

Diseño y Operación de Redes Telemáticas

Tema 2. Técnicas de Acceso Múltiple



Ramón Agüero Calvo

Departamento de Ingeniería de
Comunicaciones

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Índice

- 1** Introducción
- 2** Técnicas de acceso múltiple tradicionales
- 3** Acceso múltiple CDMA
- 4** Sistemas LTE

Índice

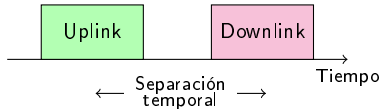
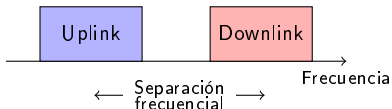
- 1** Introducción
- 2 Técnicas de acceso múltiple tradicionales
- 3 Acceso múltiple CDMA
- 4 Sistemas LTE

Introducción

- Divide la capacidad de un canal de comunicaciones para que sea compartido por varios usuarios
- Se distinguen en función de cómo se dividen los recursos
- Las técnicas que más importancia han tenido tradicionalmente son las siguientes
 - **FDMA** utiliza una división en el dominio de la frecuencia
 - **TDMA** emplea una división temporal
 - **CDMA** utiliza diferentes códigos para distinguir a los diferentes usuarios
- A pesar de tener menor relevancia, también existe **SDMA**, que utiliza diferentes *'camino'*s para cada señal
- Recientemente ha cobrado mucha importancia el **OFDMA**, utilizado con modulaciones OFDM, que reparte las subportadoras a diferentes usuarios

Introducción

- El esquema de acceso múltiple va asociado, normalmente, a la técnica de duplexado
- Las técnicas de duplexado más empleadas son dos
 - **FDD**, *Frequency Division Duplexing*, utiliza una banda para el *downlink* y otra para el *downlink*
 - **TDD**, *Time Division Duplexing*, emplea la misma banda de frecuencias y separa el *downlink* del *uplink* temporalmente

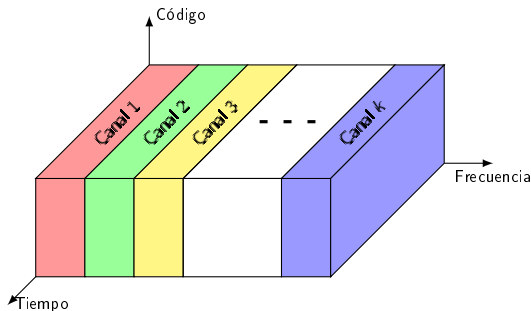


Índice

- 1 Introducción
- 2 Técnicas de acceso múltiple tradicionales**
- 3 Acceso múltiple CDMA
- 4 Sistemas LTE

FDMA: introducción

- Cada canal/usuario usa una frecuencia diferente
- Uso de canales de guarda para evitar la interferencia con canales adyacentes
- Uso en los sistemas de comunicaciones móviles 1G
- Apropiado para modulaciones analógicas



FDMA: ventajas y desventajas

Ventajas

- Señal de banda estrecha
- La interferencia entre símbolos es pequeña: no se requiere ecualización
- Complejidad reducida
- Menor señalización

Desventajas

- Mayores costes: necesidad de filtros paso banda
- Los terminales requiere duplexores: transmisor y receptor activos simultáneamente

FDMA: capacidad

- La capacidad de un sistema FDMA depende del ancho de banda total asignado al operador B_t , del ancho de cada canal B_c y del ancho del canal de guarda B_g (en cada extremo del espectro asignado)

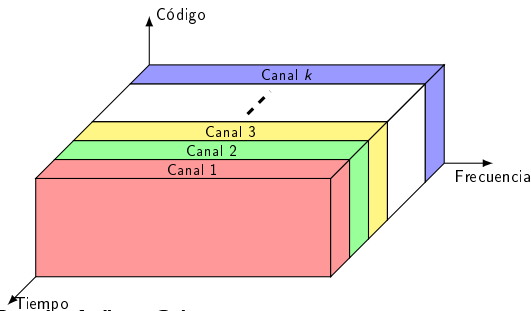
$$N_{\text{FDMA}} = \frac{B_t - 2 \cdot B_g}{B_c}$$

- Notar que B_c también incluye la guarda que se 'asigna' a cada usuario
- En el sistema AMPS (1G) cada operador tenía 12.5 MHz asignados, cada canal ocupaba 30 kHz (24 + 6) y la guarda era de 10 kHz (en cada extremo)

$$N_{\text{AMPS}} = \frac{B_t - 2 \cdot B_g}{B_c} = \frac{12.5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10}{30} = 416 \text{ canales}$$

