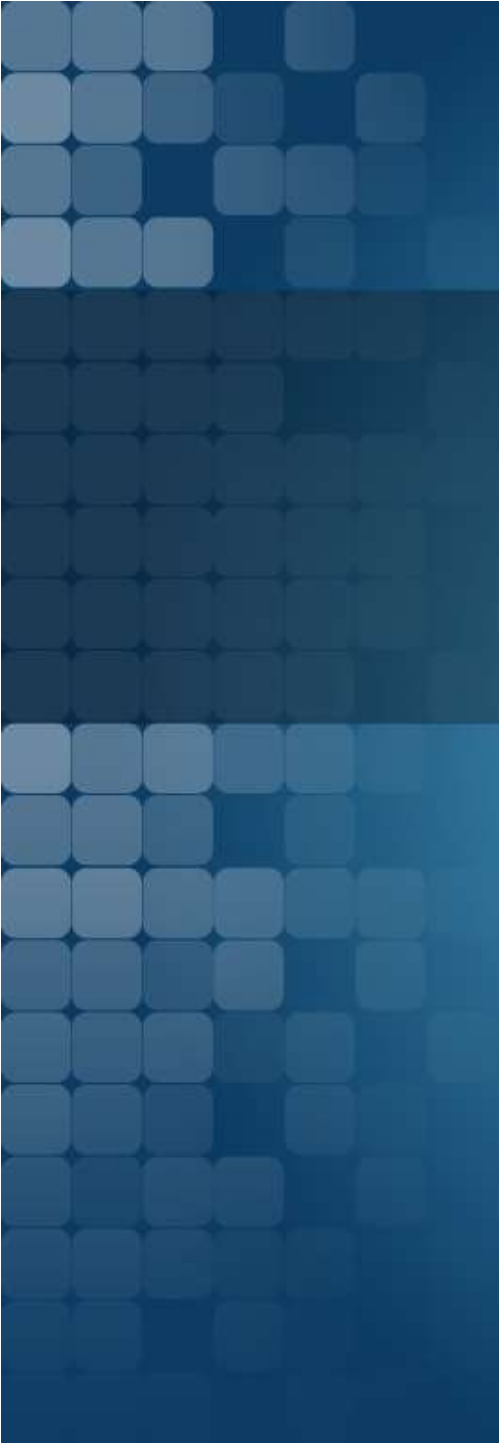




Tema 2

Sistemas 2G-4G

Contenido

- Introducción
- TETRA y DMR
- GSM
- UMTS
- LTE
- Bibliografía



Introducción (I)

- Sistemas de radiotelefonía móvil profesional (PMR)
 - Redes de comunicaciones móviles de voz y datos de baja velocidad no conectado a la RTP para la gestión de la actividad de personas y flotas
 - Grandes áreas de cobertura, llamadas punto a punto, punto a multipunto, a grupos específicos, bandas de VHF y UHF
 - TETRA, DMR, dPMR
- Sistemas de comunicaciones móviles públicas terrestres (PLMN)
 - Redes de comunicaciones móviles basadas en sistemas celulares
 - Cobertura nacional o internacional y facilidades de itinerancia y traspaso
 - Soportan la transmisión de voz y datos
 - GSM, UMTS, LTE, LTE-A, 5G-NR y evoluciones intermedias (GPRS, HSPA, ...)



TETRA y DMR (I)

- TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*)

- ETSI – EN 300 392, EN 300 396, TS 100 392, ...
- ETSI: TETRA *Release 1* y TETRA *Release 2* (1995 / 2005)
- Usuarios PMR: Seguridad pública, gobiernos y militares, transporte y distribución, comercio e industria
- Interfaz radio
 - TDMA con 4 intervalos por trama
 - Radiocanales de 25 kHz
 - Modulación $\pi/4$ DQPSK
- Bandas de frecuencia
 - UN-28, Seguridad del Estado, emergencia: 380-385 y 390-395 MHz
 - UN-31, redes móviles troncales: 410-470 MHz
 - UN-40, asignación dinámica de canales: 870-876 y 915-921 MHz



<http://www.tandcca.com>

<http://www.etsi.org>



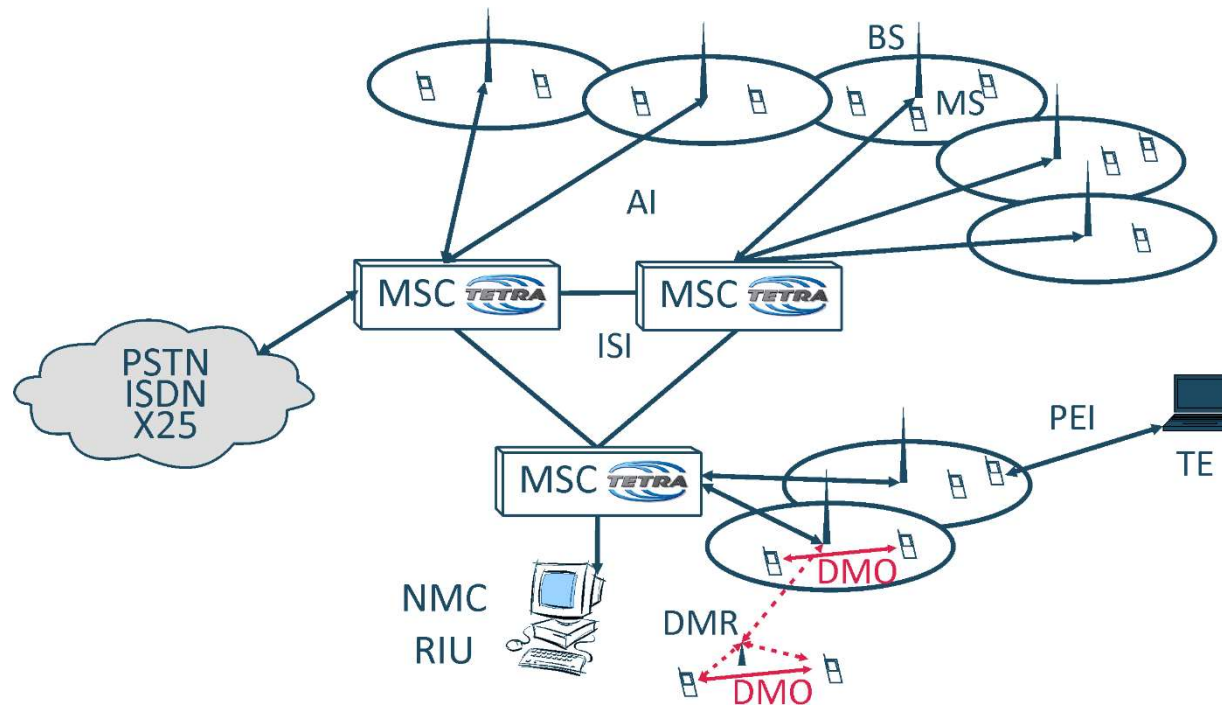
TETRA y DMR (II)

- Modos de funcionamiento
 - TETRA *Release 1*
 - V + D (*Voice + Data*)
 - DMO (*Direct Mode Operation*)
 - PDO (*Packet Data Optimized*): sin desarrollo
 - TETRA *Release 2*
 - Extensión de rango TMO (*Trunked Mode Operation*)
 - TEDS (*TETRA Enhanced Data Service*)

Modulación	Canalización, velocidades en kbit/s (4 TS)			
	25 kHz	50 kHz	100 kHz	150 kHz
$\pi/4$ DQPSK	15,6			
$\pi/8$ D8PSK	24,3			
4QAM	11	27	58	90
16QAM	22	54	116	179
64QAM	33	80	175	269
	44	107	233	359
	66	160	349	538

TETRA y DMR (III)

■ Arquitectura



AI: Air Interface

DMO: Direct Mode Operation

DMR: Direct Mode Repeater

ISI: Inter-System Interface

MSC: Mobile Switching Center

NMC: Network Management Center

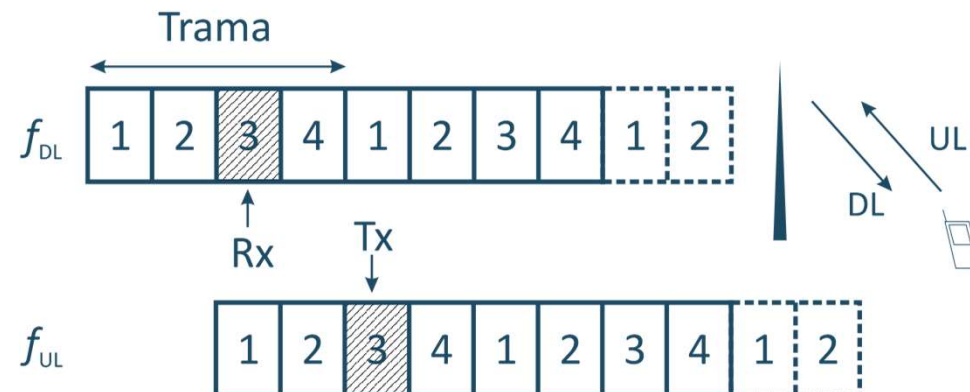
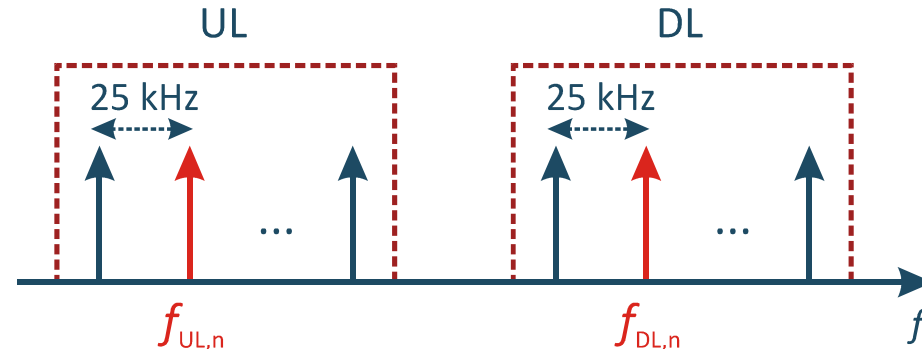
PEI: Peripheral Equipment Interface

RIU: Recording Information Unit

TE: Terminal Equipment

TETRA y DMR (IV)

- TETRA V+D: Multiacceso TDMA



TETRA y DMR (V)

■ TETRA: balance de enlace y cobertura celular

	Parámetro	DL	UL	Relación
A	Potencia del transmisor, P_t (dBm)	40	35	BTS (clase 4) y MS (clase 3)
B	Pérdidas terminales, L_{tt} (dB)	3,5	0	
C	Ganancia antena transmisión, G_t (dBi)	5,5	0	
D	PIRE (dBm)	42	35	$D=A-B+C$
E	Sensibilidad Rx, S (dBm)	-103	-106	
F	Degradación por ruido, D (dB)	3	2	
G	Margen desvanecimientos, M_L (dB)	8,3	8,3	$t \cdot \sigma_L$ ($t \approx 1,28$ ($\alpha=90\%$) y $\sigma_L = 6,5$ dB)
H	Ganancia antena recepción, G_r (dBi)	0	5,5	
I	Potencia isotropa, P_{iso} (dBm)	-91,7	-95,7	$I=E+F+G$
J	Pérdida máxima compensable, L_b (dB)	133,7	136,2	$J=D+H-I$
K	Cobertura rural, d (km)	15,45	18,20	Hata, $h_b=30$ m, $h_m=1,5$ m $f=410$ MHz

