

## Tema 3:    Sistemas de comunicaciones móviles

### Ejercicios y problemas

1. El transmisor de una estación base de un sistema de telefonía móvil celular digital tiene una potencia de 100 W. Se desea hallar el radio máximo de la celda para lograr una tasa de errores de  $10^{-3}$  en el 90 % de emplazamientos perimetrales durante el 90 % del tiempo. Considere que el campo varía aleatoriamente con una desviación típica de 2.5 tanto al variar los emplazamientos como al variar el tiempo.

**Datos del transmisor:** La velocidad binaria del sistema es 16 Kbps y la modulación empleada es GMSK. El sistema funciona en 900 MHz. La ganancia de la antena es de 12 dBi, siendo su altura efectiva de 150 m. Las pérdidas en los elementos pasivos son de 0.5 dB.

**Datos del receptor:** El receptor tiene una figura de ruido de 5 dB. Los terminales móviles pueden desplazarse a una velocidad tal que la frecuencia Doppler es de 40 Hz. La ganancia de la antena es de 13 dBi, y las pérdidas en los elementos pasivos son de 0.5 dB.

Calcule:

- a) La tensión mínima ( $\text{dB}\mu$ ) en la entrada del receptor para conseguir la tasa de errores deseada (sensibilidad del receptor).
- b) El campo mínimo necesario en el borde de la celda para lograr la tensión mínima del apartado anterior (sin variaciones estadísticas del campo).
- c) El campo mediano mínimo necesario, introduciendo las variaciones estadísticas en el campo mínimo del apartado anterior.
- d) La distancia máxima a la que se puede obtener el campo mediano del apartado anterior.

**Tabla 7.14.3**

| <i>Porcentaje P(%)</i> | <i>k(P)</i> |
|------------------------|-------------|
| 50                     | 0           |
| 75                     | 0,67        |
| 90                     | 1,28        |
| 95                     | 1,64        |

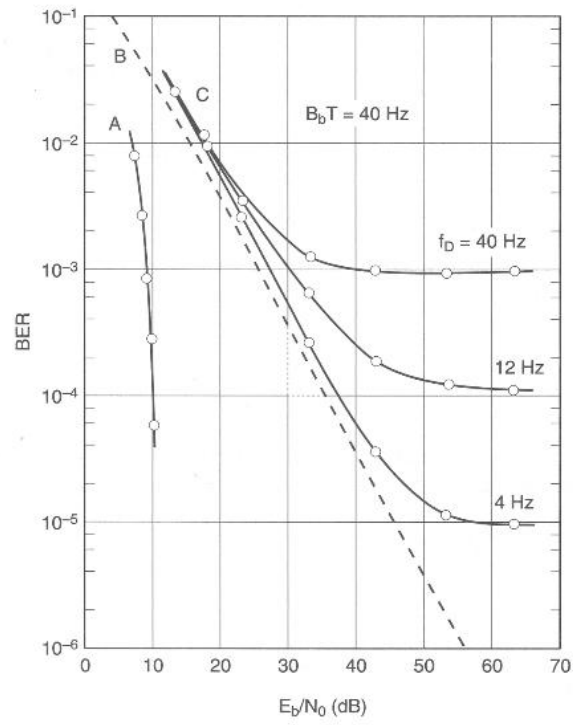


Figura 7.17.