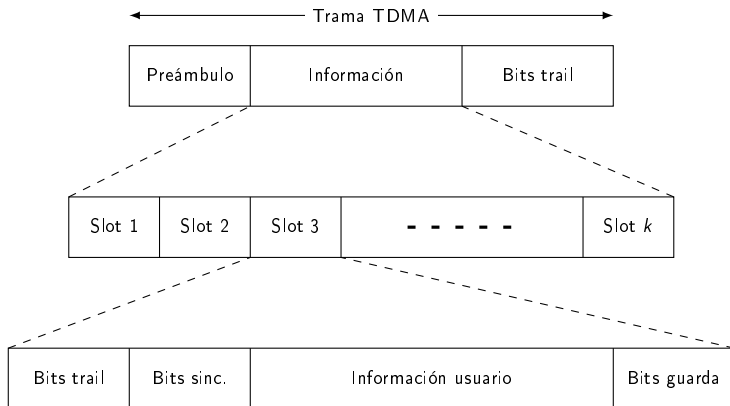
TDMA: introducción

- Se divide el canal en ranuras temporales o *slots*
- Una trama consta de N slots, asignadas a cada uno de los usuarios
- Una única frecuencia
- Transmisión a ráfagas
- Uso mayoritario en sistemas 2G: GSM



TDMA: estructura trama

- La figura muestra una estructura genérica para una trama TDMA



TDMA: ventajas y desventajas

Ventajas

- Ahorro energético debido a la transmisión a ráfagas
- La transmisión discontinua facilita los trasposos
- No se requieren duplexores, incluso con FDD
- Asignación dinámica de capacidades

Desventajas

- La señal ya no se puede considerar de banda estrecha
- Habitualmente requiere de una ecualización adaptativa
- Necesidad de una sincronización elevada (especialmente en el uplink)

TDMA: capacidad

- La capacidad se obtiene multiplicando el número de *ranuras* por canal (m) y el número total de canales disponibles

$$N_{\text{TDMA}} = \frac{m(B_t - 2 \cdot B_g)}{B_c}$$

- En GSM se usan 25 MHz, y canales de 200 kHz; si cada trama TDMA tiene 8 ranuras; además se puede despreciar el ancho de banda de guarda

$$N_{\text{GSM}} = \frac{m(B_t - 2 \cdot B_g)}{B_c} = 8 \frac{25 \cdot 10^3}{200} = 1000 \text{ canales}$$

- Además, habría que tener en cuenta la eficiencia del sistema, ya que en una trama TDMA se transmiten varios bits de *overhead*

Capacidad de sistemas FDMA y TDMA

- En los sistemas de comunicaciones móviles una manera de analizar la capacidad es a través de la relación entre la potencia de señal y la de interferencia (y ruido)
- En FDMA y TDMA la fuente de interferencia más relevante es la que se conoce como interferencia co-canal, que es la producida por estaciones base que usan la misma frecuencia
- La relación CIR (*Carrier-to-Interference Ratio*) depende del factor de reuso (conjunto de células que comparten todas las frecuencias del despliegue) y del esquema de sectorización empleado

Capacidad de sistemas FDMA y TDMA

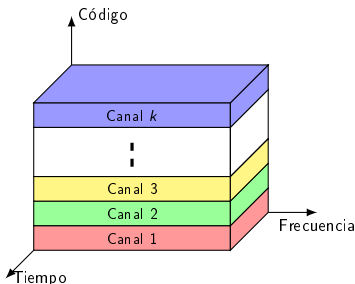
- Los sistemas que utilizan FDMA y TDMA se caracterizan por presentar bloqueo
- Si toda la capacidad está ya asignada, las llamadas que lleguen al sistema serán rechazadas
- Su análisis se suele llevar a cabo (teoría de tráfico) con la fórmula de *ErlangB*
- El grado de servicio se determinará en función de la probabilidad de bloqueo

Índice

- 1 Introducción
- 2 Técnicas de acceso múltiple tradicionales
- 3 Acceso múltiple CDMA**
- 4 Sistemas LTE

CDMA: introducción

- Cada señal de banda estrecha se multiplica por la señal de ensanchamiento (*spreading*)
- Cada usuario tiene su propia secuencia, lo que permite que todos los usuarios transmitan simultáneamente en toda la banda
- Las transmisiones del resto de usuarios aparecen como *ruido*