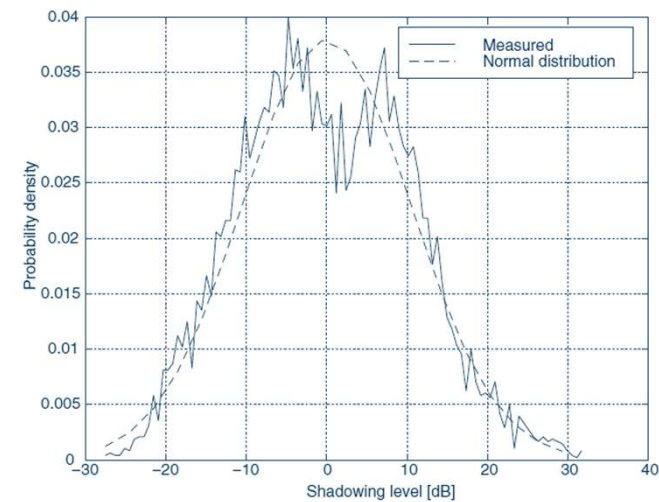
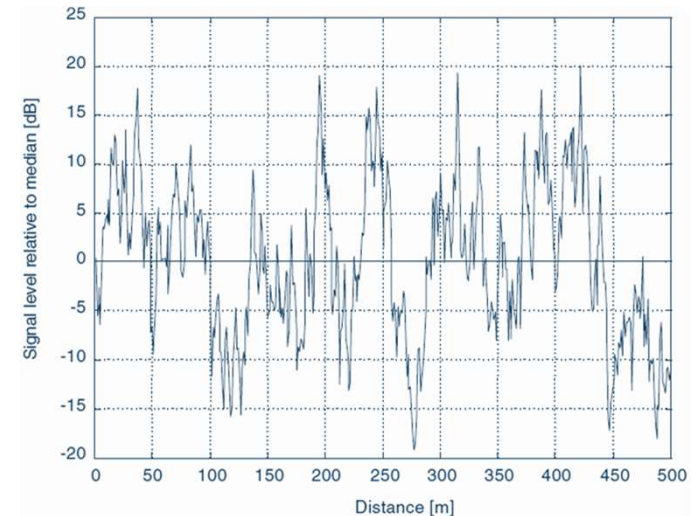
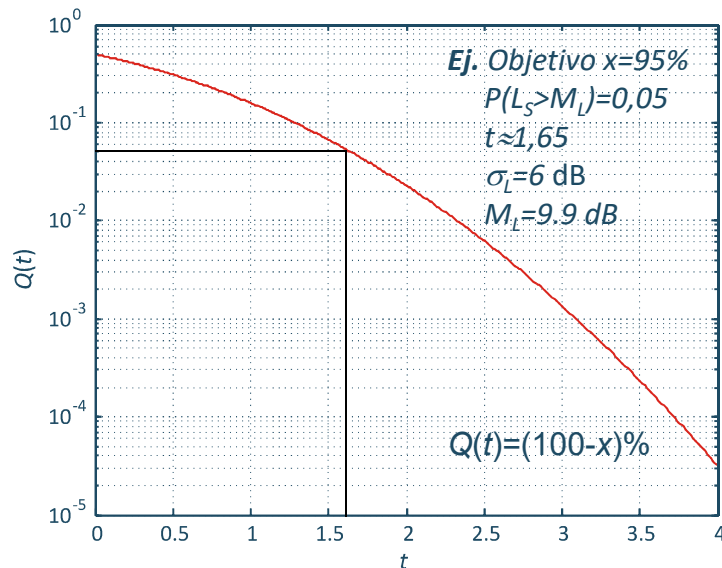
TETRA y DMR (VI)

- Shadowing: margen log-normal

$$p(L_s) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{L_s^2}{2\sigma_L^2}\right]$$

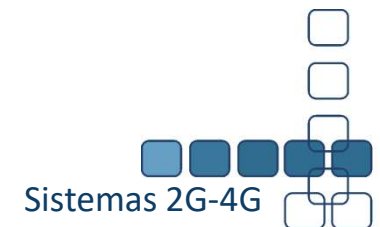
$$P[L_s > M_L] = \int_{M_L}^{\infty} p(L_s) dL_s = Q\left(\frac{M_L}{\sigma_L}\right)$$

$$M_L = t \sigma_L$$



TETRA y DMR (VII)

- DMR (*Digital Mobile Radio*)
 - ETSI – TS 102 361 parts 1-4, TR 102 398
 - Reemplaza a PMR analógicos de canales individuales y a los troncales MPT13XX
 - Proporciona servicios de voz (PTP y PTM) y datos
 - TDMA con 2 TS, modulación 4FSK y canalización de 12,5 kHz (*Tier I y II*)
 - Sistemas:
 - DMR *Tier I* (2005): redes sin licencia en 446 MHz, pot. máxima de 0.5 w
 - Redes sencillas, cobertura reducida y sin repetidores. FDMA
 - DMR *Tier II* (2005): redes con licencia en el rango 66-960 MHz
 - Sustituyen PMR analógicos, amplia cobertura, asignación rígida
 - DMR *Tier III* (2012): sistema troncal en el rango 66-960 MHz
 - Soporta voz y datos (mensajes cortos o paquetes IP v4 o IP v6)



TETRA y DMR (VIII)

- dPMR (*digital Private Mobile Radio*)
 - ETSI – TS 102 490 (*Tier I*) TS 102 658 (*Tier II*)
 - Solución PMR con capacidad de voz/datos de bajo coste y complejidad
 - FDMA, mod. 4FSK, 4800 bit/s y canalización de 6,25 kHz
 - Niveles funcionales dPMR (*Tier I, II*):
 - dPMR 446: sistemas sin licencia en 446 MHz con cobertura reducida (6 km), sin repetidores (PTP)
 - Mode 1: redes PMR con licencia, sin repetidores (PTP)
 - Mode 2: PMR convencional con licencia, repetidores y estaciones base. Gran cobertura
 - Mode 3: sistema troncal multi-emplazamiento con gestión de acceso y máxima funcionalidad

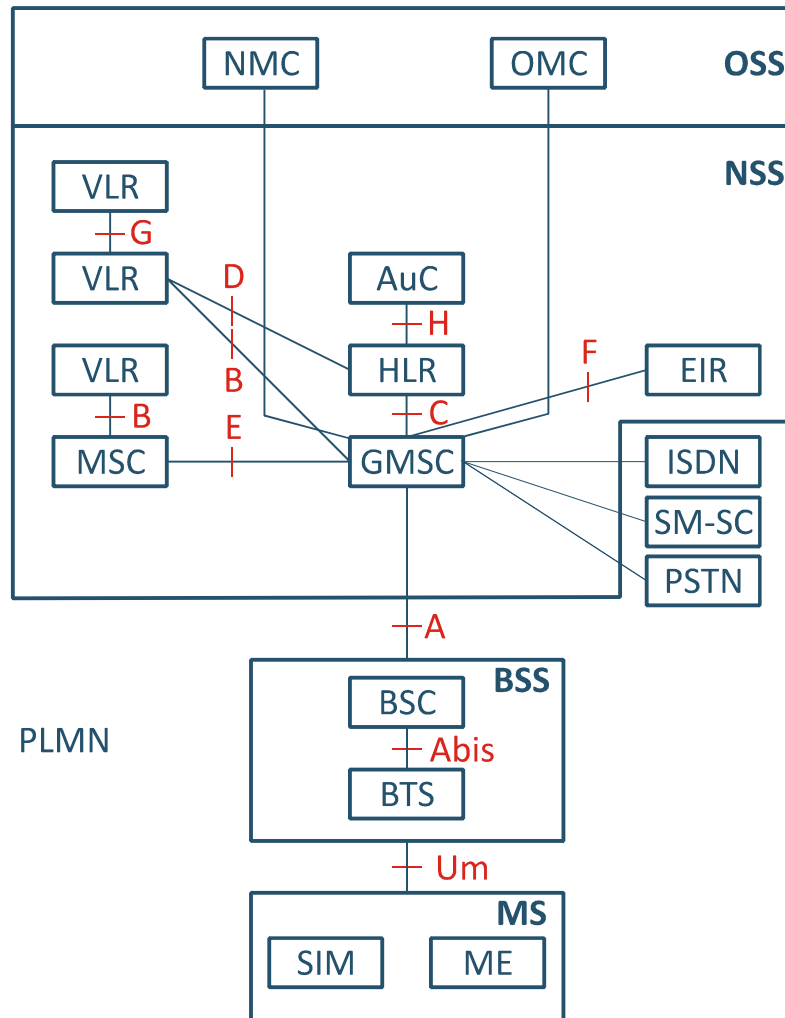


GSM (I)

- GSM (*Global System for Mobile communications*)
 - FDD/TDMA, radiocanales de 200 kHz
 - Modulación: GMSK con $B \cdot T = 0,3$ (270,83 kbit/s , $\eta = 1,35$ bit/s/Hz)
 - PIRE máxima estaciones base (GSM 900): 500 W
 - Rp: co-canal 9 dB, canal adyacente -9 dB
 - Dispersión Doppler compensable: 200 km/h
 - Dispersión temporal máxima ecualizable: 16 μ s
 - Estructura celular 3/9 ó 4/12 (urbano) y omnidireccional (rural)

GSM (II)

