos el ancho de banda disponible.

Diferentes usos

En los sistemas analógicos de primera generación se usa FDMA. En Europa, los sistemas digitales de segunda generación usan TDMA, mientras que en Estados Unidos se han definido estándares basados en TDMA (por ejemplo, el IS-54) y en CDMA (por ejemplo, el IS-95). La mayoría de los sistemas de tercera generación son CDMA (por ejemplo, el UMTS) y OFDMA (por ejemplo, el 802.16e).

2.2. Técnicas de diversidad

En comunicaciones móviles el canal es un medio hostil, que cambia con el tiempo; puede cambiar tanto porque el móvil se mueve como porque el medio cambia sus propiedades (obstáculos en el camino, lluvia...). Las técnicas de diversidad pretenden obtener dos o más **caminos diferentes de propagación**.

Las técnicas de diversidad pueden ser de tres tipos:

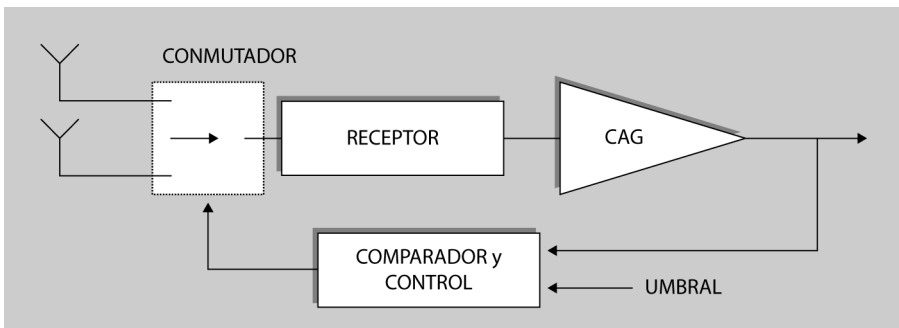
- **En frecuencia:** transmitiremos a dos frecuencias distintas. Utiliza mucho ancho de banda, que es un recurso caro.
- **En tiempo:** se trata de transmitir la información en instantes diferentes. O sea, tenemos los recursos ocupados el doble de tiempo. Si tenemos muchos usuarios a quienes tenemos que dar servicio en poco tiempo, tendremos que duplicar los recursos.
- **En espacio:** dispondremos de dos (o más) antenas convenientemente separadas en el receptor. Encarecemos el receptor pero no aumentamos el ancho de banda requerido. Comentaremos más detenidamente éstas, que son las habituales.

2.2.1. Técnicas de diversidad en espacio

Si realizamos el experimento de poner dos antenas en un móvil y evaluar la relación señal/ruido (S/N) instantánea, podemos observar que, para un instante concreto, quizás una está mal y la otra bien. En función de cómo procesamos las señales de las antenas, tenemos las tres técnicas de diversidad en espacio:

Por conmutación

Diversidad en espacio por conmutación



Tal como vemos en la figura anterior, el conmutador selecciona una antena. Cuando el nivel en la entrada del comparador es inferior a un umbral, conmuta en la otra antena. El CAG es un control automático de ganancia.

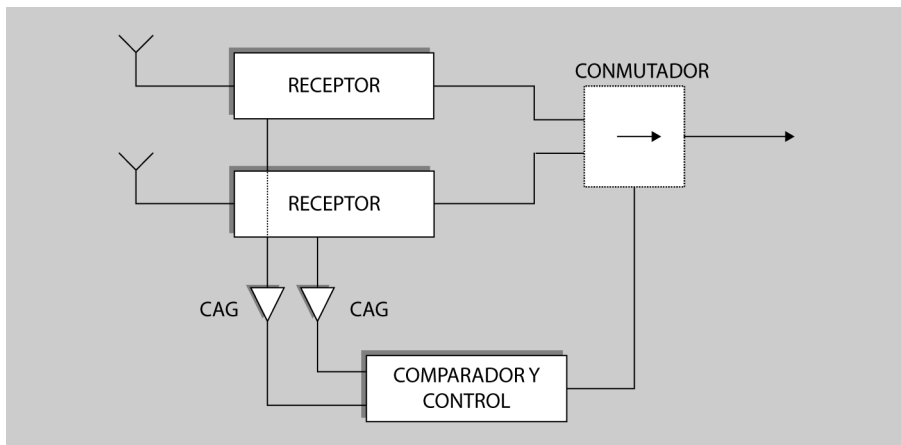
- **Ventaja:** utiliza un solo receptor.

- **Inconveniente:** si en las dos antenas hay poca señal, el circuito empieza a oscilar, ya que el circuito encuentra que todas las señales están por debajo del umbral. En la práctica se hace que el conmutador actúe cierto tiempo después de que la señal esté por debajo del umbral.

Por selección

Tal como vemos en la figura siguiente, tenemos dos receptores trabajando simultáneamente. Escogeremos el mejor en cada momento.

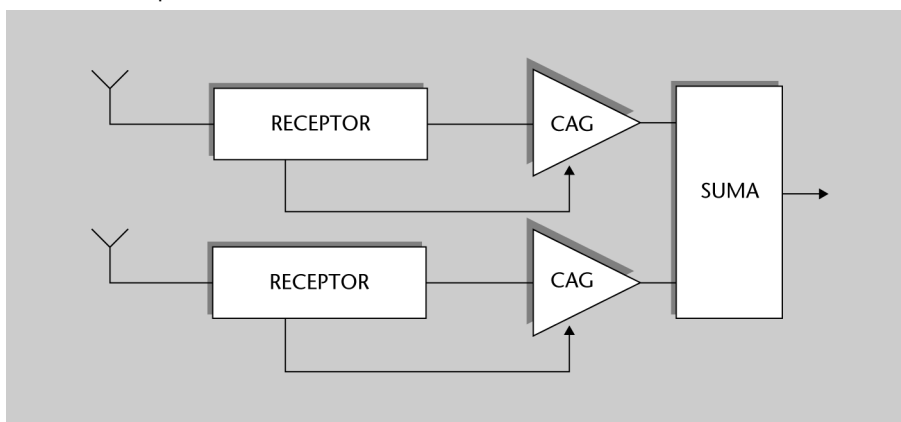
Diversidad en espacio por selección



- **Ventajas:**
 - Aquí siempre nos quedaremos con la mejor señal (antes se fijaba un umbral).
 - Al conmutar, las señales ya están sincronizadas. Así, el transitorio al conmutar será menor, pero sigue estando.
- **Inconveniente:** requiere tantos receptores como antenas.

Por combinación de máxima ganancia (MRC)

Diversidad en espacio MRC



Tal como muestra el esquema de la figura anterior, sumaremos las dos señales en fase y las ponderaremos en función del S/N de cada señal.

- **Ventaja:** nos evitamos la conmutación.

Como la estación base no tiene problemas para emitir potencia (tiene conexión a la red eléctrica), pero los móviles sí (suelen funcionar con baterías), normalmente la diversidad se aplica en el enlace ascendente (se ponen dos antenas en el elemento que recibe la señal proveniente del elemento que funciona con baterías).

Enlace ascendente

Es el que va desde los terminales hasta la estación base.

La diversidad nos permite conseguir buenas tasas de error con valores razonables de S/N .

Por ejemplo, un sistema que utiliza una modulación QPSK (modulación de fase con 2 bits por símbolo) sin diversidad tiene una probabilidad de error de bit: $p_B = 1 / (2 \cdot S / N)$. Si añadimos diversidad, los valores de p_B son $p_B = 3 / (2 \cdot (S / N)^2)$ si utilizamos selección de orden 2 y $p_B = (1 / 2) (3 / (2 (S / N)^2))$ si utilizamos MRC de orden 2.

Así, para garantizar $p_B = 10^{-3}$ sin diversidad necesitamos $S / N = 27$ dB, con selección de orden 2 necesitamos 16 dB y con MRC de orden 2 necesitamos 14,4 dB. Se ve claramente que en un entorno "complicado", los sistemas con diversidad son mejores.

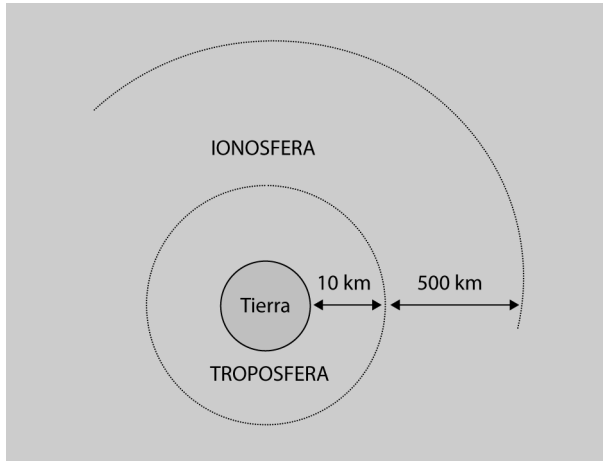
2.3. Propagación

Cuando una onda viaja por el aire, va perdiendo energía a causa de diversos factores:

- **Troposfera:** es una capa que va desde la superficie de la Tierra hasta una altura de 10 km (ver la figura siguiente). Es en esta capa donde se producen los fenómenos atmosféricos. La lluvia es importante a altas frecuencias (superiores a 10 GHz), ya que la dimensión de las gotas es comparable a la longitud de onda.
- **Ionosfera:** es una capa ionizada que va desde donde acaba la troposfera hasta 500 km de la Tierra. Cabe destacar dos fenómenos:
 - Si la frecuencia es inferior a 30 MHz, la señal rebota (por eso podemos oír las tormentas a gran distancia).
 - La carga de iones de día y de noche es diferente. Por tanto, una emisora que aproveche los rebotes deberá cambiar de frecuencia.
- **Tierra:** la superficie terrestre no es homogénea y, por lo tanto, tenemos muchos rebotes (reflexiones). También cabe considerar la curvatura de la Tierra (sólo en grandes radioenlaces), y es habitual elevar 40 metros el emisor y receptor por cada 40 km de distancia, con el fin de compensarla.

En comunicaciones móviles (utilizan frecuencias en torno a los 1-2 GHz) sólo tenemos que considerar las pérdidas debidas a reflexiones (y a la distancia, evidentemente). Sólo nos afectará la lluvia de manera significativa para sistemas que utilicen frecuencias mayores de 10 GHz.

Grosos de las capas externas a la Tierra



3. Sistemas celulares

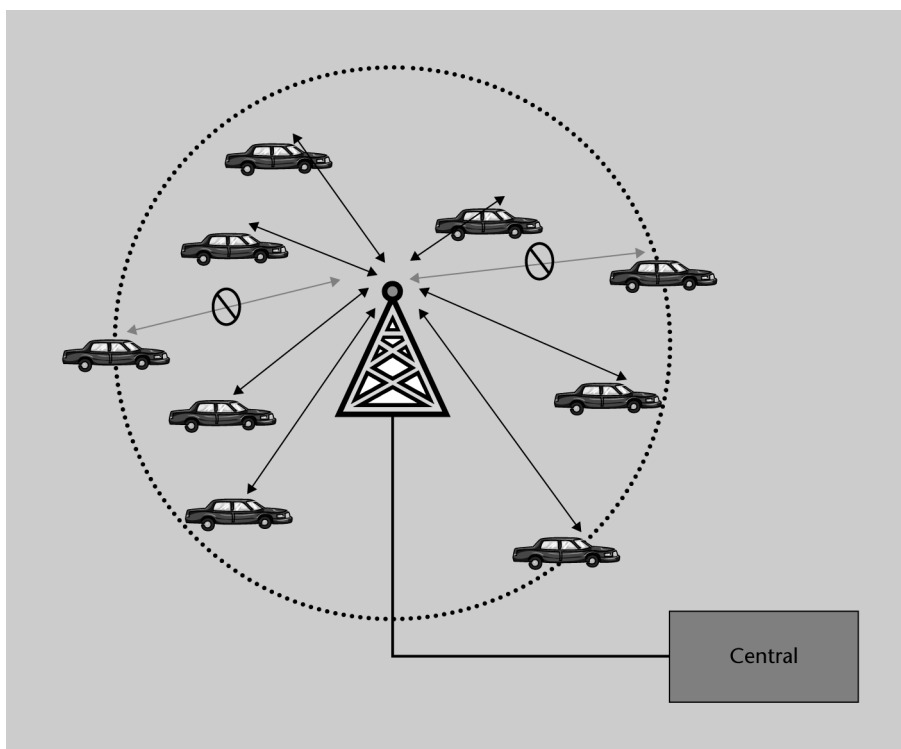
En este apartado hablaremos de las características de los sistemas celulares: su fundamento teórico, sus ventajas y sus inconvenientes.