CDMA: características

- Todos los usuarios comparten la misma frecuencia
- Se puede emplear TDD o FDD
- *Soft capacity*: el rendimiento de una celda CDMA se va reduciendo de manera paulatina a medida que se incrementa el número de usuarios
- Relevancia del control de potencia
- *Soft handover*, aprovechando que todas las BS usan la misma frecuencia
- El efecto de la propagación multi-camino se reduce por el ensanchamiento de la señal

CDMA: control de potencia

- El control de potencia es fundamental en sistemas CDMA, especialmente en el uplink
- Para asegurar un buen comportamiento del sistema es necesario que la potencia a la que se reciben las señales de los usuarios sea la misma, independientemente de la distancia a la que se encuentran de la estación base: **near-far problem**
- La mayoría de los sistemas que usan CDMA implementan esquemas de control de potencia, para que la potencia a la que llega la señal de cada usuario sea la misma en la BS

CDMA: capacidad

- Si se desprecia la potencia de ruido adicional en el sistema, la relación SINR se puede calcular como sigue, donde N es el número de usuarios y S la potencia con la que se recibe la señal de cada uno en la estación base (se asume un control de potencia ideal)

$$SINR = \frac{S}{S(N-1)}$$

- Teniendo en cuenta la tasa de información R y el ancho de banda total W se puede obtener la relación $\frac{E_b}{N_0}$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\frac{S}{R}}{(N-1) \frac{S}{W}} = \frac{W}{R(N-1)}$$

- El término $\frac{W}{R}$ es la ganancia de procesado

CDMA: capacidad

- Se puede también tener en cuenta el ruido térmico de fondo η

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\frac{W}{R}}{(N-1) + \frac{\eta}{S}}$$

- Con lo que se puede obtener una estimación del número de usuarios

$$N = 1 + \frac{W/R}{E_b/N_0} - \frac{\eta}{S}$$

- En sistemas CDMA el factor de reuso es 1, con lo que todas las BS utilizan la misma frecuencia, pero se puede utilizar sectorización, lo que reduce el valor de N a $N_s = \frac{N}{G_{\text{sec}}}$
 - G_{sec} es la ganancia por sectorización, que en sistemas reales sería algo inferior a 3

CDMA: capacidad

- Además, se puede operar en modo DTX (*discontinuous transmission mode*), con lo que se reduce la interferencia causada por otros usuarios según el factor de actividad de voz, α
- Con todo ello, se puede recalcular la relación $\frac{E_b}{N_0}$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\frac{W}{R}}{(N_s - 1)\alpha + \frac{\eta}{S}}$$

- Con lo que la nueva capacidad del sistema sería

$$N_s = 1 + \frac{1}{\alpha} \left[\frac{W/R}{E_b/N_0} - \frac{\eta}{S} \right] \rightarrow N = G_{\text{sec}} \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha} \left[\frac{W/R}{E_b/N_0} - \frac{\eta}{S} \right] \right\}$$

CDMA: capacidad

- En un sistema con múltiples células, la capacidad se podría calcular como sigue (asumiendo que el sistema está limitado por interferencia)

$$SIR = \frac{P_t d^{-\gamma}}{\sum_{i=1}^{N-1} P_t d_i^{-\gamma} + \sum_{j=1}^{M \cdot N} P_j d_j^{-\gamma}}$$

- Con lo que se puede llegar a la siguiente expresión

$$SIR = \frac{P_t d^{-\gamma}}{\sum_{i=1}^{N-1} P_i d_i^{-\gamma} \left[1 + \frac{\sum_{j=1}^{M \cdot N} P_j}{\sum_{i=1}^{N-1} P_t d_i^{-\gamma}} \right]}$$

- Asumiendo control de potencia ideal y llamando λ al incremento de interferencia por otras celdas

$$SIR = \frac{1}{(N-1)(1+\lambda)}$$

CDMA: capacidad

- Con lo que la $\frac{E_b}{N_0}$ (despreciando la contribución de ruido térmico) se puede expresar finalmente como

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W/R}{(N-1) \alpha (1+\lambda)}$$

- Con lo que, finalmente

$$N = 1 + \frac{W/R}{\alpha(1+\lambda) E_b/N_0}$$

- O, si hubiera sectorización...

$$N = G_{\text{sec}} \left[1 + \frac{W/R}{\alpha(1+\lambda) E_b/N_0} \right]$$

CDMA: Noise Rise Uplink

- Partimos de la relación $\frac{E_b}{N_0}$ en un sistema con una única celda

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_j \frac{W}{R}}{I_{\text{total}} - P_j}$$