■ Arquitectura



AuC: Authentication Center

BSC: Base Station Controller

BTS: Base Transceiver Station

EIR: Equipment Identity Register

GMSC: Gateway MSC

HLR: Home Location Register

ISDN: Integrated Services Digital Network

MS: Mobile Station

MSC: Mobile Switching Center

NMC: Network Management Center

OMC: Operation and Maintenance Center

PLMN: Public Land Mobile Network

PSTN: Public Switched Telephone Network

SM-SC: Short Message Service Center

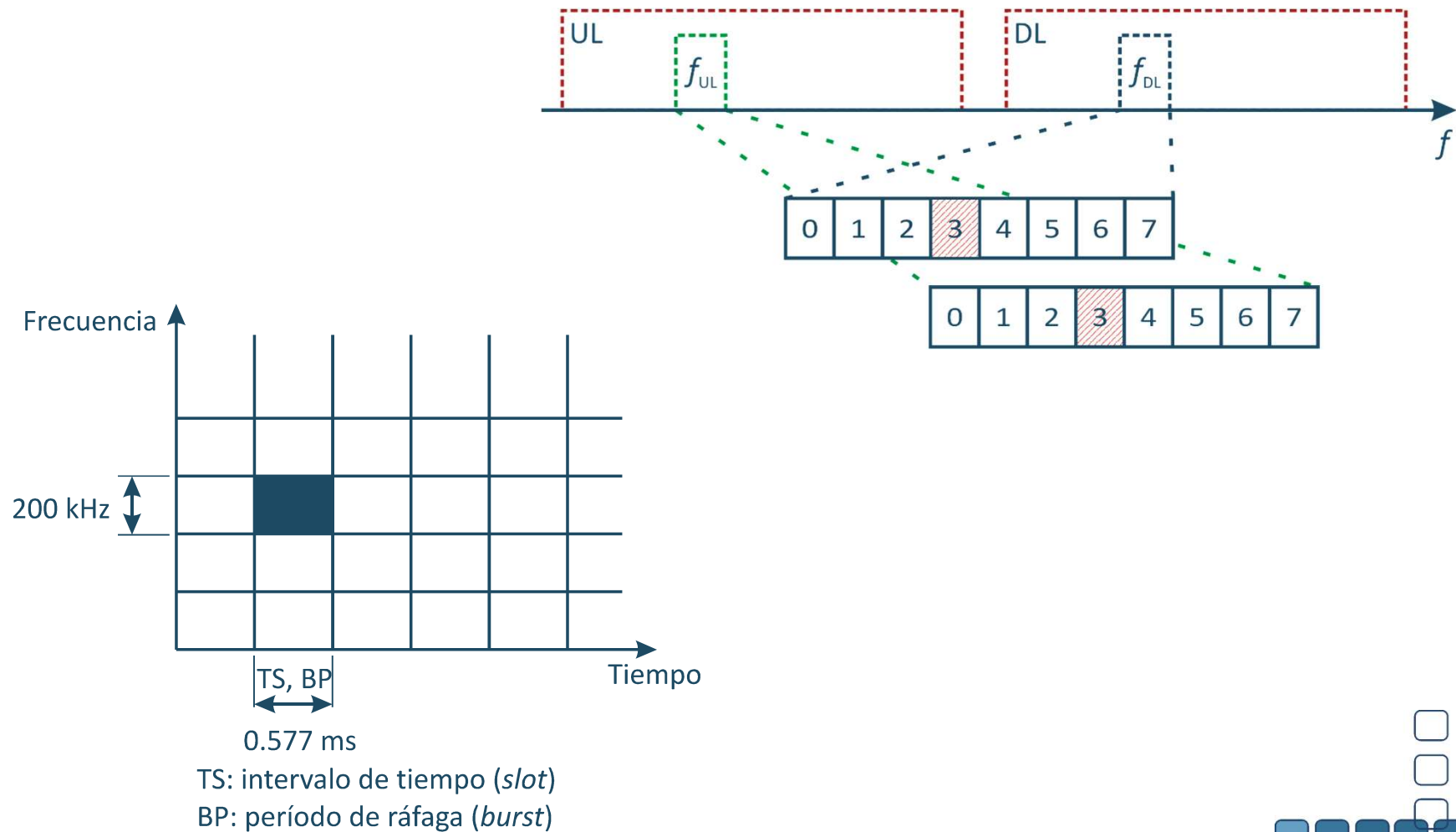
SIM: Subscriber Identity Module

VLR: Visitor Location Register

GSM (III)

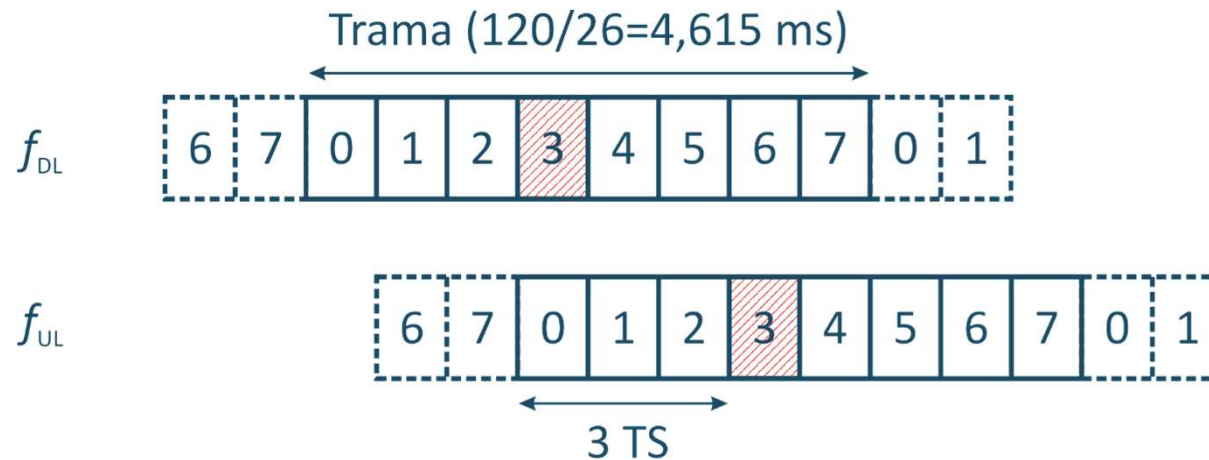
■ Canales

- Canal físico: intervalo temporal de un radiocanal → TDMA



GSM (IV)

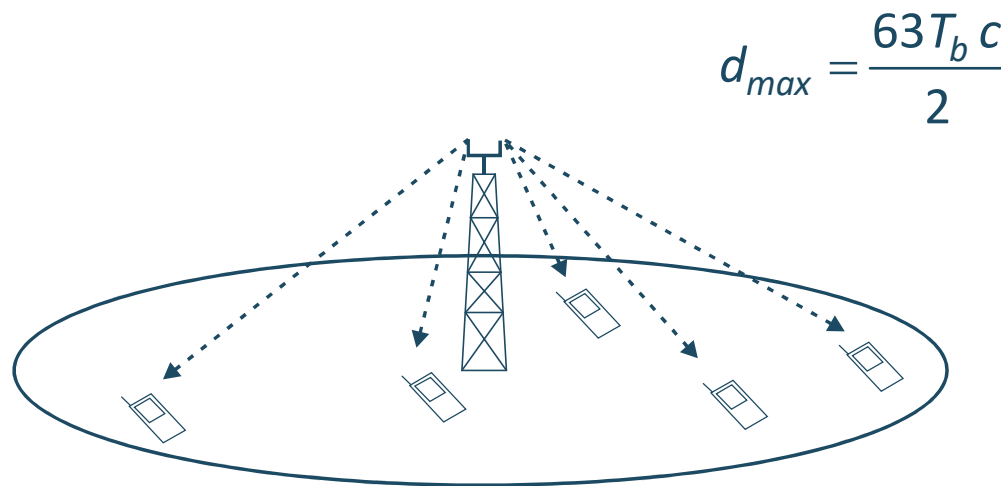
- TDMA: trama temporal



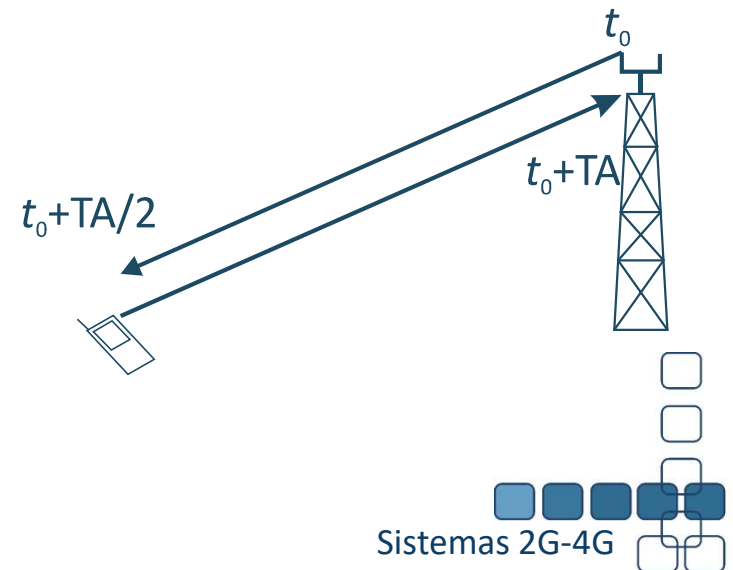
- Trama: 8 TS. Referencia de temporización: MF26 (120 ms) $\rightarrow$ TS=0,577 ms
- En 1 TS se transmiten 156,25 bits $\rightarrow$ Velocidad interfaz radio 270,833 kbit/s
- En BTS el comienzo de trama en UL se retrasa 3TS $\rightarrow$ Se evita duplexor en MS
- El MS aplica desplazamiento variable, TA (*Timing Advance*) $\rightarrow$ Propagación
- Fuera del TS, el terminal realiza medidas

GSM (V)

- Avance temporal
 - Compensación de distancia
 - Evitar colisiones por efecto cerca-lejos
 - MS adelanta transmisión 3TS – TA períodos de bit (TA, *Timing Advance*)
 - Cada unidad TA: 550 m. Si TA=1, MS entre 550 y 1100 m
 - TA: se codifica con 6 bits $\rightarrow d_{max} \approx 35$ km



$$d_{max} = \frac{63T_b c}{2}$$



Sistemas 2G-4G

GSM (VI)

- Compensación de distancia

- Si $TA = 1T_b$ (000001)

$$T_b = \frac{t_{TS}}{156.25} = \frac{0.577 \cdot 10^{-3}}{156.25} = 3.6928 \mu s$$

$$d = T_b \cdot c = 1107.84 \text{ m}$$

$$d' = \frac{d}{2} = 553.92 \text{ m}$$

$$d \in [553.92, 1107.84] \text{ m}$$

- Si $TA = 63T_b$ (111111)

$$d = 63 \cdot T_b \cdot c = 69784.7 \text{ m}$$

$$d_{max} = \frac{d}{2} = 34892.35 \text{ m}$$

$$d_{max} \in [34892.35, 35442] \text{ m}$$

GSM (VII)

- Balance del enlace: sensibilidad
 - Rec. GSM 05.05: valores de referencia de E_b/N_o y sensibilidad para distintos grados de calidad (BER, FER y RBER) y condiciones de propagación

$$S(\text{dBm}) = 10\log(kT_o) + 10\log(v_b \text{ (bit/s)}) + NF_r + \left(\frac{E_b}{N_o}\right)$$

$$\left. \begin{array}{l} k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \\ T_o = 290 \text{ K} \end{array} \right\} 10\log(kT_o) = -174 \text{ dBm/Hz}$$

$$v_b = 270,833 \text{ kbit/s} \rightarrow \frac{E_b}{N_o} = 8 \text{ dB}$$

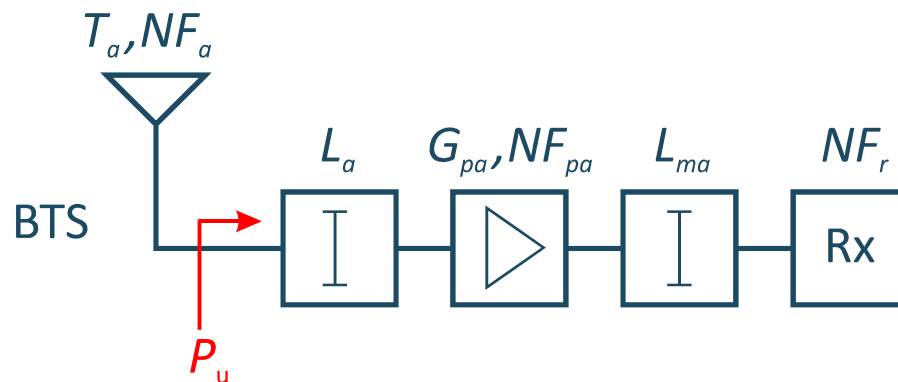
$$\text{BTS y MS} \rightarrow S = -104 \text{ dBm} \quad (NF_r = 8 \text{ dB})$$

GSM (VIII)