3.1. La idea celular

Los primeros sistemas móviles (año 1946) eran unicelulares (una estación base sirve una gran zona, como en la figura siguiente). Aparecen varios problemas:

- Los móviles tienen que ser grandes y pesados, ya que necesitan mucha potencia para poder transmitir a la base.
- Cuando salimos de una célula y entramos en otra, debe volverse a llamar, y no siempre encontraremos un canal libre.

Sistema unicelular



Además, estos sistemas unicelulares tienen poca capacidad, ya que cada usuario necesita una frecuencia.

La eficiencia (η) se define como el número de canales que se pueden ubicar por km^2 :

$$\eta = \frac{B_r / B_c}{S}$$

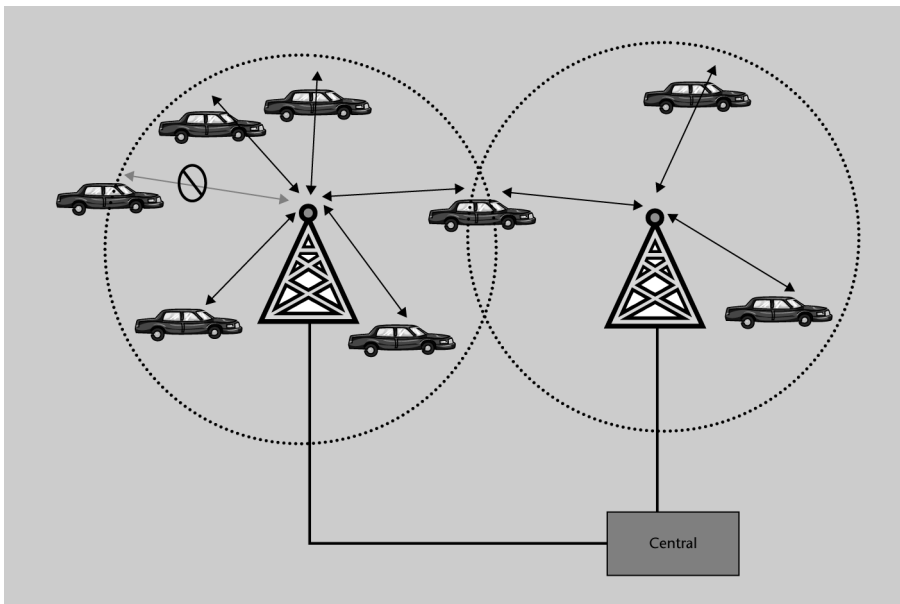
donde S es el área de la zona de cobertura, B_T es el ancho de banda total asignado al sistema y B_C es el ancho de banda de un canal.

Por ejemplo, si $B_T = 1$ MHz, $B_C = 25$ KHz y $S = 314$ km² (círculo de 10 km de radio), entonces $\eta = 0,12$.

Los **sistemas celulares** (figura siguiente) pretenden **reutilizar frecuencias**. Para hacerlo, las células son más pequeñas y dos células convenientemente alejadas podrán utilizar las mismas frecuencias. Una ventaja es que, al ser las células más pequeñas, la potencia que deben transmitir los móviles también será menor.

Si utilizamos un móvil cerca de una estación base, la batería dura más que si lo hacemos en la periferia.

Sistema celular



Para calcular la eficiencia, definimos dos variables nuevas:

K : número de células que no repiten frecuencias (tamaño del clúster).

N_c : número de células que cubren toda el área de cobertura.

Como η es el número de canales de una célula dividido por la superficie de una célula, el número de canales de una célula es $(B_T / B_C) / K$ y la superficie de una célula es S / N_c , entonces la eficiencia es:

$$\eta = \eta_{no\ celular} \cdot \frac{N_c}{K}$$

Por ejemplo, si $N_c = 9$ y $K = 3$, ahora la eficiencia pasa de 0,12 a 0,36.

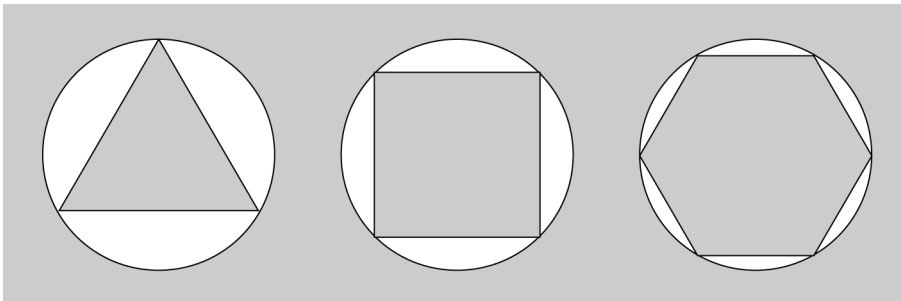
Vemos que la eficiencia es mayor que en los sistemas no celulares, y depende del tamaño del clúster. Al haber más de una célula, deberá garantizarse que la comunicación siga si el usuario realiza un cambio de célula (Traspaso o, en inglés, *handover* o *handoff*).

Ejemplo: tenemos una estación base que da servicio a 10 km^2 y dispone de cuarenta canales (f_1, f_2, \dots) de 25 kHz cada uno (en total, 1 MHz). Si ahora cubrimos la misma área con nueve células ($N_c = 9$), en teoría podríamos tener $40 \times 9 = 360$ canales, pero eso no puede ser porque tendríamos interferencias en los extremos de las células. Eso obliga a definir clústers. Si definimos clústers de tres células ($K = 3$), podremos tener $40 \times 3 = 120$ canales, ya que en cada paquete de tres células podremos reutilizar los cuarenta canales. Hemos multiplicado la eficiencia por 3 ($N_c / K = 9 / 3 = 3$) y hemos conseguido que los móviles emitan menos potencia al transmitir (están más cerca de la estación base). El inconveniente es que ahora necesitamos ocho estaciones base adicionales (más coste).

Cuando queremos hacer una planificación frecuencial, lo que queremos es, dada una zona por cubrir, calcular cuántos canales se necesitan y sus frecuencias. En el software de planificación no se trabaja con círculos porque, aunque la propagación ciertamente depende de la distancia (circular), los círculos no permiten cubrir un plano sin dejar espacios en blanco o sin solapar áreas. En la figura siguiente tenemos los tres elementos que permiten teselar: triángulo equilátero, cuadrado o hexágono. Se utiliza el hexágono por dos motivos:

- Parece un círculo.
- Con menos potencia transmitida cubre más área.

Elementos que permiten teselar



A continuación evaluaremos la calidad de un sistema celular que utiliza hexágonos y clústers (agrupaciones) de siete células:

Supondremos el peor caso:

- Todos los canales interfieren (las células de la segunda corona no hace falta considerarlas, ya que eso se compensa con el hecho de que algún canal de alguna célula de la primera corona no esté conectado).
- Nos situamos en el peor punto: perímetro del hexágono (mínima potencia útil y máxima potencia interferente).

Teselar

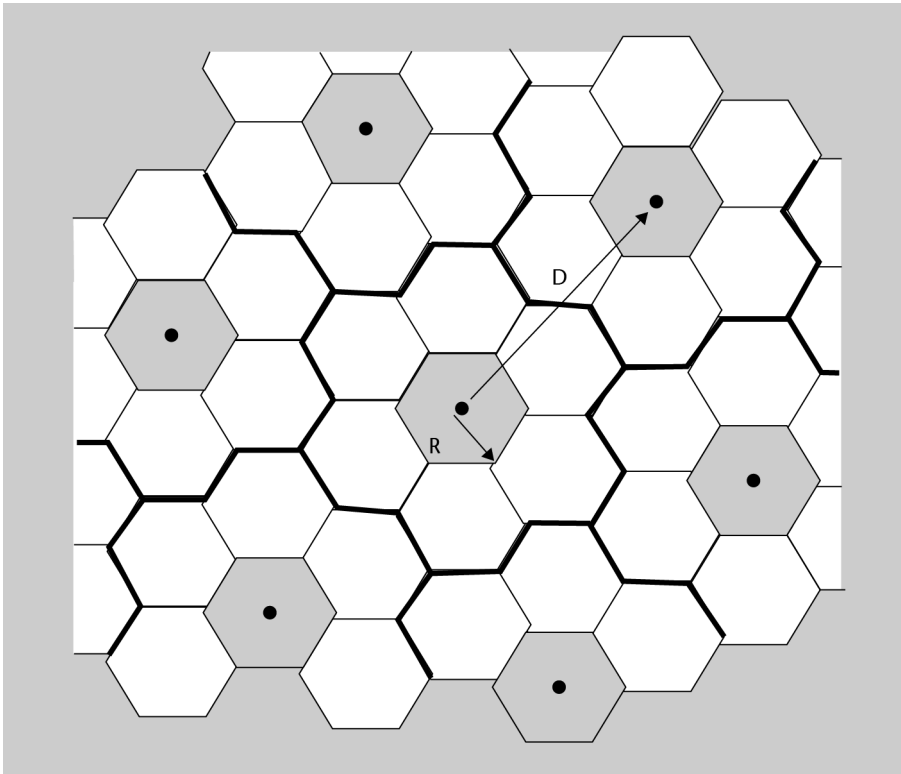
Teselar es cubrir un área sin dejar espacios y sin solapar.

Coronas

Entendemos por primera corona aquellas celdas que están en los clústers en contacto con el clúster central. La segunda corona está formada por las celdas exteriores a los clústers de la primera corona pero en contacto con éstos.

Con la ayuda de la figura siguiente, calcularemos la relación señal/interferencia en el móvil central (está en el perímetro del hexágono central):

Geometría celular con clústers de dimensión 7



Primero calculamos la señal útil (C):

$$C = \alpha \cdot P_T \cdot \frac{1}{R^\gamma}$$

donde α son las pérdidas de las antenas, P_T es la potencia transmitida por la estación base, R es el radio de la célula y γ es el factor de propagación del medio (los valores típicos van desde 2 –para medios rurales y espacio libre– hasta 5 –medio urbano, medios con reflexiones). En estas expresiones, todas las variables están en unidades lineales, no en unidades logarítmicas.

A continuación calculamos la señal interferente (I):

$$I = \sum_i \alpha \cdot P_T \cdot \frac{1}{d_i^\gamma}$$

donde d_i es la distancia entre el móvil central y la estación base i ($i:1, 2, \dots, 6$) de la primera corona.

Si aproximamos $d_1 = d_2 = \dots = D$ (distancia de reuso), entonces la relación señal-interferencia es:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{D}{R} \right)^\gamma$$

Conclusiones:

- Para un sistema celular interesa una atenuación (γ) grande, ya que afecta más a las interferencias que a la señal útil.
- Para aumentar la capacidad interesan células pequeñas (R pequeño), pero habrá problemas con los cambios de célula si el móvil va rápido (muchos traspasos de célula con la correspondiente señalización).
- Más distancia de reuso (D grande) \Rightarrow Necesitamos más canales (más frecuencias).
- D / R no puede tener cualquier valor, ya que, por geometría, hay unas relaciones entre D y R .