- La potencia con la que se recibe la señal del usuario j será

$$P_j = \frac{I_{\text{total}}}{1 + \frac{W/R}{E_b/N_0}}$$

- Se define L_j como el porcentaje de interferencia que causa cada usuario
- Se puede escribir, por tanto que

$$I_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N L_i \cdot I_{\text{total}} + P_N \quad \rightarrow \quad I_{\text{total}} = \frac{P_N}{1 - \sum_{i=1}^N L_i}$$

CDMA: Noise Rise Uplink

- Y el factor de incremento de ruido (crecimiento de la interferencia frente al ruido blanco) sería, por tanto

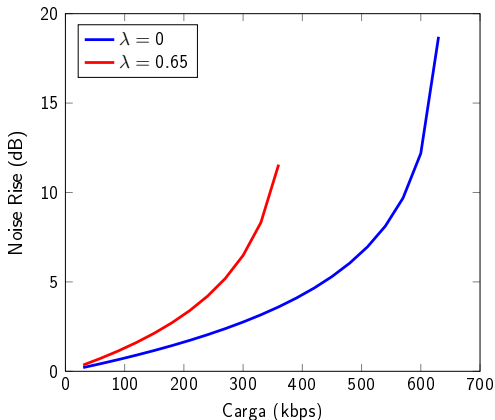
$$NR_{ul} = \frac{I_{total}}{P_N} = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^N L_i} = \frac{1}{1 - \eta_{ul}}$$

- Al parámetro η_{ul} se le conoce como factor de carga en el uplink
- Si se considerara la interferencia adicional generada por los usuarios de otras células, tendríamos que

$$I_{total} = \frac{P_N}{1 - (\lambda + 1) \sum_{i=1}^N L_i} \quad \eta_{ul} = (\lambda + 1) \sum_{i=1}^N L_i$$

CDMA: Noise Rise Uplink

- Ejemplo con los siguientes valores
 $W = 3.84 \text{ Mbps}$, $R_b = 30 \text{ kbps}$, $\frac{E_b}{N_0} = 8 \text{ dB}$
- Cada usuario 'añade' una carga de 30 kbps más al sistema



CDMA: Noise Rise Downlink

- En el caso del *downlink* se puede escribir que la relación E_b/N_0 viene dada por la siguiente expresión, teniendo en cuenta que el usuario i se conecta con la estación base j

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W p_i \gamma_{ij}}{R \left[(1 - \varphi) P \gamma_{ij} + P \sum_{n \neq j} \gamma_{in} + P_N \right]}$$

- Despejando p_i , y teniendo en cuenta el factor de actividad (α) se llega a...

$$p_i = \frac{E_b}{N_0} \frac{\alpha R}{W} \left[(1 - \varphi) P + P \sum_{n \neq j} \frac{\gamma_{in}}{\gamma_{ij}} + \frac{P_N}{\gamma_{ij}} \right]$$

- φ es el factor de ortogonalización, si $\varphi = 1$ los códigos empleados son completamente ortogonales

CDMA: Noise Rise Downlink

- Por otro lado, la potencia total también se puede obtener como la suma de la potencias asociadas a cada usuario

$$P = \frac{P_N \frac{E_b}{N_0} \frac{R \alpha}{W} M \bar{\mathcal{L}}}{1 - \frac{E_b}{N_0} \frac{R \alpha}{W} M [(1 - \varphi) + \lambda]}$$

donde $\bar{\mathcal{L}}$ es el valor medio de las pérdidas de propagación entre la estación base y los usuarios que se conectan a ella

- En este caso el factor de carga en el *downlink*, η_{dl} se puede calcular como se indica a continuación

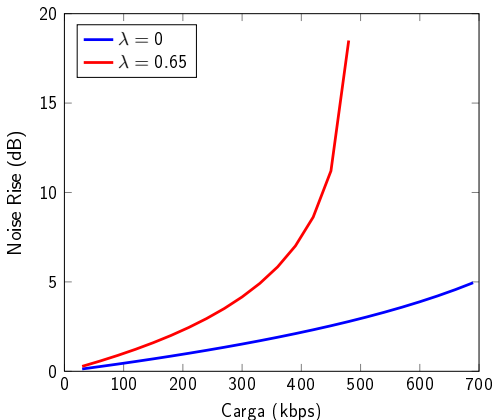
$$\eta_{dl} = \frac{E_b}{N_0} \frac{R \alpha}{W} M [(1 - \varphi) + \lambda]$$