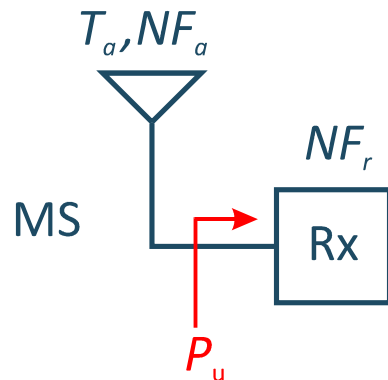
- Balance del enlace: potencia umbral

$$P_u(\text{dBm}) = S(\text{dBm}) + D(\text{dB})$$

$$D(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{F_{sis}}{F_r} \right)$$



$$F_{sis} = F_a - 1 + I_a F_{pa} + \frac{I_a}{g_{pa}} (F_r I_{ma} - 1)$$



$$F_{sis} = F_a - 1 + F_r$$

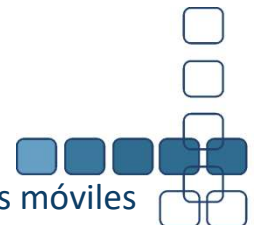
GSM (IX)

- Balance del enlace: pérdida compensable

$$P_{iso}(\text{dBm}) = S(\text{dBm}) + D(\text{dB}) + M_f(\text{dB}) + M_L(\text{dB})$$

$$M_f = 3 \text{ dB} \quad (\text{ETR103, GSM 03.30})$$

$$L_b(\text{dB}) = \text{PIRE}(\text{dBm}) - P_{iso}(\text{dBm}) + G_r(\text{dBi})$$



GSM (X)

■ Cuadro de balance de enlaces (GSM 03.30)

	Parámetro	DL	UL	Relación
A	Potencia del transmisor, P_t (dBm)	38	33	
B	Pérdidas combinador, L_c (dB)	3,5	--	
C	Pérdidas cables y conectores, L_f (dB)	2,3	--	
D	Ganancia antena transmisión, G_t (dBi)	14	-3	Efecto del cuerpo del usuario (3 dB)
E	PIRE (dBm)	46,2	30	
F	Sensibilidad del receptor, S (dBm)	-102	-104	$NF_r=10$ dB (DL) y $NF_r=8$ dB (UL)
G	Degradación por ruido, D (dB)	2,8	2,2	
H	Margen interferencia, M_i (dB)	3	3	
I	Margen desvanecimientos, M_L (dB)	9	9	$t \approx 1,28$ ($x=90\%$) y $\sigma_L = 7$ dB
J	Ganancia antena recepción, G_r (dBi)	-3	12	usuario (3 dB) y diversidad (3 dB)
K	Potencia isotropa, P_{iso} (dBm)	-87,2	-89,8	$K=F+G+H+I$
L	Pérdida máxima compensable, L_b (dB)	130,4	131,8	$L=E-K+J$
M	Cobertura en exteriores, d (km)	1,25	1,42	Se considera Hata, $h_b=30$ m, $h_m=1,5$ m
N	Cobertura en interiores, d (km)	0,47	0,53	Hata con L_b-15 dB (penetración)

GSM (XI)

■ Okumura-Hata

Áreas urbanas $L = A + B \cdot \log d - E$ (dB)

Áreas suburbanas $L = A + B \cdot \log d - C$ (dB)

Áreas abiertas $L = A + B \cdot \log d - D$ (dB)

Unidades:
 $f \rightarrow$ MHz
 $d \rightarrow$ km
 $h_b, h_m \rightarrow$ m

$$A = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_b$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log h_b$$

$$C = 2(\log(f/28))^2 + 5.4$$

$$D = 4.78 (\log f)^2 - 18.33 \log f + 40.94$$

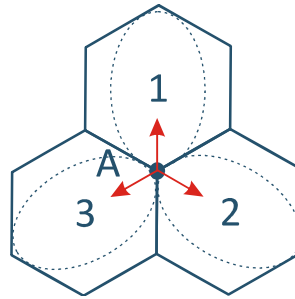
$$E = 3.2(\log(11.75 h_m))^2 - 4.97 \quad \text{ciudades grandes, } f \geq 300 \text{ MHz}$$

$$E = 8.29(\log(1.54 h_m))^2 - 1.1 \quad \text{ciudades grandes, } f < 300 \text{ MHz}$$

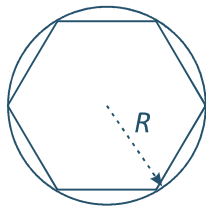
$$E = (1.1 \log f - 0.7) h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad \text{ciudades medias y pequeñas}$$

GSM (XII)

- Agrupaciones trisectorizadas 3/9 ó 4/12



- Sistemas clásicos



$$S_c = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2}$$

$$J = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R} \right)^2$$

$$S_{rc} = \frac{3\sqrt{3}R^2J}{2}$$

$$Q = E \left[\frac{S_T}{S_{rc}} \right] + 1$$

- Grado de servicio y capacidad de usuarios

$$p = 1 - (1 - p_b)p_c$$

$$GOS(\%) = 100p$$

$$N = \frac{C}{J}$$

$$m = \frac{A}{a}$$

$$M = QJm$$

UMTS (I)

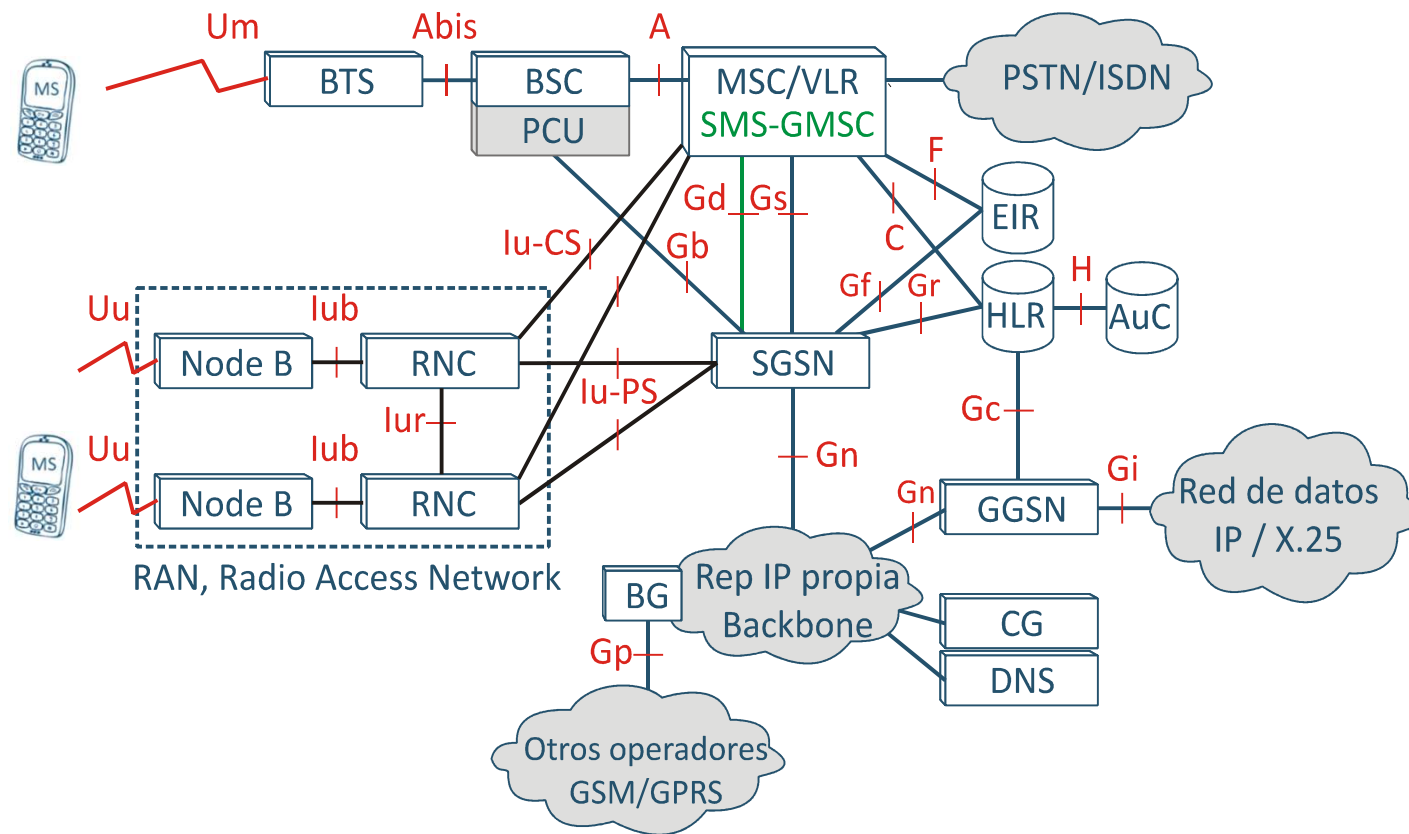
- UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*)
 - 3GPP: TS 25.-series (especificaciones de UTRAN)
 - Ensanchamiento espectral (códigos OVSF y PN), 5 MHz
 - Control rápido de potencia: 1500 veces/seg
 - Modos de operación FDD y TDD
 - UTRA FDD: WCDMA y modulación QPSK (estrictamente dual BPSK en UL)
 - UTRA TDD: TD-CDMA (WCDMA + TDMA) y modulación QPSK
 - Velocidad flexible, hasta 2 Mbit/s
 - Establecimiento simultáneo de varias conexiones, ej. voz y datos (multiRAB)



UMTS (II)

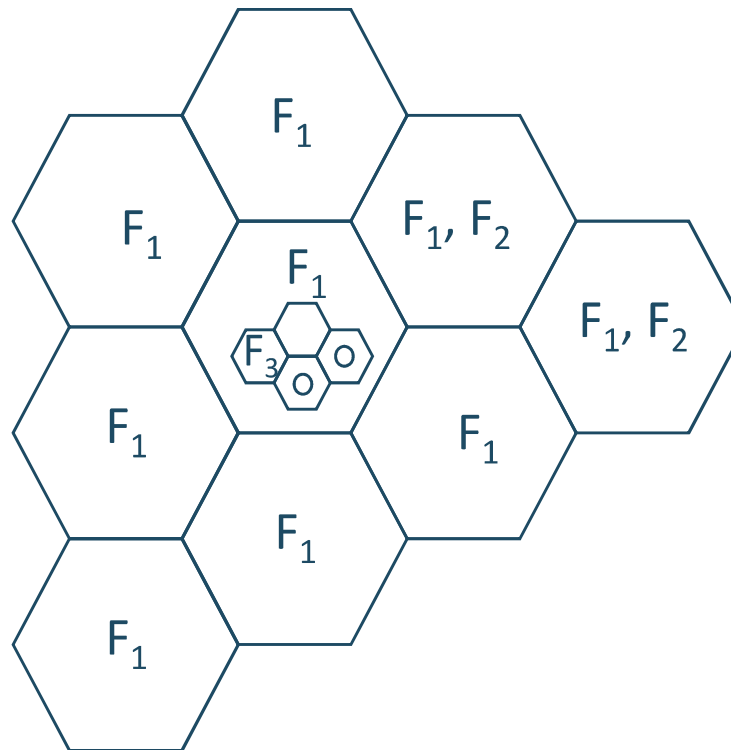
■ Arquitectura

- Release 99: CN de GSM/GPRS → Red IP (All IP) → Releases 6, 7,..., 13



UMTS (III)