El 6 de la expresión se debe al hecho de que la primera corona tiene seis antenas interferentes. Para aumentar la capacidad del sistema, se hace una **sectorización** de las células (en lugar de antenas omnidireccionales se usan antenas sectoriales). Con antenas de 120° , el número de antenas interferentes ya no es de seis sino de dos y así se reduce la interferencia. El inconveniente que presenta es que el cambio de sector requiere hacer un traspaso (cambio de canal), por lo cual la sectorización se utiliza sólo en zonas de tráfico elevado.

Hemos visto que con clústers de tamaño 7 se cubría toda la zona de servicio, pero ¿pueden existir clústers de dimensión 4? ¿Y de dimensión 5? Geométricamente podríamos ver que, si cogemos cuatro células, las podemos ir repitiendo en el plano y no dejaríamos espacios vacíos, pero con cinco células eso no sería posible. Hay una expresión que nos indica cuáles son las dimensiones permitidas:

$$N = i^2 + j^2 + i \cdot j$$

donde i y j son números enteros.

Así, los números permitidos son 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, ... $N = 1$ no se utiliza (reuso en las células vecinas), pero $N = 16$ tampoco (mucho consumo espectral).

Geométricamente también se puede deducir la siguiente expresión, que relaciona la dimensión del clúster con las distancias D y R :

$$N = \frac{1}{3} \cdot \frac{D^2}{R^2}$$

La deducción de estas dos expresiones se puede encontrar en el apartado 6.5 del libro *Comunicaciones móviles*, referenciado en la bibliografía general de la asignatura.

Un sistema analógico requiere un C/I superior a 18 dB, mientras que un sistema digital tiene bastante con uno C/I superior a 9 dB. Los sistemas digitales son más inmunes a las interferencias y pueden trabajar con clústers pequeños (permiten más capacidad en el mismo espectro).

Números rómbicos

A los valores de N que cumplen esta expresión se les conoce como *números rómbicos*.

Así, para hacer un diseño, se calcula la N a partir de la C/I que necesitamos. Por ejemplo, para $\gamma = 4$ (urbano) y $C/I > 18$ dB podemos encontrar que $(D/R) > 4,41$ y de ahí $N > 6,48$, y por lo tanto $N_{\text{permitido}} = 7$. Si $C/I > 9$ dB, entonces con $N = 3$ el sistema ya funciona (soporta mejor las interferencias).

3.2. Funciones de un sistema celular

A continuación definimos las funciones más características que un sistema celular debe incluir.

1) Traspaso (*handover*)

Consiste en dar continuidad a la comunicación cuando cambiamos de célula. El usuario debe ignorar dónde están los límites de las células. Unos tonos de supervisión ayudan a ver la calidad del enlace.

Asociado con ello está el concepto de **histéresis** en la localización: cuando un móvil está encendido (aunque no esté en comunicación) en un sistema que tiene definida una histéresis de x dB, si el móvil ve una estación que mejora en x dB la que tiene, hará un traspaso. Son actualizaciones innecesarias de la base de datos.

Características:

- Automático, sin intervención del usuario.
- Consume tiempo.
- Al reducir el tamaño de la célula, aumenta el número de trasposos.

2) Localización

Cuando el móvil está encendido pero no está comunicándose, éste tiene que estar localizable por si lo llaman. El móvil debe decir al sistema dónde está (se localiza).

3) Búsqueda (*paging*)

Cuando el móvil tiene una llamada entrante, se consultan las bases de datos para saber en qué zona está el móvil. Después, vía radio se hace un *broadcast* (mensaje de grupo) en la zona donde está el móvil (*paging*).

Asociado con ello están los conceptos de **attach/detach**. Cuando un terminal no está bajo cobertura, el sistema lo sigue buscando infructuosamente, ya que sabe que el terminal está encendido. El sistema puede hacer *detach* (usuario inaccesible) después de unas búsquedas infructuosas. GSM hace que cada cierto tiempo el terminal se registre. Si no lo hace, lo declara inaccesible. Cuando nosotros apagamos el terminal, hace *detach* y espera confirmación de la red.

4) Acceso

Cuando el móvil quiere llamar hay que gestionar un protocolo, ya que no hay un canal de móvil a base asociado a cada móvil y puede haber colisiones.

5) Itinerancia (*roaming*)

Es la cobertura internacional (o nacional con otros operadores), es decir, la posibilidad de utilizar el teléfono móvil desde el extranjero o desde una zona nacional no cubierta por el operador propio. Para hacer itinerancia, es preciso que los operadores se pongan previamente de acuerdo.

4. Cobertura

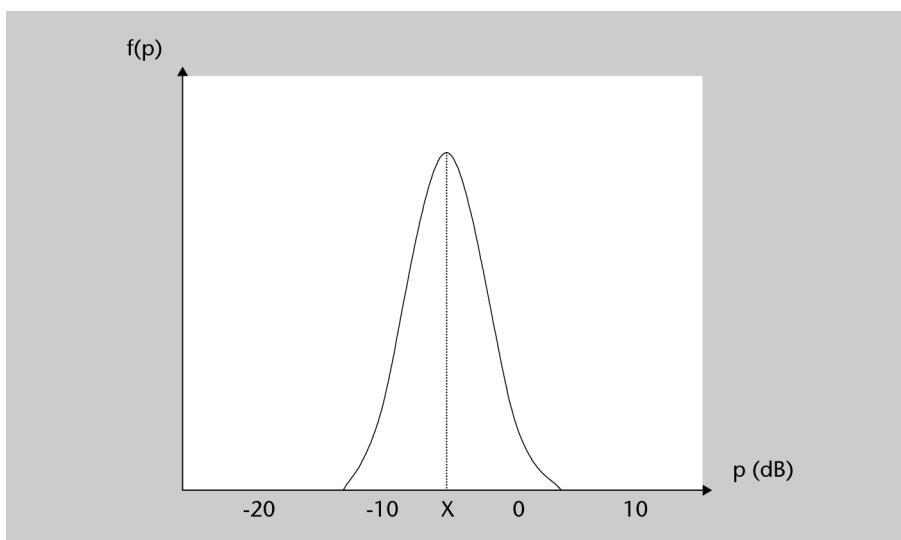
Para saber qué pérdidas de propagación introducirá un canal móvil, necesitamos encontrar un modelo matemático para este canal. Así, no habrá la misma atenuación entre dos puntos separados x kilómetros si estos dos puntos tienen una visión directa, que si hay un obstáculo entre ellos.

Se definen tres tipos de canales:

1) **Canal gaussiano**: es el modelo que debe aplicarse cuando el camino de transmisión es ideal. Tiene una densidad espectral de potencia constante sobre el ancho de banda y una función de densidad de probabilidad gaussiana. Sería el caso de una transmisión entre dos puntos sin rebotes.

En la figura siguiente podemos ver un canal en el que la atenuación esperada es x dB. Hay probabilidades de que la atenuación sea mayor o menor, pero suele estar en torno al valor esperado.

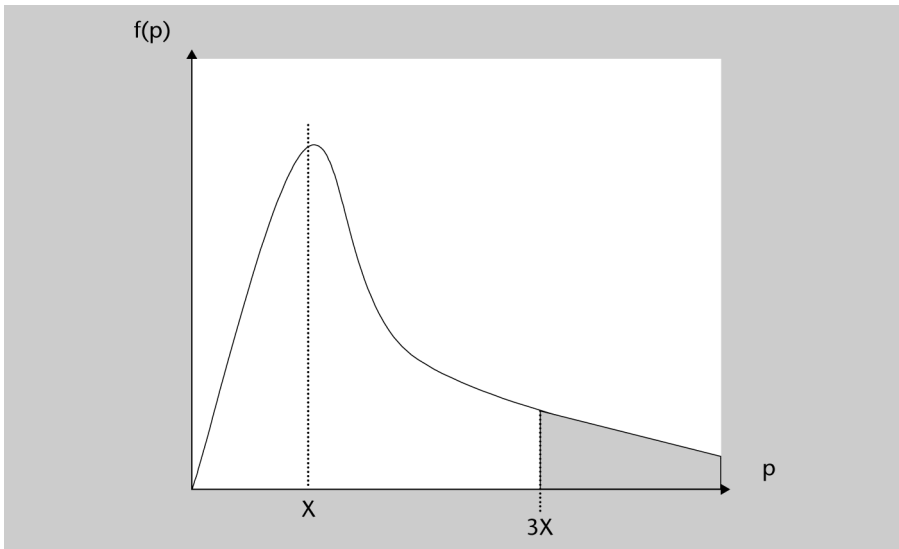
Función de densidad de un canal gaussiano



2) **Canal Rayleigh**: se da cuando sólo tenemos rebotes (no tenemos visión directa entre emisor y receptor).

En la figura siguiente podemos ver un canal de este tipo. La atenuación esperada está alrededor de x dB, pero vemos que es posible tener atenuaciones mucho mayores (por ejemplo, el área rayada es la probabilidad de que la atenuación sea superior a $3x$).

Función de densidad de un canal Rayleigh

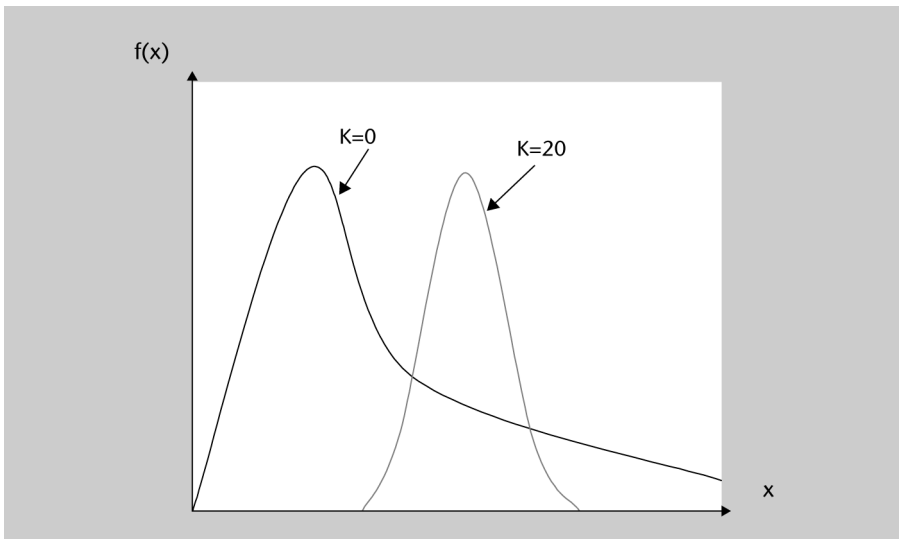


Canal Rice: se da cuando tenemos un camino con visión directa (LOS) y otros sin visión directa (NLOS). Eso hace que los desvanecimientos sean menos profundos. Las curvas dependen de un parámetro K = potencia del camino dominante / potencia de los caminos no directos. Si $K = 0$, estamos hablando de un canal Rayleigh, y si K es grande estamos hablando de un canal gaussiano (ver la figura siguiente).

LOS y NLOS

LOS significa *line-of-sight*, o sea, que hay visión directa. NLOS significa lo contrario.

Función de densidad de un canal Rice



La atenuación de un canal puede deberse a tres motivos:

1) Pérdidas de propagación debidas a la distancia: son las que determinan la potencia media. Si tenemos una estación base que transmite una potencia P_T , todos los móviles que estén a una misma distancia de la estación recibirán una potencia P_R .

2) Desvanecimientos lentos, también denominados *shadowing*, debidos a zonas de sombra (por ejemplo, un coche que pasa por dentro de un bosque). Si entre la estación base y las terminales hay obstáculos, la potencia recibida será

diferente de la esperada. Entendemos por *zona de cobertura* el porcentaje de lugares dentro de este círculo que reciben una potencia suficiente para que funcione un terminal móvil.

La potencia mínima que debe llegar a un móvil para que funcione correctamente se llama *sensibilidad*.