- A partir del que se puede calcular el factor de incremento de ruido

$$NR_{dl} = \frac{1}{1 - \eta_{dl}}$$

CDMA: Noise Rise Downlink

- Ejemplo con los siguientes valores
 $W = 3.84 \text{ Mbps}$, $R_b = 30 \text{ kbps}$, $\frac{E_b}{N_0} = 8 \text{ dB}$, $\varphi = 0.4$
- Cada usuario 'añade' una carga de 30 kbps más al sistema



Capacidad (Erlang) en un sistema CDMA

- En los sistemas de acceso múltiple tradicionales (FDMA y TDMA) el análisis de las prestaciones del sistema se puede llevar a cabo con la fórmula de ErlangB
- En el caso de CDMA, la degradación del servicio es más gradual, por lo que no el enfoque anterior no se puede aplicar de manera tan directa
- La probabilidad de bloqueo (*outage* en este caso) es aquella en la que la interferencia total supera un umbral aceptable

$$I = I_0 \cdot W = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \dots + \alpha_M P_M + N_0 \cdot W$$

Capacidad (Erlang) en un sistema CDMA

- Dividido entre $I_0 \cdot R$

$$\frac{W}{R} = \alpha_1 \frac{Eb_1}{I_0} + \alpha_2 \frac{Eb_2}{I_0} + \dots + \alpha_M \frac{Eb_M}{I_0} + \frac{N_0}{I_0} \frac{W}{R}$$

- Teniendo en cuenta que $\frac{N_0}{I_0} = \eta$, y definiendo $\rho_i = \frac{Eb_i}{I_0}$ se llega finalmente a

$$\underbrace{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \dots + \alpha_M \rho_M}_{\mathbb{Z}} = \frac{W}{R} (1 - \eta)$$

- La probabilidad de *outage* se corresponde con la probabilidad de que la variable aleatoria \mathbb{Z} sea mayor que $\frac{W}{R} (1 - \eta)$

Capacidad (Erlang) en un sistema CDMA

- Si se conociera la distribución de \mathbb{Z} la probabilidad de *outage* se calcularía directamente

$$\mathbb{P}_{\text{outage}} = \int_{\frac{W}{R}(1-\eta)}^{\infty} f_{\mathbb{Z}}(z) dz$$

- Pero \mathbb{Z} se desconoce...
 - La energía de bit (ρ_i) de cada usuario es aleatoria, y se distribuye según una *va lognormal*
En dB, la energía de bit se distribuye según una *va gaussiana*, de media m y desviación estándar σ
 - La actividad de cada usuario (α_i) también es aleatoria
 - Por último, el número de usuarios activos, M , también es aleatorio (proceso de Poisson)

Capacidad (Erlang) en un sistema CDMA

- Utilizando el teorema central del límite se asume que \mathbb{Z} se corresponde con una va gaussiana
- Teniendo en cuenta las distribuciones de ρ_i , α_i y M se pueden calcular el valor medio y la varianza de \mathbb{Z}

$$E[\mathbb{Z}] = \overline{M} \overline{\alpha} e^{\beta m + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma^2}$$

$$\sigma_{\mathbb{Z}}^2 = \overline{M} \overline{\alpha}^2 e^{2\beta m + 2\sigma^2 \beta^2}$$

con $\beta = \frac{\log_e 10}{10}$

- Luego para calcular la probabilidad de bloqueo (*outage*), tendremos que...

$$\mathbb{P}_{\text{outage}} = Q \left(\frac{\frac{W}{R} (1 - \eta_0) - \overline{M} \overline{\alpha} e^{m\beta + \beta^2 \frac{\sigma^2}{2}}}{\sqrt{\overline{M} \overline{\alpha}^2 e^{2m\beta + 2\beta^2 \sigma^2}}} \right)$$

Capacidad (Erlang) en un sistema CDMA

- Si se considera la interferencia causada por otras celdas (λ), tendremos que...

$$\mathbb{P}_{\text{outage}} = Q \left(\frac{\frac{W}{R} (1 - \eta_0) - \bar{M} \bar{\alpha} e^{m\beta + \beta^2 \frac{\sigma^2}{2}} (1 + \lambda)}{\sqrt{\bar{M} \bar{\alpha}^2 e^{2m\beta + 2\beta^2 \sigma^2} (1 + \lambda)}} \right)$$

- Notar que si el numerador es 0, la probabilidad de *outage* sería 0.5 (lo que no es aceptable), tendríamos por tanto que...