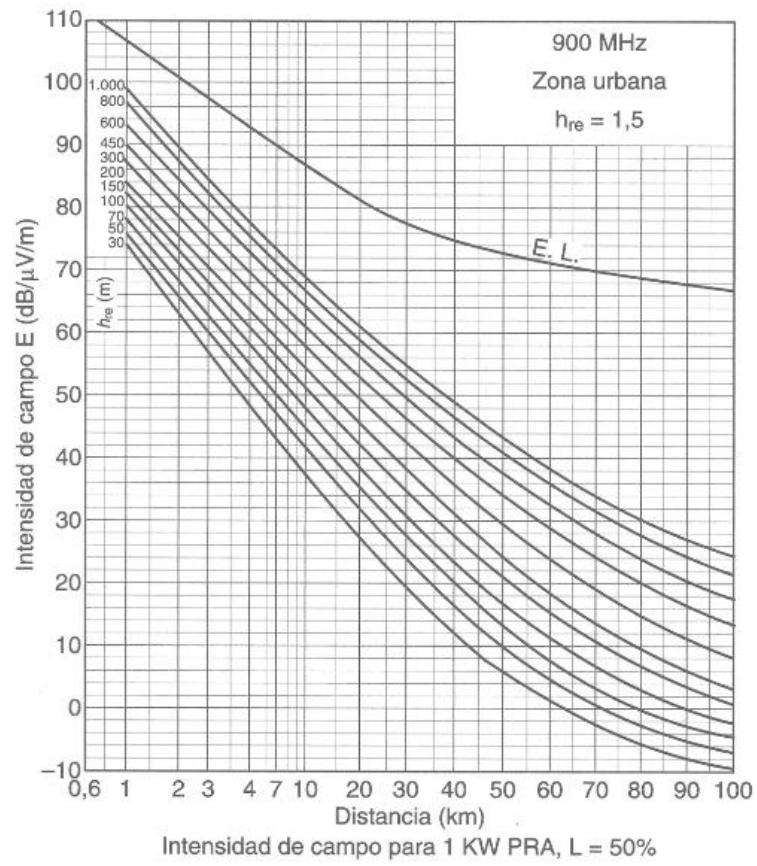


Figura 3.58.



2. En un sistema de telefonía móvil celular digital, el operador dispone de 105 frecuencias (pares de frecuencias ascendente-descendente). Se desea que la probabilidad de pérdida de una llamada sea del 2%. Se ha elegido un tamaño de cluster de 7 celdas, teniendo las celdas un radio de 5 Km. El tráfico ofrecido por cada terminal móvil es de 10 mE. La relación de protección umbral proporcionada por el fabricante para los receptores es de 7 dB. La propagación sigue una ley polinómica con exponente  $n = 4$ . La potencia del transmisor de la estación base se ha elegido de modo que el sistema tenga cobertura en el 95 % de los emplazamientos del anillo perimetral<sup>1</sup>, con una desviación típica de la intensidad de campo al variar dichos emplazamientos de 2.

Calcule:

- El tráfico por celda que el sistema es capaz de manejar con la probabilidad de pérdida especificada.
- La densidad superficial de terminales móviles que supone dicho tráfico.
- La distancia de reutilización que se deriva de la geometría del sistema.
- La viabilidad del sistema en cuanto a la interferencia entre estaciones base cocanal.