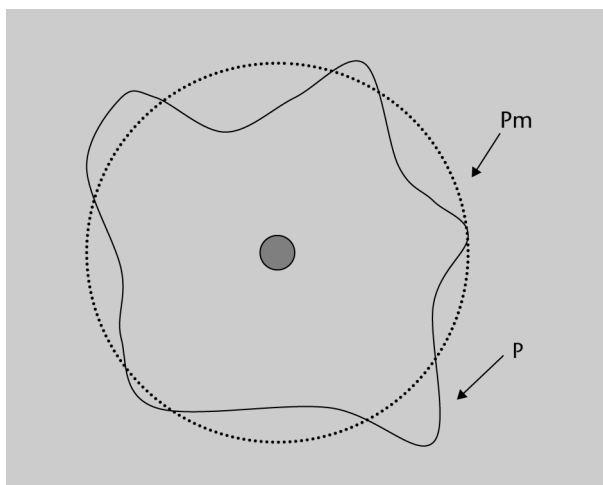
3) Desvanecimientos rápidos, también denominados *fast fading*, debidos a propagación multicamino. Estas variaciones bruscas y cortas provocan una ráfaga de errores.

La zona de cobertura se determina por los dos primeros motivos, y la probabilidad de error, por el tercero. Habrá que encontrar un modelo matemático que se parezca a la realidad física.

4.1. Cálculo de la zona de cobertura

Suponemos que un móvil se sitúa a una distancia D de una estación base y recibe una potencia P . Si ahora desplazamos este móvil en torno a la estación base, intentando que siempre reciba la misma potencia P , no describirá una trayectoria circular perfecta, por los desvanecimientos lentos comentados anteriormente. Así, por ejemplo, haría la trayectoria marcada con una P en la figura siguiente. Si queremos que la trayectoria sea circular y que la potencia media recibida en esta trayectoria continúe siendo P , conseguimos el círculo marcado con P_m .

Efecto de los desvanecimientos lentos



La potencia media local (tiene desvanecimientos lentos) es una variable aleatoria del tipo log-normal. Eso quiere decir que la potencia media expresada en dB es normal (gaussiana). Su función de densidad es:

$$f(p) = \frac{1}{\sigma_p \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \frac{(p-p_m)^2}{\sigma_p^2}}$$

donde p es la potencia instantánea [dB], p_m es la potencia instantánea media [dB] y σ_p es la desviación [dB].

Para que un móvil funcione, la potencia recibida (P) tiene que ser superior a la sensibilidad (P_u). La probabilidad de que eso sea así es:

$$\text{prob}\{P \geq P_u\} = \int_{P_u}^{\infty} f(p) \cdot dp$$

Sustituyendo,

$$\text{prob}\{P \geq P_u\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_p} \cdot \int_{P_u}^{\infty} e^{-\left(\frac{p-p_m}{\sqrt{2} \cdot \sigma_p}\right)^2} \cdot dp$$

Si hacemos un cambio de variable $t = \frac{p-p_m}{\sqrt{2} \cdot \sigma_p}$

$$\text{prob}\{P \geq P_u\} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{\frac{P_u-p_m}{\sqrt{2} \cdot \sigma_p}}^{\infty} e^{-t^2} \cdot dt$$

Esta integral no es resoluble analíticamente. Pero si utilizamos una función tabulada (ved el anexo) que está definida como:

$$\text{erf}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-t^2} \cdot dt$$

entonces podemos llegar a:

$$\text{prob}\{P \geq P_u\} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \text{erf}\left(\frac{P_u - P_m}{\sqrt{2} \cdot \sigma_p}\right)$$

Esta expresión nos relaciona la probabilidad de que un móvil funcione correctamente (o el porcentaje de móviles dentro de una cierta área de cobertura que funcionarán correctamente), la sensibilidad de los terminales, la potencia media (que podemos calcular a partir de la distancia entre el terminal y la estación base) y la desviación del medio (un medio con muchos obstáculos tendrá una desviación mayor).

Veamos un ejemplo con números. Suponemos un medio con una desviación de 10 dB y suponemos también que los móviles que estén en los extremos de la zona

Observación

Hay tablas con los valores de σ_p para diferentes entornos.

de cobertura recibirán una potencia de -100 dBm. Si la sensibilidad de los móviles es de -110 dBm, el porcentaje de terminales que recibirán correctamente es:

$$\text{prob}\{P \geq P_u\} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \text{erf}\left(\frac{-110 - (-100)}{\sqrt{2} \cdot 10}\right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \text{erf}\left(\frac{-1}{\sqrt{2}}\right)$$

Teniendo en cuenta que la función $\text{erf}(x)$ tiene simetría impar y que $\text{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 0,68$, obtenemos que $\text{prob}\{P > P_u\} = 0,84$. Eso significa que el 84% de los terminales recibirán correctamente.

Simetría impar

Simetría impar de $\text{erf}(x)$ significa que $\text{erf}(-x) = -\text{erf}(x)$.

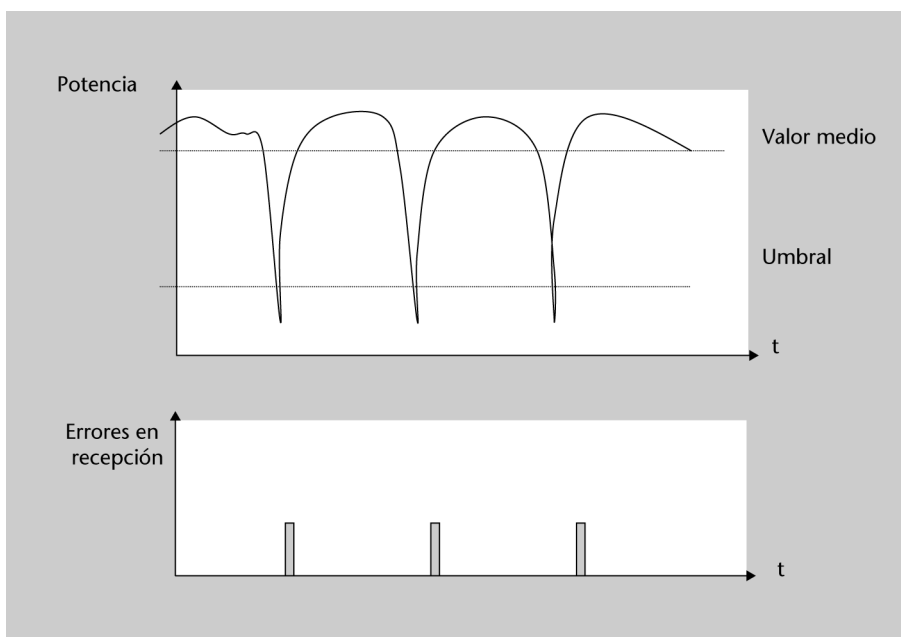
Si mantenemos los valores anteriores pero suponemos que el medio es mejor (desviación = 1 dB), en este caso $\text{prob}\{P > P_u\} = 0,99999$. O sea, casi el 100% de los terminales reciben correctamente.

4.2. Desvanecimientos rápidos

En un entorno móvil, la propagación multicamino provoca que en ciertos instantes tengamos desvanecimientos cortos (rápidos) pero profundos. Nuestro objetivo es evaluar los errores producidos por este hecho.

En la figura siguiente vemos que por debajo de un cierto nivel de potencia recibida (nivel umbral), se producen errores en la recepción.

Efecto de los desvanecimientos rápidos



Cuando tenemos un desvanecimiento, la relación señal a ruido (S/N) disminuye y aumenta la probabilidad de error. Esta probabilidad de error depende de la modulación, el tipo de canal, la diversidad y el S/N . Por ejemplo, con

modulación MSK y canal Rayleigh, la probabilidad de error es determinada por la siguiente expresión:

$$\text{prob}\{error\} = \frac{1}{2 \cdot S/N}$$

mientras que con modulación MSK y canal Rayleigh pero con diversidad MRC de orden 2 (dos antenas), la expresión es:

$$\text{prob}\{error\} = \frac{3}{4 \cdot (S/N)^2}$$

Ejemplo

En un sistema MSK sin diversidad afectado por desvanecimientos Rayleigh en los que queremos que la probabilidad de error sea inferior a 10^{-3} , la relación señal/ruido mínima debe ser 500 (27 dB). En cambio, si añadimos diversidad MRC de orden 2, esta relación señal/ruido mínima ha de ser 27,38 (14,3 dB). Claramente, la diversidad nos permite trabajar en entornos más ruidosos.

5. Pérdidas de propagación en exteriores e interiores

Para evaluar estas pérdidas, podemos hacer la siguiente clasificación de los métodos existentes:

1) **Semiempíricos**: salen a partir de medidas y de razonamientos teóricos. Los más conocidos son:

a) **Espacio libre**: sólo considera la frecuencia y la distancia emisor-receptor. Es un método optimista.

b) **Tierra plana**: no considera la frecuencia, pero sí la altura de las antenas. Es un método pesimista. Tiene algunas versiones más sofisticadas:

- **Tierra plana + Egli**: como el de tierra plana, pero considera la frecuencia (este término dependiendo de la frecuencia es empírico).
- Cuando hay alguna arista en el camino, hay que añadir una atenuación suplementaria.
- Cuando hay más de una arista (entorno de montaña) hay diversos métodos para calcular la atenuación suplementaria (Bullington, Epstein y Peterson, Deygout, Picquernard). Estudiaremos este último.

2) **Empíricos**: salen a partir de medidas que se han hecho sobre el terreno. Algunos de ellos son:

- Lee
- Okumura-Hata
- COST 231
- Erceg
- ECC-33

Método optimista

Un método es optimista si, en general, la atenuación real es superior a la que da el método.

Método pesimista

Un método es pesimista si, en general, la atenuación real es inferior a la que da el método.

5.1. Propagación sobre espacio libre

Este método considera que la potencia recibida (P_R) depende de la potencia transmitida (P_T), de la ganancia del transmisor (G_T) y del receptor (G_R), de la distancia (d) y de la longitud de onda de la señal ($\lambda = c / f$).

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot (\lambda / (4 \cdot \pi \cdot d))^2$$

A continuación tenemos la fórmula en dB, donde $G_R[\text{dB}] = 10 \cdot \log G_R[\text{lin}]$.

$$P_R [\text{dBm}] = P_T [\text{dBm}] + G_T [\text{dB}] + G_R [\text{dB}] - 20 \cdot \log((4 \cdot \pi \cdot d) / \lambda)$$

5.2. Propagación sobre tierra plana

Este método considera el rayo directo más una reflexión en tierra. La potencia recibida es:

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot ((h_1 \cdot h_2) / d^2)^2$$

donde h_1 es la altura del transmisor, h_2 la altura del receptor y d la distancia que los separa.

El método es aplicable si la distancia entre emisor y receptor es mucho mayor que las alturas h_1 y h_2 .

Observamos que:

- La atenuación crece con d^4 .
- Doblar la altura de la base (o el móvil) supone aumentar la potencia recibida en $10 \cdot \log(2^2) = 6$ dB.

La dependencia de la frecuencia (f) se puede considerar según el **modelo de Egli** (empírico):

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot ((h_1 \cdot h_2) / d^2)^2 \cdot (40 / f[\text{MHz}])^2$$

Observamos que, cuanto más frecuencia, menos potencia recibida (o sea, más pérdidas).