$$\frac{W}{R} (1 - \eta_0) \geq \bar{M} \bar{\alpha} e^{m\beta + \beta^2 \frac{\sigma^2}{2}} (1 + \lambda) \quad \rightarrow$$

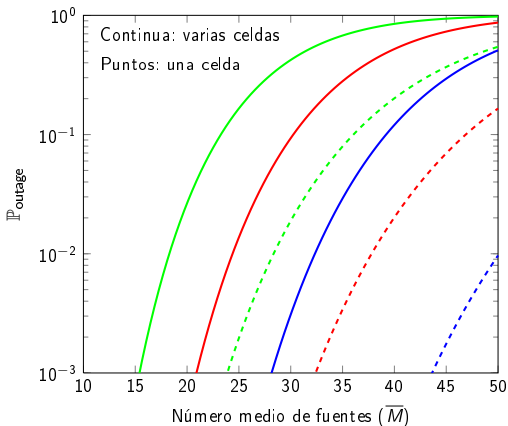
$$\rightarrow \bar{M} \leq \overbrace{\frac{\frac{W}{R}}{\bar{\alpha} e^{m\beta}} (1 + \lambda)}^{\text{Capacidad ideal}} \frac{1 - \eta_0}{e^{2\beta^2 \frac{\sigma^2}{2}}}$$

Capacidad (Erlang) en un sistema CDMA

- Ejemplo con los siguientes valores

$$\bar{\alpha} = 0.4, \overline{\alpha^2} = 0.31, \eta_0 = 0.1, W/R = 128, \lambda = 0.55$$

$$\text{— } E_b/N_0 = 5 \text{ dB} \quad \text{— } E_b/N_0 = 6 \text{ dB} \quad \text{— } E_b/N_0 = 7 \text{ dB}$$



Índice

- 1 Introducción
- 2 Técnicas de acceso múltiple tradicionales
- 3 Acceso múltiple CDMA
- 4 Sistemas LTE**

Long-Term Evolution: introducción

- El sistema LTE es la evolución natural del UMTS y es la tecnología base de la 4G
- Es una tecnología que se ha ido especificando en el seno del 3GPP
- Según la visión de la ITU, la tecnología 4G tiene que cubrir los requisitos definidos en *IMT-Advanced*, mientras que el LTE *básico* se corresponde con los de *IMT-2000*
 - Eficiencia espectral en IMT-2000 e IMT-Advanced

Downlink		Uplink	
IMT-2000	IMT-Advanced	IMT-2000	IMT-Advanced
5 bps/Hz	15 bps/Hz	2.5 bps/Hz	6.75 bps/Hz

- Evolución de la estandarización
 - LTE se especifica en las **Rel-8** (2008) y **Rel-9** (2009) del 3GPP
 - LTE-Advanced (4G **estricto**) se comienza a especificar en la **Rel-10** (2011)

Long-Term Evolution: características principales

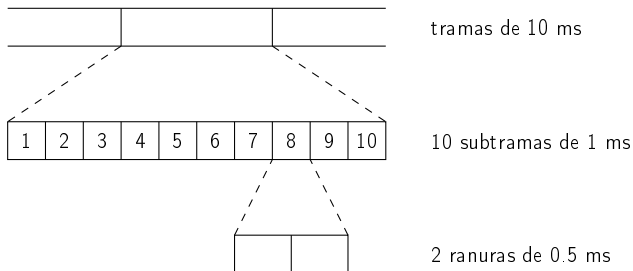
- Técnicas de acceso múltiple
 - **Downlink:** OFDMA
 - **Uplink:** Single Carrier FDMA (DFT-Spread OFDM), para evitar problemas de *Packet to Average Power Ratio* (PAPR)
- Permite utilizar tanto FDD como TDD para el duplexado
- Flexibilidad en el uso del espectro
- Anchos de banda soportados: {1.4, 3, 5, 10, 15, 20} MHz
- *Scheduling* según el estado del canal y adaptación de tasa
 - Gran granularidad: 180 kHz y 1 ms
- Gestión de la interferencia inter-celular
 - LTE sistema con factor de reuso 1

Long-Term Evolution: características principales

- *ARQ Híbrido*. Los usuarios pueden solicitar de manera rápida retransmisiones de paquetes perdidos
 - Varios procesos en paralelo
 - Uso de *soft combining*: el receptor combina las recepciones de los intentos de transmisión
- Posibilidad de utilizar esquemas multi-antena
 - Múltiples antenas en recepción: diversidad espacial (uplink y **downlink**)
 - Múltiples antenas en transmisión: beam-forming
 - Multiplexación espacial (*Single User*, SU-MIMO)
 - Uso de *Multiple User*, MU-MIMO