**Tabla 7.9.1**  
**FUNCIÓN ERLANG  $B = B(N, A)$**

| $N$ | 1,0%  | 1,5%  | 2%    | 3%    | 5%    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1   | .0101 | .0152 | .0204 | .0309 | .0526 |
| 2   | .153  | .190  | .223  | .282  | .381  |
| 3   | .455  | .535  | .602  | .715  | .899  |
| 4   | .869  | .992  | 1.09  | 1.26  | 1.52  |
| 5   | 1.36  | 1.52  | 1.66  | 1.88  | 2.22  |
| 6   | 1.91  | 2.11  | 2.28  | 2.54  | 2.96  |
| 7   | 2.50  | 2.74  | 2.94  | 3.25  | 3.74  |
| 8   | 3.13  | 3.40  | 3.63  | 3.99  | 4.54  |
| 9   | 3.78  | 4.09  | 4.34  | 4.75  | 5.37  |
| 10  | 4.46  | 4.81  | 5.08  | 5.53  | 6.22  |
| 11  | 5.16  | 5.54  | 5.84  | 6.33  | 7.08  |
| 12  | 5.88  | 6.29  | 6.61  | 7.14  | 7.95  |
| 13  | 6.61  | 7.05  | 7.40  | 7.97  | 8.83  |
| 14  | 7.35  | 7.82  | 8.20  | 8.80  | 9.73  |
| 15  | 8.11  | 8.61  | 9.01  | 9.65  | 10.6  |
| 16  | 8.88  | 9.41  | 9.83  | 10.5  | 11.5  |
| 17  | 9.65  | 10.2  | 10.7  | 11.4  | 12.5  |
| 18  | 10.4  | 11.0  | 11.5  | 12.2  | 13.4  |
| 19  | 11.2  | 11.8  | 12.3  | 13.1  | 14.3  |
| 20  | 12.0  | 12.7  | 13.2  | 14.0  | 15.2  |
| 21  | 12.8  | 13.5  | 14.0  | 14.9  | 16.2  |
| 22  | 13.7  | 14.3  | 14.9  | 15.8  | 17.1  |
| 23  | 14.5  | 15.2  | 15.8  | 16.7  | 18.1  |
| 24  | 15.3  | 16.0  | 16.6  | 17.6  | 19.0  |
| 25  | 16.1  | 16.9  | 17.5  | 18.5  | 20.0  |
| 26  | 17.0  | 17.8  | 18.4  | 19.4  | 20.9  |
| 27  | 17.8  | 18.6  | 19.3  | 20.3  | 21.9  |
| 28  | 18.6  | 19.5  | 20.2  | 21.2  | 22.9  |
| 29  | 19.5  | 20.4  | 21.0  | 22.1  | 23.8  |
| 30  | 20.3  | 21.2  | 21.9  | 23.1  | 24.8  |

<sup>1</sup>Emplee la tabla de la distribución normal del Problema 1.

3. Un terminal móvil se encuentra en el área de cobertura de una estación base a una cierta distancia que se desea determinar. La propagación es tal que el campo eléctrico varía con una desviación típica de 3.0 cuando varía el tiempo, y con una desviación típica de 2.2 cuando varía el emplazamiento manteniendo la distancia. A continuación se indican los datos conocidos sobre el sistema:

**Datos del transmisor:** La potencia del transmisor es de 50 W. La ganancia de la antena es de 8 dBi, siendo su altura efectiva de 50 m. Las pérdidas en los elementos pasivos son de 0.8 dB. El sistema funciona en 900 MHz. La velocidad binaria del sistema es 16 Kbps y la modulación empleada es GMSK.

**Datos del receptor:** El receptor tiene una sensibilidad de  $17 \text{ dB}\mu$  y una figura de ruido de 5 dB. Los terminales móviles pueden desplazarse a una velocidad tal que la frecuencia Doppler es de 4 Hz. La ganancia de la antena es de 10 dBi, y las pérdidas en los elementos pasivos son de 0.5 dB.

Como punto de partida para estimar la distancia entre la estación móvil y la estación base se mide la tensión a la entrada del receptor, resultando estar 2 dB por encima de la sensibilidad de éste.

- Calcule el campo eléctrico mínimo necesario para obtener dicha tensión a la entrada del receptor (sin variaciones estadísticas).
- Calcule el campo mediano mínimo necesario, introduciendo las variaciones estadísticas, suponiendo que la tensión medida en el receptor se consigue durante el 95 % del tiempo y en el 90 % de los emplazamientos situados a la misma distancia de la estación base<sup>2</sup>.
- Calcule la distancia a la que se encuentra la estación móvil de la estación base utilizando el método de Okumura-Hata<sup>3</sup>.
- Calcule la tasa de errores que se obtendrá en el receptor para la tensión medida a su entrada.

---

<sup>2</sup>Utilice la tabla de la distribución normal del Problema 1.

<sup>3</sup>Utilice la gráfica del Problema 1.