Expresado en dB,

$$P_R[\text{dBm}] = P_T[\text{dBm}] + G_T[\text{dB}] + G_R[\text{dB}] + 20 \cdot \log(h_1[m] \cdot h_2[m]) - 40 \cdot \log(d[m]) + 20 \cdot \log(40 / f[\text{MHz}])$$

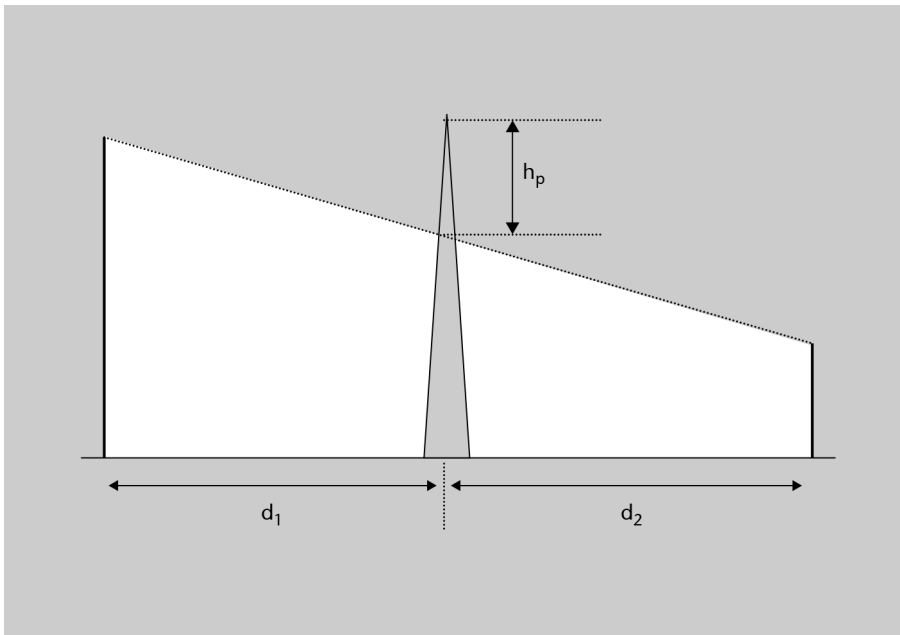
Si en el camino hay alguna arista, habrá que añadir una atenuación suplementaria (J). Para hacerlo, hay que evaluar el siguiente parámetro:

$$v = -\sqrt{2} \cdot \frac{h_p}{r_1}$$

donde h_p se muestra en la figura siguiente y r_1 es el radio de la primera zona de Fresnel, que podemos calcular como:

$$r_1 = \sqrt{\lambda \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}$$

Efecto de las aristas en una trayectoria



En función de ν añadiremos una de las siguientes atenuaciones (observamos que **no se añade atenuación** si $1 \leq \nu$ ($h_p < -0,7r_1$), es decir, **cuando queda libre el 70% del radio de la primera zona de Fresnel**):

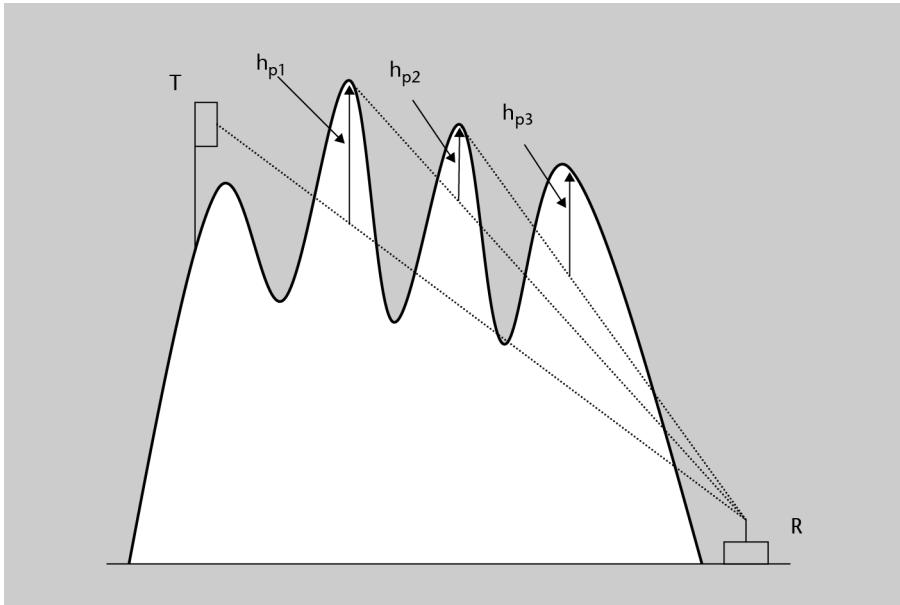
$1 \leq \nu$	$J = 0 \text{ dB}$
$0 \leq \nu \leq 1$	$J = 20 \cdot \log(0,5 + 0,62 \cdot \nu)$
$-1 \leq \nu \leq 0$	$J = 20 \cdot \log(0,5 \cdot e^{0,95\nu})$
$-2,4 \leq \nu \leq -1$	$J = 20 \cdot \log\left(0,4 - \sqrt{0,1 - (0,1\nu + 0,4)^2}\right)$
$\nu \leq -2,4$	$J = 20 \cdot \log(-0,225/\nu)$

Cuando hay más de una arista en el camino, no podemos aplicar directamente el método anterior. Eso es lo que sucede si decidimos colocar una estación base en un punto de un mapa topográfico y ver cuál es el nivel que recibiría un móvil en cualquier dirección alrededor y a diferentes distancias. A continuación se comentará el **método de Picquernard**, que es el que da mejores resultados. Para hacerlo, se parte de un perfil rectificado (si cogemos un mapa y miramos los obstáculos entre dos puntos, seguro que habrá pequeñas elevaciones que podemos promediar) para tener múltiples aristas pero tampoco un número excesivo.

Se trata de ir sumando las contribuciones en la pérdida en dB de cada uno de los obstáculos que hay entre emisor y receptor, tal como se muestra en la figu-

ra siguiente. Así, la pérdida debida a los obstáculos será la pérdida debida al obstáculo 1 (considerando h_{p1}) más la pérdida debida al obstáculo 2 (considerando h_{p2}) más la pérdida debida al obstáculo 3 (considerando h_{p3}).

Método de Picquernard



Ejemplo 1

Sea un sistema con visibilidad donde la potencia de transmisión es $P_T = 40$ dBm, la ganancia de transmisor y receptor es $G_T = G_R = 3$ dB, la altura del transmisor es $h_T = 100$ m, la del receptor $h_R = 2$ m, la distancia emisor-receptor es $d = 50$ km y la frecuencia es $f = 400$ MHz. Calculad:

a) Potencia recibida en espacio libre:

$$P_R[\text{dBm}] = P_T[\text{dBm}] + G_T[\text{dB}] + G_R[\text{dB}] - 20 \cdot \log((4 \cdot \pi \cdot d) / \lambda) = 40 + 3 + 3 - 118,46 = -72,46 \text{ dBm} \text{ (es optimista, ya que en la práctica la potencia recibida es menor)}$$

b) Potencia recibida en tierra plana:

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot ((h_1 \cdot h_2) / d^2)^2 = 40 + 3 + 3 - 142 = -96 \text{ dBm}$$

c) Potencia recibida en tierra plana + Egli:

$$P_R = P_{\text{tierra plana}} + 20 \cdot \log(40 / f[\text{MHz}]) = -96 - 20 = -116 \text{ dBm}$$

d) Suponiendo tierra plana + Egli, ¿cuál es la cobertura si la sensibilidad de los equipos es de -110 dBm?

$$46 + 10 \cdot \log(100 \cdot 2 / d^2) - 20 = -110 \Rightarrow d = 35 \text{ km (en realidad la } \sigma \text{ del terreno la reducirá)}$$

Ejemplo 2

Un emisor y un receptor están separados 10,5 km. Hay un obstáculo a 6 km de la base y 4,5 km del móvil y la altura del obstáculo por encima de la recta que une las antenas es de 30 m. Si la potencia de transmisión es $P_T = 40$ dBm, la ganancia de emisor y receptor es $G_T = G_R = 3$ dB y la frecuencia es $f = 400$ MHz, calculad la potencia recibida, suponiendo espacio libre.

$$r_1 = \sqrt{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2 / (d_1 + d_2)} = 44;$$

$$-\sqrt{2} \cdot (h_p / r_1) = -0,966;$$

$$J = -13,97 \text{ dB}$$

$$\begin{aligned} \text{Espacio libre: } P_R[\text{dBm}] &= P_T[\text{dBm}] + G_T[\text{dB}] + G_R[\text{dB}] - 20 \cdot \log((4 \cdot \pi \cdot d) / \lambda) = \\ &= 40 + 3 + 3 - 105 = -58,9 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\text{Potencia recibida} = -58,9 - 13,97 = -72,87 \text{ dBm}$$

5.3. Modelo de Lee

Éste es un modelo americano, que se ha sofisticado más de lo que aquí se presenta. Es válido entre 30-2.000 MHz y para distancias base-móvil entre 2-30 km. Como veremos en las expresiones, es totalmente empírico:

Para medio suburbano, la potencia recibida se calcula como

$$P_R[\text{dBm}] = -61,7 - 38,4 \log(d / 1,6) - 20 \log(f / 900) + \alpha_0$$

$$\text{Para medio urbano, } P_R[\text{dBm}] = -70 - 36,8 \log(d / 1,6) - 30 \log(f / 900) + \alpha_0$$

donde d es la distancia móvil-base [km], f es la frecuencia [MHz] y α_0 es el factor de corrección.

Este modelo se hizo con el siguiente entorno: altura del transmisor $h_t = 30,5$ m, altura del receptor $h_r = 3$ m, potencia del transmisor $P_t = 10$ W y ganancia de las antenas $G_t = 6$ dB [4 en escala lineal] y $G_r = 0$ dB [ganancia unidad en escala lineal]. El factor α_0 sirve para que el método sea aplicable a otras condiciones. Así, si alguno de estos valores es diferente, hay que considerar α_0 .

$$\alpha_0 = 10 \cdot \log(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5)$$

donde $\alpha_1 = (h_t / 30,5)^2$, $\alpha_2 = (h_r / 3)^n$ ($n = 2$ si $h_r > 10$ m ; $n = 1$ si $h_r < 3$ m), $\alpha_3 = P_t / 10$, $\alpha_4 = G_t[\text{lin}] / 4$ y $\alpha_5 = G_r[\text{lin}] / 1$

Recordemos...

... que la conversión de unidades lineales a dB se hace calculando el logaritmo de la unidad lineal y multiplicando por 10.

5.4. Modelo de Okumura-Hata

Inicialmente es de aplicación sólo en zonas urbanas, ya que las medidas del método se hicieron en Tokio. Nos da las pérdidas de propagación totales en función del entorno. Después se extendió a zonas suburbanas y rurales (parámetros C y D).

Okumura hizo medidas y expresó los resultados en unas tablas. Más tarde, Hata encontró unas fórmulas concordantes con las gráficas de Okumura.

- Limitaciones:

- f (frecuencia): entre 150 y 1.500 MHz.

- h_t (altura efectiva del transmisor): entre 30 y 200 m (una versión posterior lo hace llegar a 1.000 m). Nosotros supondremos que esta altura es la del centro de radiación de la antena.
- h_m (altura del móvil sobre el suelo): entre 1 y 10 m.
- d (distancia transmisor-móvil): entre 1 y 20 km (una versión posterior lo hace llegar a 100 km).

Para calcular las pérdidas de propagación (L) utilizamos las siguientes fórmulas (en todas las expresiones f se expresa en MHz, d en km y h_t y h_m en metros):

$$L[\text{dB}] = A + B \cdot \log(d) \quad \text{en medio urbano}$$

$$L[\text{dB}] = A + B \cdot \log(d) - C_{\text{en medio suburbano}}$$

$$L[\text{dB}] = A + B \cdot \log(d) - D \quad \text{en medio rural}$$

donde

$$A = 69,55 + 26,16 \cdot \log(f) - 13,82 \cdot \log(h_t) - a(h_m)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \cdot \log(h_t)$$

$$C = 2 \cdot (\log(f / 28))^2 + 5,4$$

$$D = 4,78 \cdot (\log(f))^2 - 18,33 \cdot \log(f) + 40,94$$

El parámetro $a(h_m)$ tiene expresiones diferentes dependiendo del tamaño de la ciudad y de la frecuencia:

$$a(h_m) = [1,1 \cdot \log(f) - 0,7] \cdot h_m - [1,56 \cdot \log(f) - 0,8] \text{ en ciudades pequeñas-medias}$$

$$a(h_m) = 8,28 \cdot [\log(1,54 \cdot h_m)]^2 - 1,1 \text{ en ciudades grandes y para } f < 200 \text{ MHz}$$

$$a(h_m) = 3,2 \cdot [\log(11,75 \cdot h_m)]^2 - 4,97 \text{ en ciudades grandes y para } f > 400 \text{ MHz}$$

Para poder prever las pérdidas en sistemas en 1.800 MHz, tenemos el método COST 231 - Hata, aplicable entre 1.500 MHz y 2.000 MHz. La pérdida es:

$$L[\text{dB}] = 46,3 + 33,9 \cdot \log(f) - 13,82 \cdot \log(h_t) - a(h_m) \\ + (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_t)) \cdot \log(d) + C_m$$

donde $C_m = 0$ dB para ciudades medianas o 3 dB para ciudades muy densas.