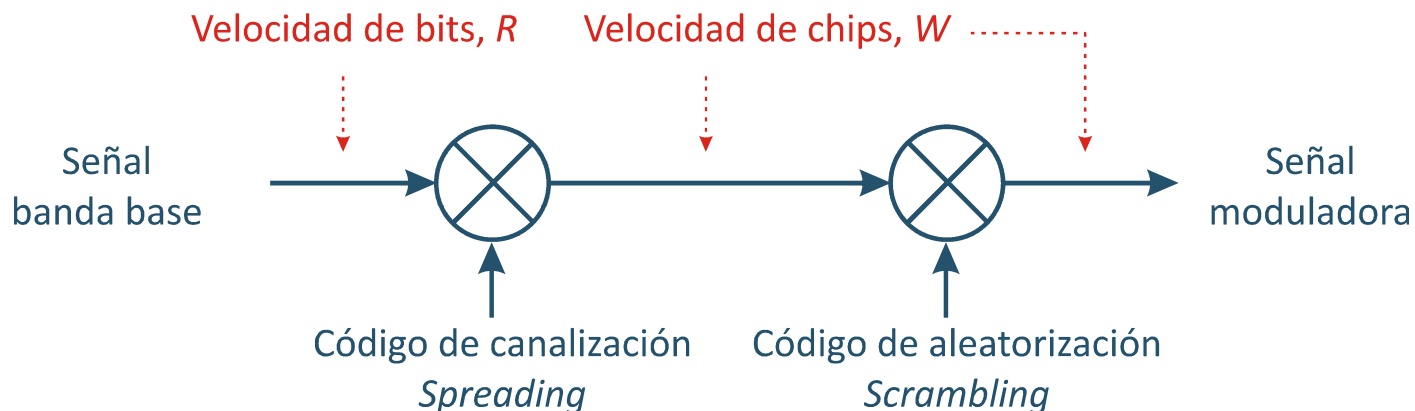
- Estructura celular jerárquica
 - UTRA FDD: macro y microcélulas (144-384 kbit/s)
 - UTRA TDD: micro y picocélulas (hasta 2 Mbit/s)



UMTS (IV)

■ WCDMA

- Secuencias de canalización
 - Códigos cortos y ortogonales entre sí
 - Factor de ensanchamiento variable SF (*Spreading Factor*) → **3,84 Mchip/s**
- Secuencias de aleatorización
 - Identifican a las celdas en DL y diferencian a los usuarios en el UL
 - Permiten utilizar mismos códigos de canalización en varias celdas



■ Capacidad celular

- WCDMA: sistema limitado por interferencia
- La capacidad multiacceso depende de la interferencia total recibida, del tipo de servicio y difiere según el enlace:
 - UL: Si aumentan los usuarios aumenta la interferencia y la potencia en los UE para misma SIR, hasta llegar al límite de capacidad
 - DL: Límite cuando la potencia del Nodo B iguala a la máxima disponible

$$\frac{P_{r_{ik}}}{I_{tot} + P_n} \cdot \frac{W}{R_k} \leq \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_k$$

- Cálculos de capacidad complicados y aproximados
- Aproximación en cálculos analíticos (UL): control de potencia ideal, distribución de carga uniforme en la célula, un solo tipo de servicio

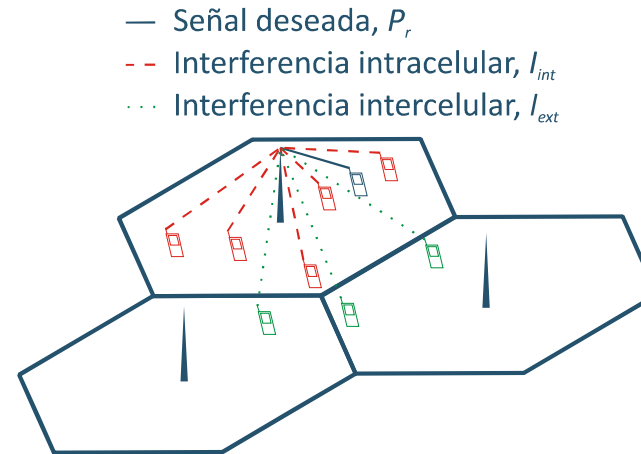
■ Capacidad celular: UL

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_r / R}{(I_{int} + I_{ext} + P_n) / W}$$

$$f = 1 + \frac{I_{ext}}{I_{int}}$$

$$I_{int} = P_r (N-1) \alpha$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_r}{P_r (N-1) \alpha f + P_n} G_p$$



- E_b/N_0 : umbral para BER asociada
- P_r : potencia recibida
- W : tasa de chips
- R : velocidad binaria del servicio
- I_{int}, I_{ext} : interferencia inter e intracelular
- P_n : potencia de ruido térmico
- f : factor de reutilización
- α : factor de actividad, $\alpha < 1$

■ Capacidad celular: UL

$$P_r = \frac{P_n}{\frac{G_p}{E_b/N_0} - (N-1)\alpha f}$$

$$N_{\max} = 1 + \frac{G_p}{\alpha f (E_b/N_0)}$$

$$X = \frac{N-1}{N_{\max}-1}$$

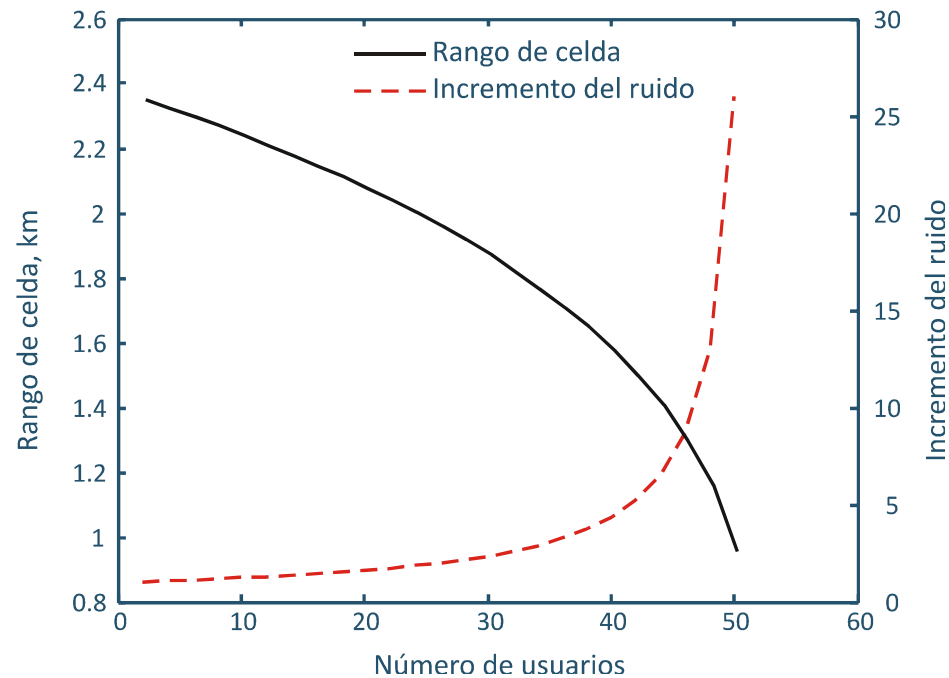
$$S = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{1}{1-X} \cdot K T_0 R F_r$$

$$S(\text{dBm}) = -174 + N F_r(\text{dB}) + 10 \log R(\text{bit} / \text{s}) + \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{dB}} - 10 \log(1-X)$$

- $N \uparrow \rightarrow P_r \uparrow \rightarrow P_t \uparrow$
- Capac. asintótica, $N_{\max}: P_r \rightarrow \infty, P_t \rightarrow \infty$
- Factor de carga, $X: N \ll N_{\max}$

UMTS (VIII)

- Capacidad celular: UL
 - Capacidad y cobertura están relacionados



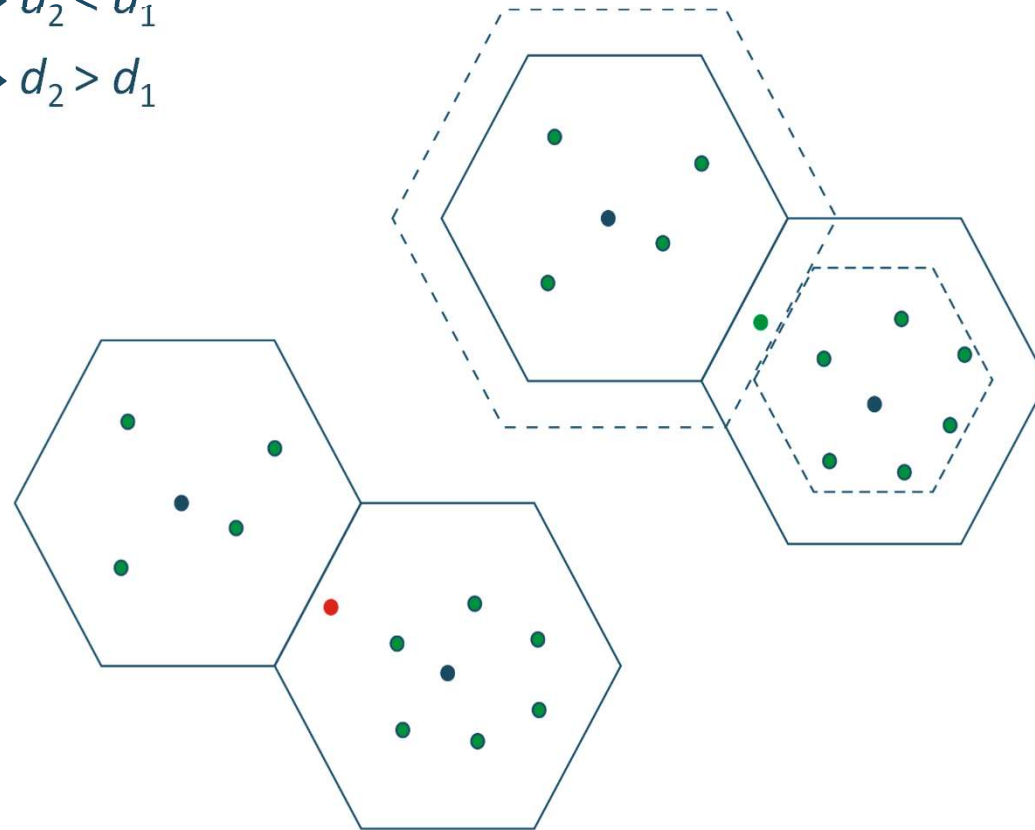
$$NFR = \frac{I_{int} + I_{ext} + P_n}{P_n}$$

$$NFR = \frac{1}{1 - X}$$

UMTS (IX)

■ Capacidad celular: respiración celular

- $X_1 \rightarrow d_1$
 - Si $X_2 > X_1 \rightarrow d_2 < d_1$
 - Si $X_2 < X_1 \rightarrow d_2 > d_1$



UMTS (X)