4. Considere un sistema GSM para entorno urbano que funciona en la banda de 1800 MHz. Según la regulación vigente, la potencia radiada de las estaciones base no puede superar los 20 W. Se desea que la tasa de errores del sistema no sea superior a  $10^{-3}$  en el 90 % de los emplazamientos de la zona periférica y durante el 95 % del tiempo. Las desviaciones típicas de las variaciones del campo eléctrico con respecto a los emplazamientos y con respecto al tiempo son de 1.2 y 2.0, respectivamente. Las pérdidas de propagación siguen una ley polinómica con la distancia con exponente  $n = 3$ .

Los equipos utilizados especifican una relación de protección umbral de 12 dB. La velocidad binaria de la voz digitalizada es de 16 Kbps. El factor de ruido del receptor es de 5 dB. La frecuencia de desplazamiento Doppler es de 12 Hz. La ganancia isótropa de la antena de la BTS es de 6 dB, mientras que la de las MS es de 4 dB. La antena de la BTS está situada a una altura efectiva de 30 m.

La operadora en cuestión tiene asignadas 32 portadoras (pares de frecuencias), pudiendo transportar cada una de ellas 8 canales de tráfico (excepto una portadora por celda, que ha de transportar un canal de control). Se desea una probabilidad de pérdida de llamadas no superior al 3 %.

Obtenga:

- El campo mediano que hace falta en la zona periférica de la celda para conseguir los objetivos de calidad.
- El radio de la celda, si se desea maximizar el tamaño de la misma a la vez que se cumplen los objetivos de calidad.
- El tamaño mínimo del cluster necesario para cumplir con los niveles de interferencia máximos.
- El tráfico máximo que se puede soportar en una celda<sup>4</sup>.
- El factor de reutilización conseguido si se despliega la geometría celular obtenida (celdas hexagonales) en un territorio de 1000 Km<sup>2</sup> de área, así como el número total de móviles (con tráfico ofrecido medio de 25 mE) a los que se puede dar servicio en dicho territorio.

---

<sup>4</sup>Utilice la tabla de la distribución Erlang-B del Problema 2.

5. En un sistema de telefonía móvil celular digital, el operador dispone de 24 radiocanales (pares de frecuencias ascendente–descendente). Cada radiocanal dispone de 8 canales o intervalos de tiempo. La señalización ocupa un canal en cada celda. Se desea que la probabilidad de pérdida de una llamada sea del 1%. Se ha elegido un tamaño de cluster de 12 celdas, teniendo las celdas hexagonales un radio de 4 Km. El tráfico ofrecido por cada terminal móvil es de 12 mE. La relación de protección umbral proporcionada por el fabricante para los receptores es de 10 dB. La propagación sigue una ley polinómica con exponente  $n = 3$ . La potencia del transmisor de la estación base se ha elegido de modo que el sistema tenga cobertura en el 95% de los emplazamientos del anillo perimetral<sup>5</sup>, con una desviación típica de la intensidad de campo al variar dichos emplazamientos de 2.

Calcule:

- El tráfico por celda que el sistema es capaz de soportar con la probabilidad de pérdida especificada<sup>6</sup>.
  - La densidad de móviles por Km<sup>2</sup> que supone dicho tráfico.
  - La distancia de reutilización que se deriva de la geometría del sistema.
  - La viabilidad del sistema en cuanto a la interferencia entre estaciones base cocanal.
  - En caso de que el sistema no fuera viable, halle el radio de la celda que haría que fuese viable. ¿Cuántas veces deberá aumentar la potencia radiada de las estaciones base para estar en las mismas circunstancias que en el caso anterior?
6. Un operador de telefonía móvil celular digital dispone de 32 radiocanales. Cada portadora está dividida en 8 intervalos de tiempo o canales TDM. Se desea que la probabilidad de pérdida de una llamada sea del 3%. Cada cluster está compuesto por 16 celdas hexagonales. En la zona de servicio hay una densidad superficial de móviles de 10 terminales/Km<sup>2</sup> por término medio, ofreciendo cada terminal un tráfico medio de 10 mE. La propagación sigue una ley polinómica con exponente  $n = 3$ . Suponga que las antenas de las estaciones base son omnidireccionales.
- Calcule el tráfico ofrecido por celda que el sistema será capaz de servir con la probabilidad de bloqueo especificada y el radio de dichas celdas para que en cada una de ellas se ofrezca dicho tráfico<sup>7</sup>.
  - La distancia de reutilización que resulta de la geometría celular del sistema.
  - La relación de protección umbral máxima que han de tener los receptores para que el sistema sea viable.