5.5. Modelo COST 231

Este modelo se basa en los modelos japoneses de Walfish e Ikegami. Las ventajas con respecto al modelo de Okumura-Hata son:

- Servirá también para $f = 1,8$ GHz.
- Se han hecho medidas en ciudades europeas, considerando la arquitectura propia (no la japonesa).
- Sirve para microcélulas.

Microcélula

Una microcélula es una célula con un radio pequeño (poca cobertura).

– Margen de validez:

Altura de la base (h_b) entre 4 y 50 m.

Altura del móvil (h_m) entre 1 y 3 m.

Distancia móvil-base (d) entre 0,02 y 5 km.

Frecuencia (f) entre 800 y 2.000 MHz.

– Otros parámetros (ver la figura siguiente):

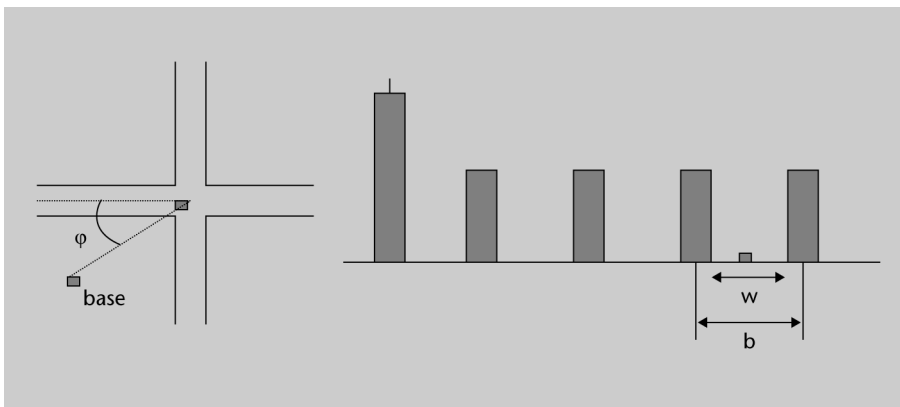
h_r : altura media de los edificios.

w : anchura de la calle donde está el móvil.

φ : ángulo rayo – eje de la calle.

b : anchura entre centros de edificios.

Modelo COST 231 para exteriores



En caso de no conocer algunos de estos valores, se pueden usar los siguientes:
 b entre 20 y 50 m; $w = b / 2$; $\varphi = 90^\circ$; 3 m de altura por piso.

Definimos:

Δh_b : altura de la base con respecto a la altura media de los edificios limítrofes ($h_b - h_r$) (puede ser negativo).

Δh_r : altura media de los edificios sobre la altura de la antena móvil ($h_r - h_m$).

Para calcular las pérdidas de propagación (L) utilizamos las siguientes fórmulas (h_b y h_m en metros, d en km y f en MHz):

$$L = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd}$$

La atenuación total puede considerarse la suma de tres efectos: L_{bf} es la atenuación debida a la distancia; L_{rts} es debida a las difracciones cerca del receptor; L_{msd} es debida a las difracciones que se producen en las proximidades del receptor.

$$L_{bf} = 32,45 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(d)$$

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \cdot \log(w) + 10 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(\Delta h_r) + L_{ori}$$

$$\begin{aligned} L_{ori} &= -10 + 0,3571 \cdot \varphi \quad 0^\circ < \varphi < 35^\circ \\ &= 2,5 + 0,075 \cdot (\varphi - 35^\circ) \quad 35^\circ < \varphi < 55^\circ \\ &= 4 - 0,114 \cdot (\varphi - 55^\circ) \quad 55^\circ < \varphi < 90^\circ \end{aligned}$$

Si $L_{rts} < 0$, se toma $L_{rts} = 0$

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \cdot \log(d) + K_f \cdot \log(f) - 9 \cdot \log(b)$$

$L_{bsh} = -18 \cdot \log(1 + \Delta h_b)$ Si $\Delta h_b < 0$, entonces se toma $L_{bsh} = 0$

$$\begin{aligned} K_a &= 54 & \Delta h_b > 0 \\ &= 54 - 0,8 \cdot \Delta h_b & \Delta h_b < 0 \text{ y } d > 0,5 \\ &= 54 - 0,8 \cdot \Delta h_b \cdot d / 0,5 & \Delta h_b < 0 \text{ y } d < 0,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_d &= 18 & \Delta h_b > 0 \\ &= 18 - 15 \cdot (\Delta h_b) / h_r & \Delta h_b < 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_f &= -4 + 0,7 \cdot (f / 925 - 1) \text{ en ciudades medianas} \\ &= -4 + 1,5 \cdot (f / 925 - 1) \text{ en ciudades grandes} \end{aligned}$$

Ejemplo

Calcular las pérdidas emisor-receptor para un medio urbano denso con $f = 900$ MHz, $d = 1,5$ km, $h_b = 30$ m, $h_r = 20$ m, $\varphi = 37^\circ$, $w = 20$ m, $h_m = 1,5$ m, $b = 40$ m.

$$\begin{aligned} \Delta h_b &= h_b - h_r = 10 \text{ m} \\ \Delta h_r &= h_r - h_m = 18,5 \text{ m} \end{aligned}$$

distancia:

$$\begin{aligned} L_{bf} &= 32,45 + 20 \cdot \log(900) + 20 \cdot \log(1,5) = 95,06 \text{ dB} \\ L_{ori} &= 2,5 + 0,075 \cdot (37 - 35) = 2,65 \end{aligned}$$

difracción receptor:

$$\begin{aligned} L_{rts} &= -16,9 - 10 \cdot \log(20) + 10 \cdot \log(900) + 20 \cdot \log(18,5) + 2,65 = 27,63 \text{ dB} \\ L_{bsh} &= -18 \cdot \log(1 + 10) = -18,74 \\ K_a &= 54; K_d = 18; K_f = -4 + 1,5 \cdot (900 / 925 - 1) = -4,04 \end{aligned}$$

difracción antes receptor:

$$L_{msd} = -18,74 + 54 + 18 \cdot \log(1,5) - 4,04 \cdot \log(900) - 9 \cdot \log(40) = 12,08 \text{ dB}$$

Las pérdidas totales son: $L = 95,06 + 27,63 + 12,08 = 134,77$ dB

El modelo COST 231 también tiene una versión aplicable al **interior de edificios**, que se presenta a continuación:

Modelo de primer orden

En espacio libre, $P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot (\lambda / (4\pi \cdot d))^2 = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot (\lambda / (4\pi \cdot 1))^2 \cdot (1 / d^2)$.

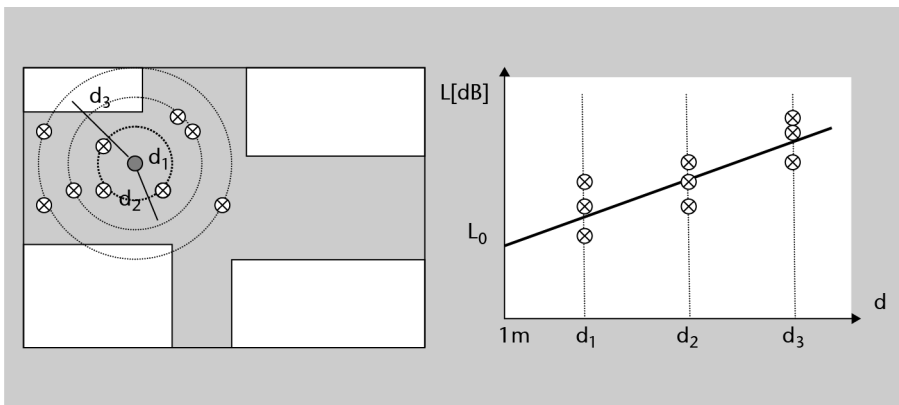
Pérdidas en espacio libre: $L_{el}[\text{dB}] = L_{o,el}[\text{dB}] + 20 \cdot \log(d)$,

donde $L_{o,el}$ son las pérdidas a 1 metro de distancia $(4\pi / \lambda)^2$.

Si para cada distancia medimos la pérdida en unos cuantos puntos, podremos encontrar una recta de regresión de la forma:

$L[\text{dB}] = L_0[\text{dB}] + 10 \cdot n \cdot \log(d)$, tal como vemos en la figura siguiente.

Modelo COST 231 de primer orden



Experimentalmente se ha visto que:

- En grandes salas L_0 es similar a la atenuación de espacio libre a 1 metro.
- En pasillos, L_0 es unos 10 dB inferior a la de espacio libre.
- n vale 1...2 en entornos con visibilidad directa;
3...4 para medidas en la misma planta;
6...7 incluyen medidas en varios pisos.

Observación

El modelo de primer orden es muy recomendable en lugares abiertos (salas, pasillos...) pero no en otros, porque hace una media del efecto de las paredes.

Modelo de segundo orden

Este modelo incluye las atenuaciones de las paredes y techos que cruzamos, sin hacer una media directa:

$$L[\text{dB}] = L_0[\text{dB}] + 20 \cdot \log(d) + \sum_{i=1}^J K_{ji} \cdot L_{ji} + \sum_{j=1}^J K_{wj} \cdot L_{wj}$$

donde:

$$L_0[\text{dB}] = 20 \cdot \log(4\pi / \lambda)$$

J : número de tipos diferentes de paredes.

I : número de tipos diferentes de techo (metal, hormigón...).

L_{ji} : factor de atenuación para el techo de tipo i .

K_{ji} : número de pisos atravesados de tipo i .

L_{wj} : factor de atenuación de la pared de tipo j .

K_{wj} : número de paredes atravesadas de tipo j .

Una tabla muy simple que se utiliza para los factores de atenuación es:

	Atenuación
pared delgada (Pladur)	2 dB
pared gruesa (ladrillo)	13,5 dB
techo (cemento armado)	20-23 dB

Atenuación

Cuando un edificio genera poco tráfico, se suele poner la base fuera del edificio. Entonces, además, debe considerarse la atenuación de las paredes maestras (hay tablas en libros).

Ejemplo 1

Tenemos un sistema de comunicaciones móviles en una ciudad grande que trabaja a $f = 900$ MHz y transmite una potencia $P_t = 25$ W desde una altura $h_t = 100$ m. La sensibilidad del receptor es de -110 dBm y está a una altura de $h_m = 1$ m. La propagación es log-normal con parámetro $\sigma = 10$ dB. Se pide determinar el radio de la zona de cobertura para que el 90% de los emplazamientos reciba correctamente. Emplead el método Okumura-Hata.