- Capacidad celular: tráfico
 - Aprox. de Viterbi: relaciona GOS (p_{out}) e intensidad de tráfico (A) considerando α , f y desviación del control de potencia, σ_c

$$p_{out} = Q\left(\frac{N' - \alpha A f \varphi_c}{e^{(\gamma \sigma_c)^2} \sqrt{\alpha A f}}\right)$$

$$A = \frac{N'}{\alpha f} F(B, \sigma_c)$$

$$N' = \frac{G_p X_{UL}}{(E_b/N_0)}$$

$$B = \frac{[Q^{-1}(p_{out})]^2}{N'}$$

$$F(B, \sigma_c) = \frac{1}{\varphi_c} \left[1 + \frac{\varphi_c^3 B}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4}{\varphi_c^3 B}} \right) \right]$$

$$\gamma = \ln(10)/10$$

$$\varphi_c = e^{(\gamma \sigma_c)^2 / 2}$$



UMTS (XI)

- Capacidad celular: múltiples servicios
 - M usuarios de S servicios distintos

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_j = \frac{P_{r,j}/R_j}{\left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M \alpha_i P_{r,i} + P_n \right) / W} = \frac{P_{r,j}}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M \alpha_i P_{r,i} + P_n} \cdot G_{p,j}$$

- Factor de carga

$$\lambda_j = \frac{\alpha_j}{\alpha_j + \frac{G_{p,j}}{(E_b/N_0)_j}}$$

$$NFR = \frac{I_{tot}}{P_n} = \frac{1}{1 - X_{UL}} \quad M_i = -10 \log(1 - X_{UL})$$

$$X_{UL} = \sum_{m=1}^M \lambda_m = \lambda_1 \cdot M_1 + \lambda_2 \cdot M_2 + \dots + \lambda_S \cdot M_S$$

$$X_{UL} = f \sum_{m=1}^M \lambda_m$$

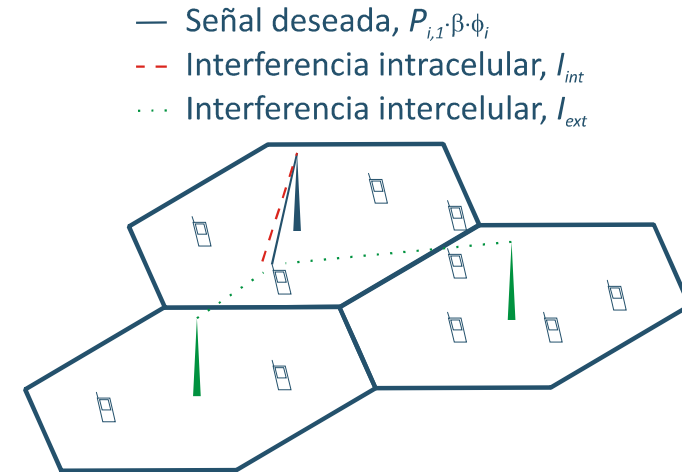
UMTS (XII)

■ Capacidad celular: DL

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_{i,1} \beta \phi_i / R_i}{(I_{int} + I_{ext} + P_n) / W}$$

$$I_{int} = P_{i,1} (1 - \beta \phi_i) (1 - o_i)$$

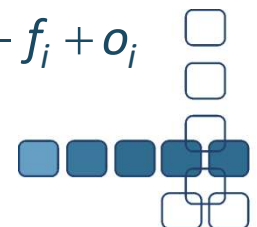
$$I_{ext} = \sum_{j=2}^J P_{i,j} = \sum_{j=1}^J P_{i,j} - P_{i,1} = (f_i - 1) P_{i,1}$$



- β : % pot. asignada a canales de tráfico
- $P_{i,1} \beta \phi_i$: % pot. asignada a usuario i -ésimo
- o : factor de ortogonalidad, $o \in [0,1] \rightarrow I_{int}$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_{i,1} \beta \phi_i G_{p,i}}{P_{i,1} (1 - \beta \phi_i) (1 - o_i) + P_{i,1} (f_i - 1) + P_n}$$

$$P_{i,1} = \frac{P_n}{\beta \phi_i \left(\frac{G_{p,i}}{E_b/N_0} + 1 - o_i \right) - f_i + o_i}$$



UMTS (XIII)

■ Cobertura celular

- La potencia requerida y el alcance dependen de usuarios activos en la célula
- Análisis aproximado. Con varios servicios se busca el más limitante en UL y DL
- Con tráficos mixtos, el análisis de cobertura y capacidad más fiable se hace mediante simulaciones

$$PIRE(\text{dBm}) = P_t + G - L$$

$$S(\text{dBm}) = -174 + 10\log(R(\text{bit/s})) + NF_r + \left(\frac{E_b}{N_o}\right) + M_f$$

$$L_{max}(\text{dB}) = PIRE - S + G_r + G_{SHO} + G_{div} - L_{edif+otros}$$



UMTS (XIV)

■ Balance de enlaces: ejemplo voz

Parámetro	UL	DL	Consideraciones
Velocidad del servicio, R (bit/s)	12200	12200	
Potencia c. tráfico, P_t (dBm)	21	42,5	Potencia Nodo B: 43 dBm ($\beta=0,9$)
Potencia media/usuario, P_u (dBm)	21	28,6	Se consideran 25 usuarios
Factor actividad y reutilización, α/f	0,4/1,6	0,4/1,6	
Pérdidas cables y conectores Tx/Rx, L_f (dB)	0/3	3/0	
Ganancia antena Tx/Rx, $G_{t/r}$ (dBi)	0/18	18/0	
$PIRE$ (dBm)	21	43,6	
Figura de ruido del RX, NF_r (dB)	2	8	
Factor de carga, X (%)	55	55	
Factor de ortogonalidad, α	0	0,4	
Margen de interferencia, M_i (dB)	3,5	1,1	$M_i = -10 \log(1-X)$
Desv. típica del control de pot., σ_c (dB)	2	2	$\rho_c = \exp((\gamma \sigma_c)^2/2)$,, $\gamma = \ln(10)/10$
E_b/N_0 (objetivo/efectiva) (dB)	5,3/5,8	7,9/8,4	$(E_b/N_0)_{ef} = (E_b/N_0)_{obj} + 10 \log(\rho_c)$
Sensibilidad del receptor, S (dBm)	-121,8	-115,6	$S = -174 + NF_r + 10 \log(R(\text{bit/s})) + (E_b/N_0)_{ef} + M_i$
Ganancia por SHO/diversidad (dB)	2/2	2/0	Macrodiversidad y diversidad
Pérdidas: pen. edificios/cuerpo (dB)	15/2,5	15/2,5	
Margen log-normal (dB)	10,2	10,2	Desv. lentos, $t \approx 1,28$ ($x=90\%$) y $\sigma_L = 8$ dB
Atenuación máxima, L_{max} (dB)	134,1	133,5	HATA-COST231 con $f_{UL}=1950$ MHz, $f_{DL}=2140$ MHz, $h_b=25$ m y $h_m=1,5$ m (otros modelos)
Cobertura, d (km)	0,755	0,665	Equilibrio de enlaces

UMTS (XV)

Balance de enlaces: ejemplo datos

Parámetro	UL	DL	Consideraciones
Velocidad del servicio, R (bit/s)	384000	384000	
Potencia disponible (dBm)	21	39,16	
Potencia Tx por UEs en borde, P_t (dBm)	21	33,04	
Ganancia antena Tx/Rx, $G_{t/r}$ (dBi)	0/18	18/0	
Pérdidas cables y conectores Tx/Rx, L_f (dB)	0/3	3/0	
$PIRE$ (dBm)	21	48,04	
Figura de ruido del RX, NF_r (dB)	2	8	
Factor de carga, X (%)	47,51	65	
Factor de ortogonalidad, o	0	0,4	
Margen de interferencia, M_I (dB)	2,80	1,31	$M_I = -10\log(1-X)$
Desv. típica del control de pot., σ_c (dB)	1,50	1,50	$\rho_c = \exp((\gamma\sigma_c)^2/2)$,, $\gamma = \ln(10)/10$
E_b/N_0 (objetivo/efectiva) (dB)	1,3/1,56	1,10/1,36	$(E_b/N_0)_{ef} = (E_b/N_0)_{obj} + 10\log(\rho_c)$
Sensibilidad del receptor, S (dBm)	-111,80	-107,49	$S = -174 + NF_r + 10\log(R(\text{bit/s})) + (E_b/N_0)_{ef} + M_I$
Ganancia por SHO + diversidad (dB)	5	2	Macrodiversidad y diversidad
Pérdidas: pen. edificios/cuerpo (dB)	15/0	15/0	
Margen log-normal (dB)	8	8	
Atenuación máxima, L_{max} (dB)	129,80	134,53	HATA-COST231 con $f_{UL}=1950$ MHz, $f_{DL}=2140$ MHz, $h_b=25$ m y $h_m=1,5$ m (otros modelos)
Cobertura, d (km)	0,572	0,711	Equilibrio de enlaces

- Hata-COST231

- Extensión del modelo de Okumura-Hata para ($1500 < f < 2000$ MHz)

$$L = F + B \log d - E + G \quad (\text{dB})$$

Unidades:
 $f \rightarrow \text{MHz}$
 $d \rightarrow \text{km}$
 $h_b, h_m \rightarrow \text{m}$

$$F = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_b$$

B y $E \equiv$ se definen como en el modelo original de Okumura-Hata

$G = 0$ dB ciudades de tamaño medio y áreas suburbanas

$G = 3$ dB para áreas metropolitanas

LTE (I)

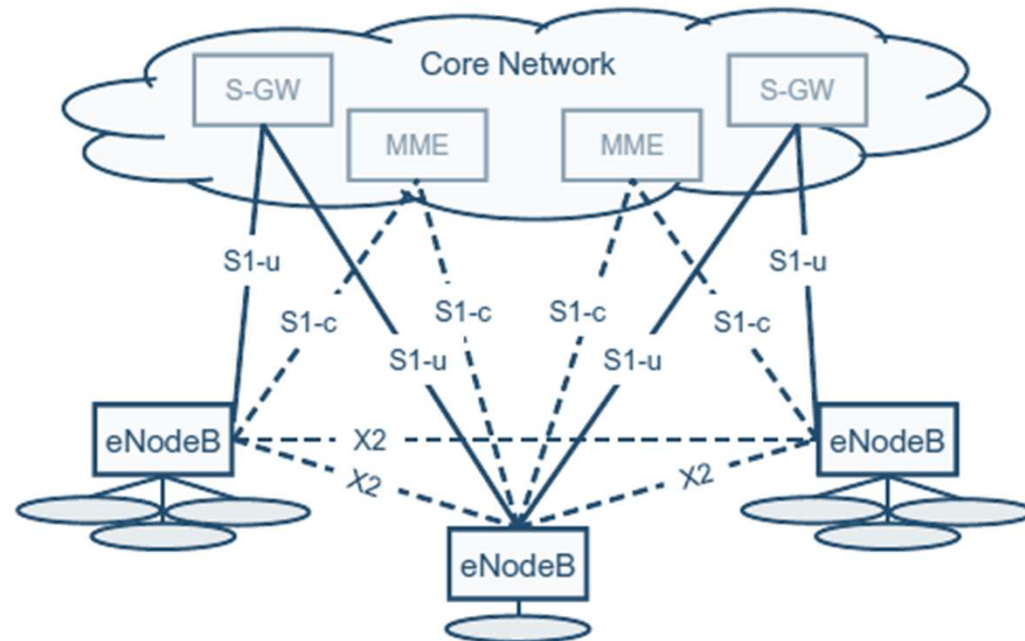
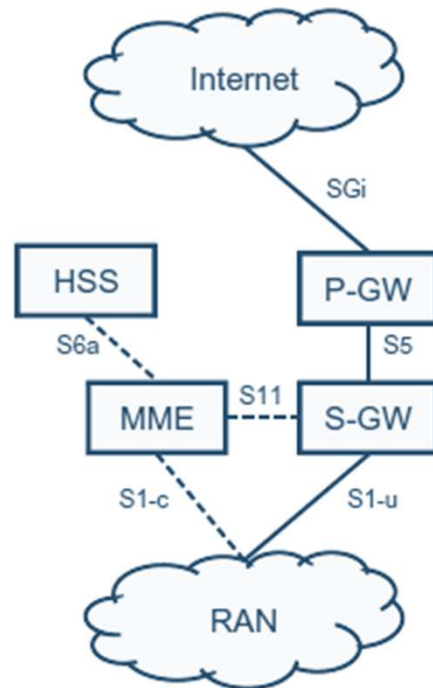
- LTE (*Long Term Evolution*), Características (LTE - *release 8*)
 - Flexibilidad del espectro: 900 / 1800 / 2000 / 2600 MHz (y otras)
 - Flexibilidad de ancho de banda (1,4 / 3 / 5 / 10 / 15 / 20 MHz)
 - Tasas de 100 Mbit/s en DL y 50 Mbit/s en UL
 - Retardos reducidos en establecimiento y transmisión (latencia inferior a 10 ms)
 - Modos dúplex FDD y TDD
 - Multiacceso OFDMA en DL y DFTS-OFDM (SC-FDMA) en UL
 - Modulaciones QPSK, 16QAM y 64 QAM
 - Técnicas multiantena: diversidad, conformación de haces (*beamforming*) y MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*)
 - Técnicas de protección frente a las variaciones del canal: *rate control, channel-dependent scheduling, hybrid ARQ with soft combining*
 - Coordinación de interferencia (ICIC, Inter-Cell Interference Coordination)
 - Difusión mediante SFN (MBSFN, *Multicast Broadcast SFN*)