---

<sup>5</sup>Utilice la tabla de la distribución normal del Problema 1.

<sup>6</sup>Utilice la tabla de la distribución Erlang-B del Problema 2.

<sup>7</sup>Utilice la tabla de la distribución Erlang-B del Problema 2.

- d) Indique, de forma razonada, si aumentaría o disminuiría la capacidad de tráfico total de la red si eligiéramos un tamaño de cluster de 13 celdas sin variar ninguno de los demás parámetros. ¿Cómo afectaría esto a la relación de protección umbral máxima de los equipos?
7. La administración ha concedido licencia a un cierto operador para utilizar 39 portadoras en la banda de 1800 MHz para el servicio de telefonía móvil automática utilizando la tecnología europea de segunda generación. El operador ha diseñado su red celular con *clusters* de 13 celdas de radio 1 Km para cubrir un área de servicio 100.000 Km<sup>2</sup>. La probabilidad de pérdida de llamadas es del 2%. Los terminales requieren que la relación de protección frente a interferencia cocanal sea de al menos 25 dB. Se considera que las pérdidas siguen una ley polinómica con respecto a la distancia con exponente  $n = 3.5$ .
- Calcule la densidad superficial de terminales a los que el sistema es capaz de servir si cada terminal produce un tráfico medio de 20 mE<sup>8</sup>.
  - Calcule el número total de conversaciones que el sistema puede cursar simultáneamente en todo el área de servicio.
  - Calcule la distancia de reutilización derivada de la geometría celular.
  - Compruebe si el sistema es viable en cuanto a la interferencia entre estaciones base cocanal. En caso contrario, halle el tamaño mínimo de la agrupación (en número de celdas) para que sí lo sea.
8. En un sistema de radiocomunicaciones móviles digitales a 500 MHz la estación base, situada en un emplazamiento de altura efectiva 30 m, radia una potencia de 200 W en un área de servicio circular. La velocidad binaria de la transmisión es de 10 Kbps. En cuanto a los terminales, sus receptores tienen una figura de ruido de 6 dB y utilizan una antena de 100 Ω de resistencia de radiación. La ganancia isotrópica de sus antenas es de 7.5 dB. Los objetivos de calidad especifican una tasa de errores máxima de 10<sup>-3</sup>. Los terminales pueden moverse a una velocidad que supone una frecuencia de desplazamiento Doppler de 40 Hz<sup>9</sup>. Se pretende obtener una cobertura del 95 % de los emplazamientos perimetrales durante el 90 % del tiempo<sup>10</sup>. El campo eléctrico varía con una desviación típica con los emplazamientos perimetrales de 8.0 y con una desviación típica con el tiempo de 2.0. Utilice la gráfica de Okumura-Hata del Problema 1.
- Calcule la intensidad de campo mínimo que es necesario obtener en el borde de la celda.
  - Calcule la intensidad campo mediano que es necesario obtener teniendo en cuenta las variaciones aleatorias del campo.
  - Calcule el radio máximo de la celda para cumplir los requisitos del sistema.

---

<sup>8</sup>Utilice la tabla de la distribución Erlang-B del Problema 2.

<sup>9</sup>Utilice la gráfica del Problema 1.

<sup>10</sup>Utilice la tabla de la distribución normal del Problema 1.