Respuesta:

Para que la recepción sea correcta, la potencia recibida (P) debe ser superior a la sensibilidad (P_u)

$$prob\{P \geq P_u\} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot erf\left(\frac{P_u - P}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right) = 0,9 \text{ (90\% de los emplazamientos)}$$

$$0,9 = 0,5 - 0,5 \cdot erf\left(\frac{(P_u - P)}{(\sqrt{2} \cdot \sigma)}\right) \Rightarrow erf\left(\frac{(P_u - P)}{(\sqrt{2} \cdot \sigma)}\right) = -0,8$$

Como $erf(x) = -erf(-x)$, $erf\left(\frac{(P - P_u)}{(\sqrt{2} \cdot \sigma)}\right) = 0,8$ donde σ ya está en dB

Mirando la tabla, $\frac{(P - P_u)}{(\sqrt{2} \cdot \sigma)} = 0,9$

$$\frac{p[\text{dBm}] - p_u[\text{dBm}]}{\sqrt{2} \cdot \sigma[\text{dB}]} = 0,9$$

$$p[\text{dBm}] = 0,9 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma[\text{dB}] + p_u[\text{dBm}] = 0,9 \cdot \sqrt{2} \cdot 10 - 110 = -97,27 \text{ dBm}$$

Suponiendo $G_t = G_r = 0$ dB, $P[\text{dBm}] = P_t[\text{dBm}] + G_t + G_r - L_p$

$$L_p = 120,49 + 31,8 \cdot \log(d) \text{ (pérdidas de propagación)}$$

$$25 \text{ W} = 10 \cdot \log(25.000) \text{ dBm} = 43,97 \text{ dBm}$$

$$-97,27 > 43,97 - 120,49 - 31,8 \cdot \log(d)$$

$$31,8 \cdot \log(d) > 20,75 \Rightarrow d = 10^{20,75 / 31,8} = 4,5 \text{ km}$$

Ejemplo 2

Tenemos un sistema de comunicaciones de interior, en el que la base y el móvil están separados por dos paredes de hormigón (atenuación de 10 dB cada una) y por dos paredes de ladrillo (4 dB cada una). Se quiere utilizar el método COST 231 y sabemos que $L_0 = 37,5$ dB y que la pendiente de las pérdidas de propagación con la distancia es 2. También sabemos que la sensibilidad del móvil es de -102 dBm. Se pide:

a) La potencia media en el móvil que garantiza que el 99% del tiempo la potencia recibida está por encima del umbral. Suponer estadística log-normal con $\sigma = 6$ dB.

b) La potencia del emisor si se usan antenas con ganancia 1,5 dB y la distancia base-móvil es de 8 m.

Respuesta:

$$\text{a) } 0,99 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{P_u - P_r}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right)$$

$$\operatorname{erf}\left(\frac{P_u - P_r}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right) = -0,98 \Rightarrow \operatorname{erf}\left(\frac{P_r - P_u}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right) = 0,98$$

$$(P_r - P_u) / (\sqrt{2} \cdot \sigma) = 1,64 \Rightarrow P_r = \sqrt{2} \cdot 1,64 \cdot 6 - 102 = -88,1 \text{ dBm}$$

$$\text{b) } P_t[\text{dBm}] = P_r[\text{dBm}] - G_t - G_r + L_p = -88,1 - 6 + L_p$$

$$L_p = L_0 + 20 \cdot \log(d) + 2 \cdot 10 + 2 \cdot 4$$

$$P_t = -88,1 - 3 + 37,5 + 20 \cdot \log(8) + 20 + 8 = -7,53 \text{ dBm}$$

5.6. Model Erceg

Este es un método del año 1999 que trabaja con canales de la Stanford University (canales SUI-1 y SUI-2 para terrenos planos, SUI-3 y SUI-4 para terrenos con algunos obstáculos y SUI-5 y SUI-6 para lugares con muchos obstáculos y vegetación frondosa).

Está pensado para frecuencias inferiores a 11 GHz (por lo tanto, útiles para el sistema WiMAX, explicado en el módulo “Redes locales y metropolitanas sin hilos”). Es válido para medios rurales, suburbanos y urbanos y para alturas de móvil (h_m) entre 2 y 10 m, alturas de base (h_b) entre 10 y 80 m y distancias entre 100 m y 8 km.

$$L[\text{dB}] = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 100}{\lambda}\right) + 10 \cdot \left(a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b}\right) \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 6 \cdot \log\left(\frac{f}{2.000}\right) + X_h + s$$

$$X_h = \begin{cases} -10,8 \cdot \log\left(\frac{h_m}{2}\right) & \text{para entornos A y B} \\ -20 \cdot \log\left(\frac{h_m}{2}\right) & \text{para entornos C} \end{cases}$$

donde d está en metros, f en MHz y h_b y h_m en metros.

a , b , c y s dependen del tipo de entorno según la tabla siguiente:

	a	b	c	s
Medio A (canales SUI-5 y SUI-6)	4,6	0,0075	12,6	10,6
Medio B (canales SUI-3 y SUI-4)	4	0,0065	17,1	9,6
Medio C (canales SUI-1 y SUI-2)	3,6	0,005	20	8,2

Ejemplo 1

Calculad las pérdidas entre dos puntos separados 1 km usando el método Erceg para un caso donde la frecuencia es 3,5 GHz, la altura de base es 30 metros y la altura del móvil es 2 metros. Suponed un canal de tipo SUI-3.

Respuesta:

Para un canal SUI-3,

$$L[\text{dB}] = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 100}{\lambda}\right) + 10 \cdot \left(4 - 0,0065 \cdot h_b + \frac{17}{h_b}\right) \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 6 \cdot \log\left(\frac{f}{2.000}\right) + X_h + 9,6$$

$$X_h = -10,8 \cdot \log\left(\frac{h_m}{2}\right)$$

donde d está en metros, f en MHz y h_b y h_m en metros.

Es decir,

$$L = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 100}{0,0857}\right) + 10 \cdot \left(4 - 0,0065 \cdot 30 + \frac{17}{30}\right) \cdot \log\left(\frac{1.000}{100}\right) + 6 \cdot \log\left(\frac{3.500}{2.000}\right) + 0 + 9,6 = 137,6 \text{ dB}$$

Ejemplo 2

En las condiciones del ejemplo 1, ¿a qué distancia máxima pueden estar el emisor y el receptor si las pérdidas no deben superar 110 dB?

Respuesta:

Ahora la incógnita es la distancia (d) y L es 110 dB.

$$110 = 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 100}{0,0857}\right) + 10 \cdot \left(4 - 0,0065 \cdot 30 + \frac{17}{30}\right) \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 6 \cdot \log\left(\frac{3.500}{2.000}\right) + 0 + 9,6$$

$$110 = 83,32 + 43,71 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 1,458 + 0 + 9,6$$

$$15,62 = 43,71 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right)$$

$$d = 228 \text{ metros}$$

5.7. Modelo ECC-33

Es un método del Electronic Communication Committee (año 2003), basado en Okumura-Hata.

Se ha comprobado su validez para frecuencias de 3,5 GHz. Está pensado para ciudades medianas.

$$L[\text{dB}] = A_{FS} + A_{BM} - G_T - G_R$$

$$A_{FS} = 92,4 + 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f)$$

$$A_{BM} = 20,41 + 9,83 \cdot \log(d) + 7,894 \cdot \log(f) + 9,56 \cdot [\log(f)]^2$$

$$G_T = \log\left(\frac{h_b}{200}\right) \cdot \left[13,958 + 5,8 \cdot (\log(d))^2\right]$$

$$G_R = [42,57 + 13,7 \cdot \log(f)] \cdot [\log(h_m) - 0,585]$$

donde d está en km, f en GHz, h_b (altura de la base) y h_m (altura del móvil) en metros.

Ejemplo

Un sistema sin hilos está trabajando en una ciudad a 3,5 GHz. La base está a 23 metros de altura y los terminales móviles a 1 metro de altura. Calculad la pérdida (en dB) con el método ECC-33 si la distancia entre la base y el móvil es de 500 metros.

Respuesta:

Aplicando las expresiones,

$$L[dB] = A_{FS} + A_{BM} - G_T - G_R = 97,26 + 24,57 + 13,60 + 29,26 = 164,69 \text{ dB}$$

Actividades

1. Antes de la implantación de un sistema celular de gran público, es muy importante hacer una esmerada planificación frecuencial. Así, debe preverse el tráfico que tiene que soportar la red, la calidad de servicio deseada, etc. Cuando ya disponemos de todos los datos, hay que utilizar un software de planificación frecuencial que asigne los canales a las estaciones base. Uno de los parámetros que debemos seleccionar es el modelo de propagación con el cual veremos que el software haga los cálculos. En este módulo se han comentado los métodos Okumura-Hata y COST 231, pero existen otros, generalmente más complicados.

El modelo COST 231 es una simplificación de uno de estos modelos más complicados: los modelos basados en rayos (modelos IRT). Este ejercicio pretende que os introduzcáis en este tema, y que habléis de los modelos IRT. Algunas de las cuestiones que debéis tratar son:

- ¿Qué son los modelos IRT? ¿En qué se basan?
- ¿Qué tipos de modelos IRT tenemos?
- ¿Qué ventajas tienen respecto a los modelos descritos en el módulo? ¿Qué inconvenientes?
- ¿Qué empresas hacen software de planificación que incorpore estos modelos?

Ejercicios de autoevaluación

1. En cierto entorno urbano, se utiliza sectorización de manera que en cada estación base se definen tres sectores de 120°. Con objeto de poder tener más usuarios, se plantea la posibilidad de hacer una sectorización en seis sectores de 60°. Indicad cuáles son los posibles problemas que deberemos prever antes de proceder a este cambio de sectorización.

2. Las siguientes fórmulas corresponden a la probabilidad de error debida a los desvanecimientos rápidos en un sistema OQPSK cuando el canal es Rayleigh. Razonad cuál de las fórmulas es válida cuando utilizamos diversidad por selección y cuál cuando la diversidad es de tipo MRC.

$$p\{\text{error}\} = \frac{3}{2 \cdot \left(\frac{S}{N}\right)^2} \qquad p\{\text{error}\} = \frac{3}{4 \cdot \left(\frac{S}{N}\right)^2}$$

3. Normalmente la diversidad en espacio se aplica sólo en el enlace ascendente (*uplink*). ¿Por qué? Poned algún ejemplo.

4. Un canal tipo Rice queda parametrizado por el valor K , que representa el cociente entre la potencia del camino dominante y la potencia de los caminos no directos. Dibujad la función de densidad de la atenuación de un canal Rice de $K = 0$ y de un canal Rice de $K = 20$ (las dos en un mismo dibujo). Justificad la respuesta.

5. Tenemos un emisor que emite 10 W y funciona a 900 MHz y con el método de espacio libre hemos calculado que en una determinada dirección su señal llega a una distancia de 20 km. Si queremos cambiar la frecuencia a 1.800 MHz, ¿qué distancia cubrirá el enlace? Razonad la respuesta.

6. El parámetro σ se utiliza para caracterizar los desvanecimientos lentos de un determinado medio. ¿Qué medio es más complicado de tratar: un medio con σ grande o un medio con σ pequeño? Razonad la respuesta.

7. Una base que emite 100 W está dando cobertura a una región donde se ha calculado con el método de Lee que entre el emisor y los extremos de la zona que debe cubrirse se pierden 130 dB. El medio es log-normal con parámetro $\sigma = 10 / \sqrt{2}$ dB y la sensibilidad de los terminales es de -90 dBm. ¿Cuál es el porcentaje de terminales que recibe correctamente?

8. En ciudades, los operadores suelen poner las estaciones base muy juntas, mientras que en terrenos rurales las suelen separar. Suponed un usuario que esté en la periferia de una célula rural y otro usuario que esté en la periferia de una célula urbana. ¿Cuál de ellos tendrá más o menos consumo de batería? Razonad la respuesta.

9. Tenemos un sistema celular que da servicio a una cierta zona caracterizada por un factor de propagación $\gamma = 2$. Dispone de antenas omnidireccionales y trabaja con siete células por clúster. Si ahora cambiamos las antenas omnidireccionales por antenas sectoriales de 120°, ¿con cuántas células por clúster tendremos que trabajar?