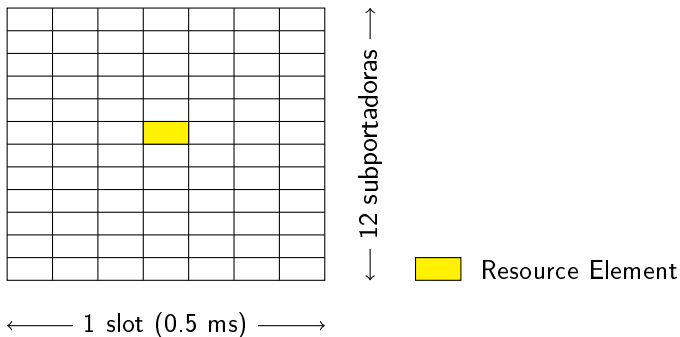
Tramas LTE

- La estructura de la trama LTE (downlink) es la que se muestra en la figura
- En cada ranura se manda un conjunto de 7 símbolos OFDM (al usar el prefijo extendido podrían ser 6)



Recursos en LTE

- La estructura del bloque de recursos en LTE (resource block) es la que se muestra en la figura
- Está compuesto por $7 \times 12 = 84$ *resource elements* que es una portadora OFDMA durante una ranura de 0.5 ms



LTE Advanced

- La nueva generación de LTE (*LTE-Advanced*) incorpora una serie de mecanismos novedosos en tecnologías de comunicaciones celulares
- Su uso marca el comienzo **real** de la 4G, con el **Rel-10** del 3GPP (2011)
 - **Carrier Aggregation.** (Rel-10) Se pueden agregar hasta 5 portadoras (100 MHz) que no tienen que ser adyacentes
 - Mejora en las técnicas de múltiples antenas (Rel-10)
 - **Relaying.** (Rel-10) Elementos que se sitúan para aumentar la cobertura y la capacidad de la red de una manera económica
 - **Despliegues heterogéneos.** (Rel-10). Uso de diferentes tipos de estaciones base (pico, femto) con coberturas solapadas.

LTE Advanced

- Las Rel-11 (2013) y Rel-12 (2014), además de mejorar algunas de las soluciones ya propuestas, introducen alguna técnica novedosa adicional
 - **Coordinated MultiPoint transmission reception.** (Rel-11) Un terminal móvil puede estar conectado simultáneamente a varias estaciones base que cooperan entre sí
 - **Device-to-device.** (Rel-12) Los terminales de usuario cooperan entre sí para acceder a la estación base, comunicándose directamente entre ellos

Carrier Aggregation

- Uno de los aspectos centrales de LTE-Advanced, que se introduce a partir de la **Rel-10**
- Mayor impacto en los terminales móviles que en las BS
 - **Agregación intra-banda.** Agregar las portadoras en la misma banda; puede ser de componentes contiguos (Rel-10) o no (Rel-11)
 - **Agregación inter-banda.** Agregación de portadoras que pertenecen a bandas diferentes

Relaying

- En la **Rel-10** se introduce la posibilidad de utilizar esquemas de reenvío *decode-and-forward*
 - Los meros *repetidores* ya estaban en la **Rel-8**
- El *relayer* debe ser completamente transparente para el terminal
- El *relayer* se conecta a la BS (*donor cell*) a través de un enlace *backhaul* y da servicio a los terminales a través de los enlaces *de acceso*
 - Es fundamental evitar la interferencia entre ambos tipos de enlace
- En función de la banda utilizada en el enlace *backhaul* aparecen soluciones *fuera-de-banda* o *en-banda*
 - La gestión de la interferencia en el esquema *en-banda* se hace en el dominio temporal
- El número máximo de saltos para alcanzar a la BS es 2:
terminal → *relayer* → *BS*

HetNets: introducción

- Diferentes tipos de BS en función de la potencia de transmisión (fento, pico, macro): $\{0.1, 0.25, 6.3, 40\}$ W
- Diferencias entre los *límites* de la celda
 - La cobertura **downlink** de las (pico/fento) BS es sensiblemente menor que las de las BS tradicionales
 - La cobertura **uplink** depende del terminal de usuario: similar en ambas tipos de BS
- Selección de celda tradicional (RSSI más elevada) deja de ser apropiada
 - Infra-utilización recursos en las BS pico y saturación de las macro
- Balanceo de carga: cursar una mayor cantidad de tráfico por las BS pico
 - Utilización del *path-loss* y no el RSSI como criterio de decisión
 - Expansión del rango de la celda (*Cell Range Extension*): **bias**