LTE (II)

■ Arquitectura

- LTE RAN (*Radio Access Network*) y núcleo de red EPC (*Evolved Packet Core*)



[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

eNodeB: E-UTRAN NodeB
HSS: Home Subscriber Server
MME: Mobility Management Entity

P-GW: Packet-Data Network Gateway
S-GW: Serving Gateway

Sistemas 2G-4G



■ Arquitectura

– Núcleo de red (EPC)

- HSS: base de datos con información de suscripción del usuario
- MME: nodo que maneja claves y estados del UE (IDLE → ACTIVE)
- P-GW: conecta EPC a internet con asignación de direcciones IP y aplicación de QoS según PCRF (*Policy and Charging Rules Function*)
- S-GW: nodo que conecta EPC y LTE RAN con apoyo a la movilidad de los usuarios entre eNodeBs o entre tecnologías

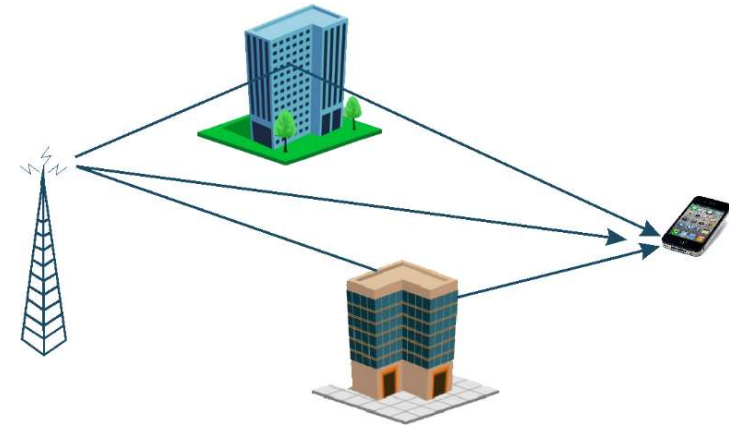
– Red de acceso radio (LTE RAN)

- Arquitectura plana con eNodeB
 - Responsable de funciones radio en una o varias células (nodo lógico)
 - Conexión con EPC a través de interfaz S1 (c-plano control u-plano usuario)
 - La interfaz X2 soporta movilidad de usuarios y otras funciones (ICIC)
- Nuevos nodos en releases 9 y 10 al introducir otras funciones

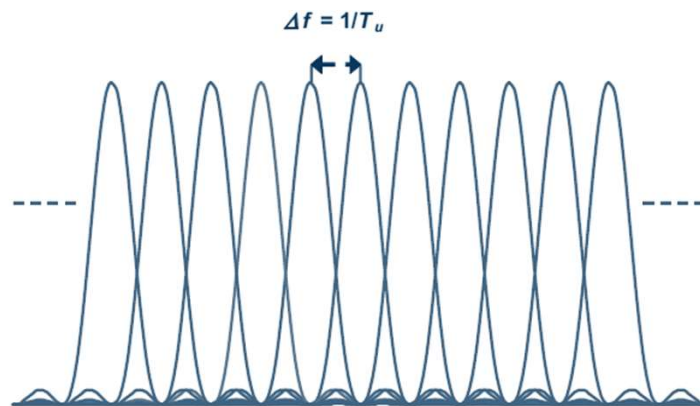


LTE (IV)

- OFDM: transmisión multi-portadora



- Múltiples señales de banda estrecha multiplexadas en frecuencia (OFDM)
- Inconveniente UL: variaciones en la potencia instantánea afectan al consumo del transmisor y al coste del amplificador (DFTS-OFDM)

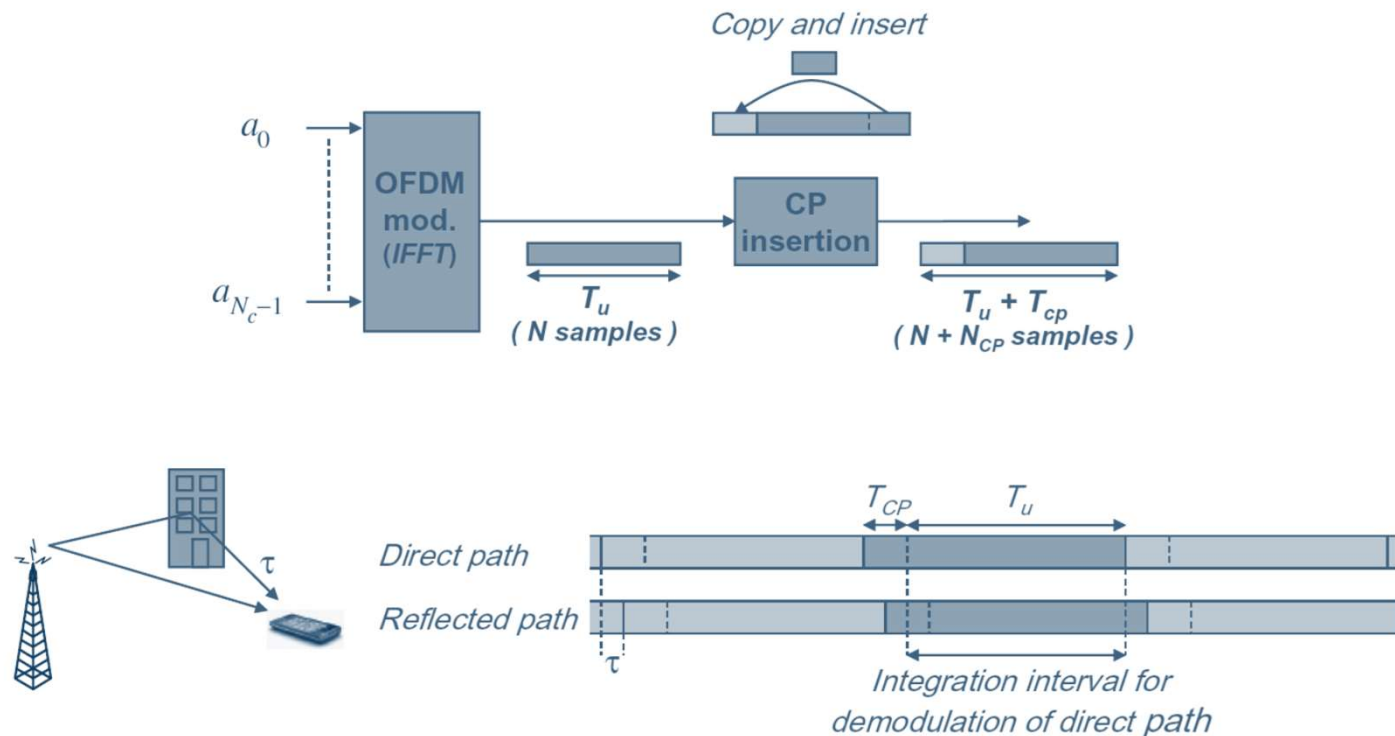


$T_u \equiv$ tiempo útil del símbolo de modulación por subportadora

$\Delta f \equiv$ separación entre subportadoras



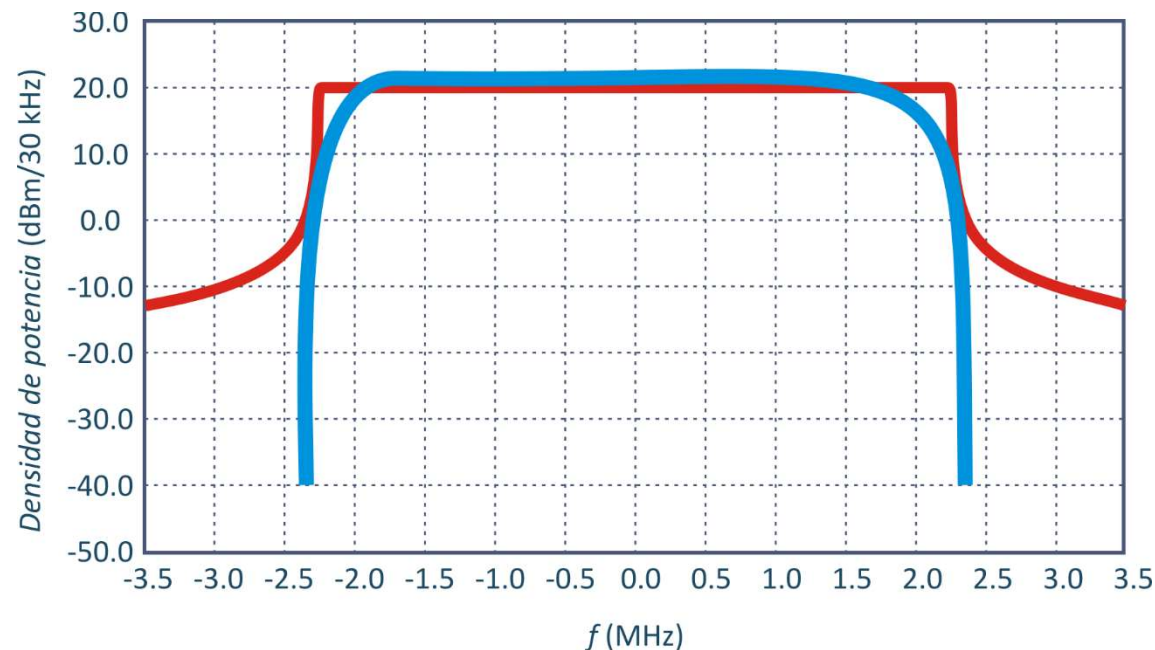
- OFDM: prefijo cíclico
 - Protección frente a la dispersión temporal del canal radio
 - $T = T_{cp} + T_u$: Reducción de la tasa de símbolos OFDM
 - Si $\Delta f \downarrow \rightarrow T_u \uparrow \rightarrow T_u/T \uparrow$: sensibilidad a dispersión Doppler o ruido de fase
 - Ortogonalidad si la dispersión temporal es inferior a $T_{cp} \rightarrow$ ¿distancia?