- 10.** La potencia media local en un punto del aire es una variable aleatoria del tipo log-normal. ¿Qué quiere decir eso? Explicadlo haciendo el dibujo de la función de densidad y comentando las diferencias con respecto a una variable aleatoria del tipo normal.
- 11.** Se dispone de un sistema que trabaja a 900 MHz. Se ha calculado con el método de tierra plana + Egli que la potencia recibida en cierto punto es de -105 dBm. Si cambiamos la frecuencia a 1.800 MHz y doblamos la altura del transmisor, ¿cuál es ahora la potencia recibida en el receptor?
- 12.** Un transmisor de 0,1 mW de potencia está conectado a una antena de 3 dB de ganancia. ¿Cuántos dBm transmite la antena?
- 13.** Un sistema móvil de interiores se ha dimensionado con el método COST 231 de segundo orden. Si queremos cambiar el sistema por otro basado en una tecnología que funciona a una frecuencia doble, ¿por qué factor tendríamos que multiplicar la potencia de los transmisores para que el sistema siguiera funcionando sin mover los transmisores de lugar? Razonadlo.
- 14.** Se utiliza el método COST 231 de segundo orden para calcular las pérdidas en una nave industrial muy grande que sólo tiene una planta (planta baja) y no tiene paredes interiores. Suponed que entre dos puntos separados una distancia d existe una pérdida de L dB. ¿Cuántos dB aumenta la pérdida si multiplicamos la distancia por 10?

Solucionario

1. Si hacemos muchos sectores, tendremos que ver si económicamente nos compensa (hace falta poner más antenas y modificar los equipos) y sobre todo deberemos asegurar que podremos gestionar la mayor cantidad de traspasos que tendremos porque los móviles de una célula van cambiando de sector.

2. La diversidad MRC es la más compleja, pero la que da mejores resultados. Si observamos las dos expresiones, la primera siempre es mayor que la segunda. La más pequeña (la que tiene menos probabilidad de error) será la del caso MRC. Por lo tanto, la primera fórmula es para el caso de selección y la segunda para el caso MRC.

3. El enlace ascendente es el que va de los elementos móviles del sistema hacia las estaciones base. Así, las bases tienen más de una antena para recibir. El motivo es que los terminales tienen la potencia de emisión limitada (por normativa y por autonomía de baterías) y las señales que llegan a la base son de nivel bajo. En el enlace descendente las bases no tienen el problema del suministro de energía y la diversidad del enlace ascendente se hace más necesaria que la del enlace descendente (*downlink*). Eso se ve en el caso del sistema GSM, donde las bases tienen más de una antena para recibir pero los terminales tienen sólo una. Otro motivo es que la duplicidad de antenas no tiene sentido cuando el elemento está en movimiento, ya que en este caso la diversidad de espacio ya la da el movimiento. Si el elemento está quieto (estaciones base), la diversidad en espacio la proporcionan las antenas. Finalmente también existe un problema de dimensiones. A las frecuencias a las que funciona GSM, la separación entre antenas para tener una diversidad en espacio efectiva es grande para un terminal móvil.

4. El parámetro K representa el cociente entre la potencia del camino dominante y la potencia de los caminos no directos. Si $K = 0$, eso quiere decir que no hay camino dominante y la propagación se debe a reflexiones (eso es un canal Rayleigh). En cambio, si $K = 20$, el efecto de los caminos no directos es pequeño y el canal se parecerá bastante a un canal gaussiano, donde las pérdidas son mucho más previsible que en un Rayleigh. El gráfico que nos piden se corresponde con la figura del apartado 4.

5. El método de espacio libre considera que las pérdidas del medio se deben a la frecuencia y a la distancia (pérdidas = $(\lambda / 4\pi d)^2$). Como $\lambda = c / f$, observamos que las pérdidas dependen inversamente del cuadrado del producto $d \cdot f$. Según eso, si queremos mantener las pérdidas del enlace, este producto debe mantenerse constante: si se dobla la frecuencia, la distancia debe dividirse entre dos. En nuestro caso, el enlace llegará a 10 km.

6. La σ representa la dispersión de la atenuación que genera el medio. Si su valor es grande, la dispersión es grande, y es difícil predecir cuántos dB de pérdida tendremos. En cambio, si su valor es pequeño, la dispersión es pequeña, y la potencia que tendremos será fácil de predecir y similar a la teórica. Así, un medio con una σ grande es más complicado de tratar (la atenuación es menos previsible).

7. El transmisor emite 100 W (20 dB = 50 dBm). Como las pérdidas son de 130 dB, en los receptores llegan 50 - 130 = -80 dBm. Ahora ya podemos utilizar la expresión que relaciona la sensibilidad, la potencia media, el medio y la cobertura:

$$\text{porcentaje} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{-90 - (-80)}{\sqrt{2} \cdot \frac{10}{\sqrt{2}}} \right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erf}(-1) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot 0,842 = 0,921 (92\%)$$

8. El consumo será el mismo, porque en todos los casos, en los extremos de la zona de cobertura el móvil siempre debe emitir al máximo de potencia. Por ello en medios rurales las bases están más separadas (porque hay menos pérdidas), mientras que en medios urbanos las bases están más próximas (las células tienen menos radio).

9. Al sectorizar a 120°, la fórmula del C / I tiene un 2 en el denominador (y no un 6). Observamos que para mantener la misma C / I , el término $(D / R)^2$ debe ser tres veces menor (el efecto de que el 6 del denominador ahora sea un 2).

Como $N = (1 / 3) \square (D / R)^2$, la nueva N será la N antigua dividida entre 3. Así, $7 / 3 = 2,3$. Para encontrar la N hay que buscar el número róbico superior, que es $N = 3$.

10. $f(p)$ es log-normal porque la potencia (p), representada en el eje horizontal, está expresada en escala logarítmica (en dB). En una gráfica normal, la escala no serían dB sino unidades lineales (por ejemplo, watts). El gráfico que nos piden se corresponde con la primera figura del apartado 4.

11. Si observamos la fórmula, vemos que la potencia recibida es directamente proporcional al cuadrado de la altura del transmisor e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Como estamos doblando tanto la altura del transmisor como la frecuencia, se compensan entre sí, de manera tal que la potencia recibida es la misma: -105 dBm.

12. $0,1$ mW son 10 dB por debajo de 1 mW (o sea, -10 dBm). Si le sumamos los 3 dB de la antena, la potencia que transmite la antena son $-10 + 3 = -7$ dBm.

13. En el COST 231 de segundo orden, la frecuencia está dentro del parámetro L_0 . Recordamos que L_0 es la atenuación en espacio libre a 1 metro, dada por la expresión $L_0 = (4\pi/\lambda)^2$ (en lineal). Doblar la frecuencia quiere decir multiplicar L_0 por 2^2 y, por lo tanto, habría que multiplicar la potencia de los transmisores por 4 .

14. En el COST 231 de segundo orden, la pérdida es la de espacio libre, añadiendo la pérdida de las paredes y/o techos. En espacio libre, la pérdida depende de la distancia según un factor $1/d^2$. Por lo tanto, si multiplicamos la distancia por 10 , la pérdida aumenta en $10 \log(10^2) = 20$ dB.

Glosario

AM *f* Modulación en amplitud.

AMPS *m* Sigla del primer sistema móvil celular americano.

CDMA *m* Acceso múltiple por división en código.

CEPT *f* Conferencia europea de administraciones de correos y telecomunicaciones. Es un organismo europeo que agrupa los reguladores de comunicaciones.

FDMA *m* Acceso múltiple por división en frecuencia.

FM *f* Modulación en frecuencia.

GPRS *m* Servicio de radio de paquetes. Es una evolución de la red GSM.

GSM *m* Estándar europeo de comunicaciones móviles de segunda generación.

HSDPA *m* Acceso de paquetes de alta velocidad en el enlace descendente. Es una evolución de la red UMTS.

IRT *m* Modelo de planificación frecuencial basado en rayos.

JDC *m* Sistema celular digital japonés.

MRC *f* Combinación de máxima ganancia (combinación óptima de señales).

MSK *f* Modulación de fase en cuadratura y de mínimo desplazamiento.

NLOS *f* Trayectoria entre dos puntos que no se ven entre ellos.

NMT *m* Estándar de telefonía móvil de primera generación de los países nórdicos.

OFDM *f* Multiplexación por división en frecuencias ortogonales.

OFDMA *m* Acceso múltiple por división en frecuencias ortogonales.

QPSK *f* Modulación de fase en cuadratura.

S/N, SNR *f* Relación señal-ruido.

TACS *m* Primer sistema móvil celular inglés.

TDMA *m* Acceso múltiple por división en tiempo.

UMTS *m* Estándar europeo de telefonía móvil de tercera generación.

Bibliografía

Huidobro, J. M. (2002). *Comunicaciones móviles*. Madrid: Paraninfo.

Sendín Escalona, A. (2004). *Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles*. Madrid: McGraw Hill.

Anexo

En este anexo tenemos una tabla de la función $\text{erf}(x)$, que nos será de utilidad para el cálculo de coberturas.

x	$\text{erf}(x)$	x	$\text{erf}(x)$	x	$\text{erf}(x)$
0.0000	0.0000	0.9200	0.8068	1.8400	0.9907
0.0200	0.0226	0.9400	0.8163	1.8600	0.9915
0.0400	0.0451	0.9600	0.8254	1.8800	0.9922
0.0600	0.0676	0.9800	0.8342	1.9000	0.9928
0.0800	0.0901	1.0000	0.8427	1.9200	0.9934
0.1000	0.1125	1.0200	0.8508	1.9400	0.9939
0.1200	0.1348	1.0400	0.8586	1.9600	0.9944
0.1400	0.1569	1.0600	0.8661	1.9800	0.9949
0.1600	0.1790	1.0800	0.8733	2.0000	0.9953
0.1800	0.2009	1.1000	0.8802	2.0200	0.9957
0.2000	0.2227	1.1200	0.8868	2.0400	0.9961
0.2200	0.2443	1.1400	0.8931	2.0600	0.9964
0.2400	0.2657	1.1600	0.8991	2.0800	0.9967
0.2600	0.2869	1.1800	0.9048	2.1000	0.9970
0.2800	0.3079	1.2000	0.9103	2.1200	0.9973
0.3000	0.3286	1.2200	0.9155	2.1400	0.9975
0.3200	0.3491	1.2400	0.9205	2.1600	0.9977
0.3400	0.3694	1.2600	0.9252	2.1800	0.9980
0.3600	0.3893	1.2800	0.9297	2.2000	0.9981
0.3800	0.4090	1.3000	0.9340	2.2200	0.9983
0.4000	0.4284	1.3200	0.9381	2.2400	0.9985
0.4200	0.4475	1.3400	0.9419	2.2600	0.9986
0.4400	0.4662	1.3600	0.9456	2.2800	0.9987
0.4600	0.4847	1.3800	0.9490	2.3000	0.9989
0.4800	0.5027	1.4000	0.9523	2.3200	0.9990
0.5000	0.5205	1.4200	0.9554	2.3400	0.9991
0.5200	0.5379	1.4400	0.9583	2.3600	0.9992
0.5400	0.5549	1.4600	0.9611	2.3800	0.9992
0.5600	0.5716	1.4800	0.9637	2.4000	0.9993
0.5800	0.5879	1.5000	0.9661	2.4200	0.9994
0.6000	0.6039	1.5200	0.9684	2.4400	0.9994
0.6200	0.6194	1.5400	0.9706	2.4600	0.9995
0.6400	0.6346	1.5600	0.9726	2.4800	0.9995
0.6600	0.6494	1.5800	0.9745	2.5000	0.9996
0.6800	0.6638	1.6000	0.9763	2.5200	0.9996
0.7000	0.6778	1.6200	0.9780	2.5400	0.9997
0.7200	0.6914	1.6400	0.9796	2.5600	0.9997
0.7400	0.7047	1.6600	0.9811	2.5800	0.9997
0.7600	0.7175	1.6800	0.9825	2.6000	0.9998
0.7800	0.7300	1.7000	0.9838	2.6200	0.9998
0.8000	0.7421	1.7200	0.9850	2.6400	0.9998
0.8200	0.7538	1.7400	0.9861	2.6600	0.9998
0.8400	0.7651	1.7600	0.9872	2.6800	0.9998
0.8600	0.7761	1.7800	0.9882	2.7000	0.9999
0.8800	0.7867	1.8000	0.9891	2.7200	0.9999
0.9000	0.7969	1.8200	0.9899	2.7400	0.9999