HetNets Vs. Despliegues tradicionales

Siete[§] diferencias básicas

- Métricas de rendimiento
 - Eficiencia espectral por área ($\text{bps}/\text{Hz}/\text{m}^2$)
 - $\mathbb{P}_{\text{outage}}$ en función de la tasa
- Topología
 - Uso de despliegues *aleatorios*: *Poisson Point Process*
 - Para una red limitada en interferencia, la SINR no se ve modificada al desplegar aleatoriamente una pico-célula
- Downlink Vs. Uplink
 - Desacoplar los enlaces de subida y bajada, que se consideran de manera independiente

[§] *J.G. Andrews. "Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift". En: Communications Magazine, IEEE 51.3 (2013), págs. 136-144. ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6476878*

HetNets Vs. Despliegues tradicionales

Siete[§] diferencias básicas

- Selección (asociación) de celda
 - Uso de *Cell Range Extension* para favorecer un balanceo de carga
- Movilidad
 - Muchos traspasos: *Minimum Time of Stay*
 - *'Invitado no bienvenido'*
- Cuello de botella en el *backhaul*
 - El cuello de botella puede estar en la conexión con la red
 - Uso de *smart-caching*
- Gestión de la interferencia
 - No es posible utilizar un reparto estático
 - Reparto en el dominio frecuencial, temporal o espacial

§ J.G. Andrews. "Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift". En: *Communications Magazine, IEEE 51.3 (2013), págs. 136-144. ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6476878*

HetNets: Gestión de la interferencia

Dominio de la frecuencia

- Una repartición estática podría ser poco apropiada
- Asignación dinámica de recursos y uso de *Carrier Aggregation*
- Los terminales transmiten/reciben en varias portadoras

Dominio espacial

- Uso de técnicas CoMP: transmisión/recepción coordinada en varias BS
- Aprovechar funcionalidad NFV (cooperación estrecha: distribuida Vs. centralizada)

HetNets: Gestión de la interferencia

Dominio del tiempo

- Se adapta mejor al dinamismo en los usuarios y el tráfico
- Requiere sincronización
- Tramas protegidas: no usadas por la macro-BS, únicamente por las pico-BS
- Almost-Blank Subframes (ABS)
 - Tramas que la macro-BS utiliza para enviar únicamente señalización *broadcast*

CoMP

Downlink

- **Multi-Point Coordination.** La transmisión se lleva a cabo únicamente desde una BS, que se coordina con otras para la adaptación del enlace y el *scheduling*
- **Multi-Point Transmission.** La transmisión se puede llevar a cabo desde más de una BS
 - Dynamic Point Selection: en un [tiempo/recurso] dados la transmisión se lleva a cabo desde una BS, que puede ir cambiando
 - Joint Transmission: transmisión desde más de una BS

Uplink

- **Coordination.** Para mejorar la interferencia en el *uplink*
- **Joint Reception.** La señal se recibe en más de una BS

Capacidad en LTE

- Habitualmente se emplea la relación de Shannon (eficiencia de un enlace inalámbrico en bps/Hz)

$$C_{[bps]} = B_{[Hz]} \log_2 (1 + SINR_{i,j})$$

- Donde la relación SINR en el terminal de usuario i , cuando se conecta a la BS j según se muestra a continuación

$$SINR_{i,j} = \frac{P_0 \Gamma_{i,j}}{\sum_{k \in BS \setminus j} P_0 \Gamma_{i,j} + \sigma^2}$$

- En ocasiones se utilizan valores tabulados para establecer la eficiencia, en lugar de emplear la relación de Shannon

Capacidad en LTE

- Planteamiento de un problema de optimización genérico (maximizar la capacidad de un sistema)
 - Se asume que la estación base j tiene un ancho de banda total de B_j Hz y se define $b_{i,j}$ como el porcentaje de recursos que la BS j otorga al usuario i

$$\max \sum_{i \in UE} \sum_{j \in BS} B_j b_{i,j} \log_2(1 + SINR_{i,j})$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in UE} b_{i,j} \leq 1 \quad \forall j \in BS$$

- Si se quisiera limitar el número de conexiones activas a 1, se podría definir la siguiente variable auxiliar $a_{i,j}$

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & b_{i,j} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \sum_{j \in BS} a_{i,j} = 1 \quad \forall i \in UE$$