- d) Suponga ahora que se plantea sustituir los terminales por otros con mejor factor de ruido. Razone cualitativamente sobre el efecto de este cambio en la distancia de cobertura máxima.
9. Un operador de GSM ha decidido que sus celdas van a tener un radio de 3 Km en una determinada zona. La estación base, situada a una altura efectiva de 50 m, utiliza antenas sectoriales con una ganancia directiva isótropa de 10 dB y un rendimiento del 95 %. El alimentador, de 12 m de longitud, presenta una atenuación específica de 0.3 dB/m. Los dos conectores que se utilizan tienen unas pérdidas de 0.5 dB cada uno. Los terminales utilizan una antena con ganancia de 3 dB y presentan unas pérdidas adicionales por posición de 0.2 dB. El receptor de los terminales tiene una figura de ruido de 8 dB y una resistencia de entrada de  $100 \Omega$  y la relación de protección requerida es de 18 dB. La frecuencia de desplazamiento Doppler máxima de los terminales es de 12 Hz. Se requiere una tasa de errores de  $10^{-3}$  para una velocidad binaria de 16 Kbps. La intensidad de campo eléctrico varía con el tiempo y con los emplazamientos con una desviación típica de 5.0 y 1.5, respectivamente. Se desea conseguir una cobertura del 90 % del tiempo en el 75 % de los emplazamientos perimetrales. La propagación sigue una ley polinómica con exponente  $n = 3.2$ .

Utilice las gráficas de los problemas 1 y 1.

- Calcule la intensidad de campo mediano necesario.
- Calcule la potencia que debe entregar el transmisor.
- Calcule la distancia mínima a la que deberían situarse las estaciones base cocanal.
- Calcule el número mínimo de celdas en el cluster para conseguir el nivel de interferencia cocanal requerido, y la distancia de reutilización resultante.

10. Una estación base a 900 MHz, situada a 200 m de altura efectiva, da servicio en una celda hexagonal de 4 Km de radio. Su antena tiene una ganancia de 10 dBi y las pérdidas en los elementos pasivos son de 1.5 dB. El régimen binario de la transmisión es de 20 Kbps y se desea una  $BER = 10^{-3}$ . Los terminales tienen unos receptores con figura de ruido de 4 dB. La ganancia de sus antenas es de 5 dBi y las pérdidas en los elementos pasivos, incluidas las pérdidas adicionales, son de 1 dB. La frecuencia de desplazamiento Doppler es de 12 Hz a la velocidad máxima de los terminales. Los objetivos de calidad de la cobertura se han establecido en el 90% de los emplazamientos y en el 95% del tiempo. Las desviaciones típicas del campo eléctrico al variar los emplazamientos y el tiempo son de 4.0 y de 1.0.
- Calcule la intensidad de campo mínimo en el borde de la celda.
  - Calcule la intensidad de campo mediano para tener en cuenta las variaciones estadísticas del campo.
  - Calcule la potencia (W) que ha de entregar el transmisor de la estación base para poner el campo mediano en el borde de la celda.
  - Suponga que ahora permite moverse a los terminales a una velocidad mayor. Justifique cualitativamente cómo afectará esto a la potencia entregada calculada en el apartado anterior.
11. Un operador GSM tiene asignadas 27 portadoras para dar servicio en un área de 10000 Km<sup>2</sup>. El radio de las celdas es de 5 Km. El tamaño de los clusters es 9 celdas. Los terminales ofrecen un tráfico medio de 15 mE y se desea atender sus llamadas con una probabilidad de pérdida del 1.5%. Se desea obtener una cobertura en los emplazamientos perimetrales del 95%, teniendo en cuenta que el campo eléctrico varía con dichos emplazamientos con una desviación típica de 1.2. Las pérdidas siguen una ley polinómica en la distancia con exponente 2.8.
- Calcule el tráfico que puede ofrecerse en cada celda.
  - Calcule la densidad superficial de terminales que supone dicho tráfico.
  - Calcule el número total de terminales a los que la red puede dar servicio.
  - Calcule la distancia de reutilización.
  - Calcule el máximo valor que puede exigirse a la relación de protección umbral de los terminales.