Inserción del prefijo cíclico. [7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

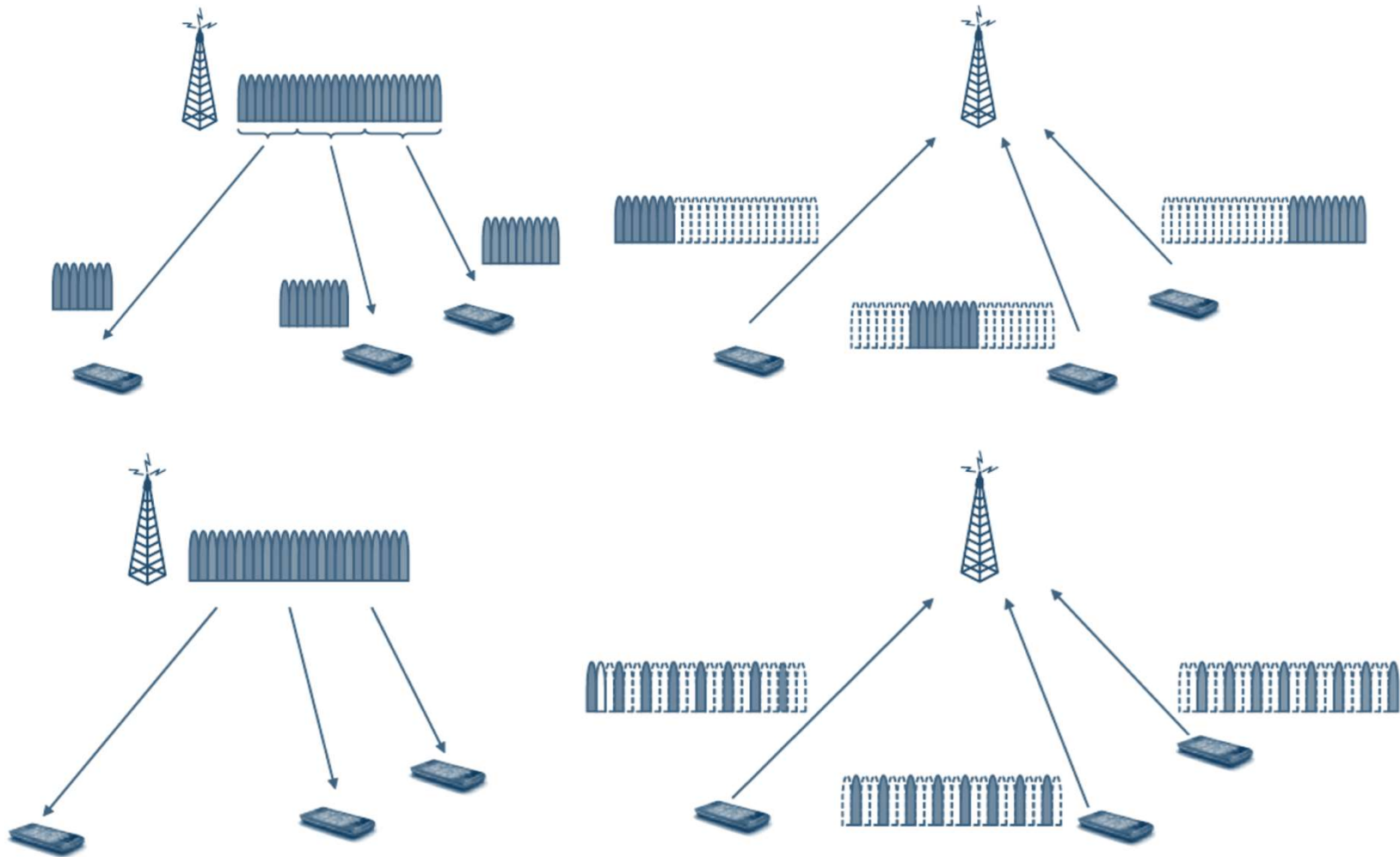
LTE (VI)

- OFDM: ancho de banda de la señal
 - En primera aproximación: $B = N_c \cdot \Delta f$
 - Emisiones fuera de banda asociadas a los lóbulos laterales de subportadoras: aplicar filtrado o enventanado en el dominio del tiempo
 - En la práctica se requiere del orden de un 10% de banda de guarda:
 - *Ejemplo:* para canalización de 5 MHz, $\Delta f = 15$ kHz, $N_c = 300$ y $B = 4,5$ MHz



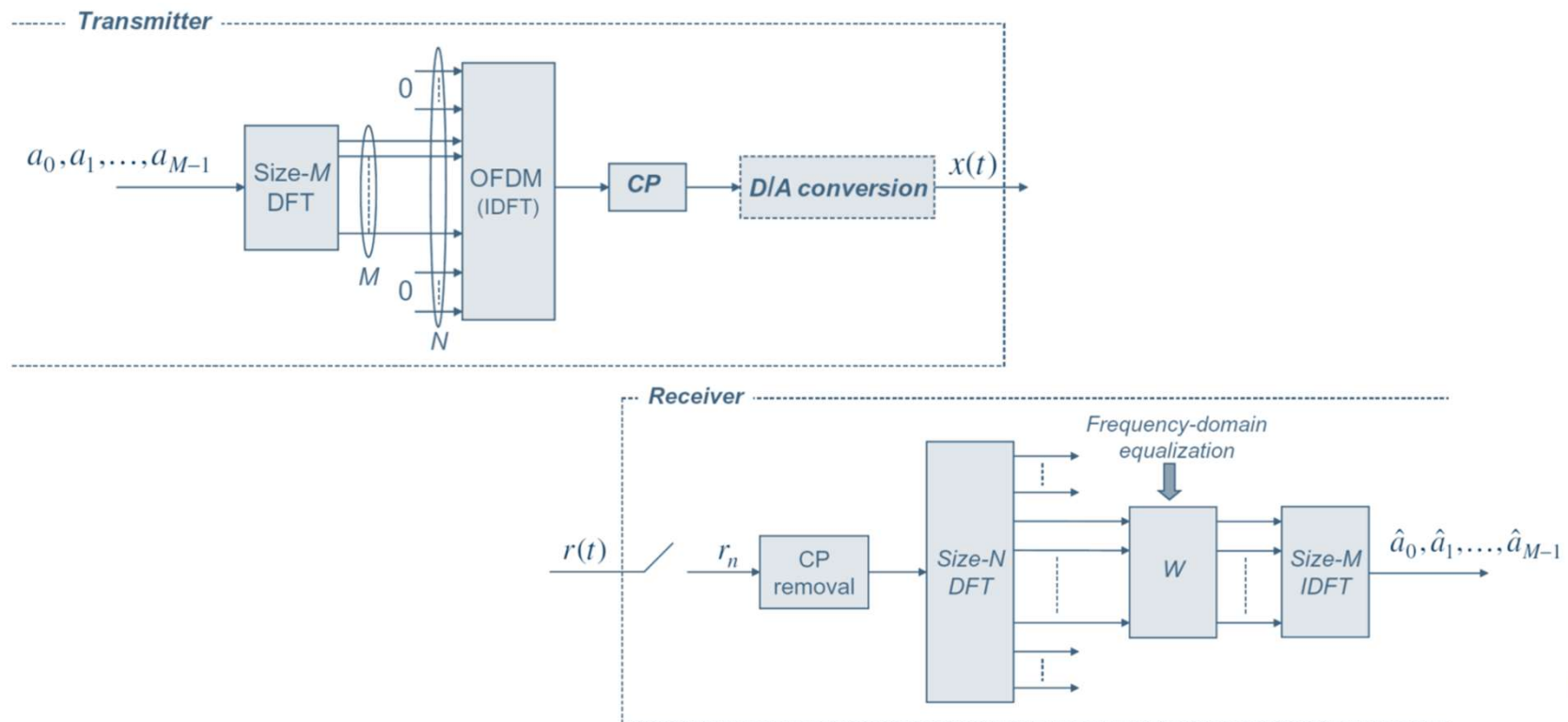
LTE (VII)

■ OFDMA



[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

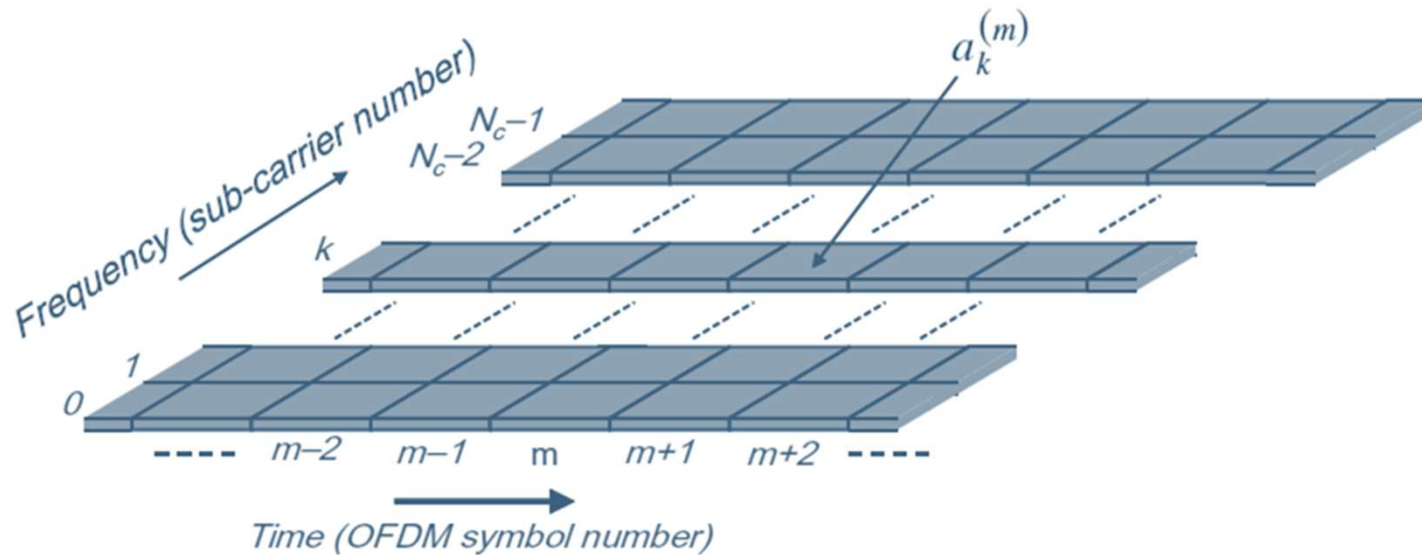
- UL: DFTS-OFDM (*DFT Spread OFDM*) o SC-FDMA
 - Inconveniente OFDM: variaciones importantes en la potencia instantánea de la señal transmitida con baja eficiencia del amplificador de potencia → consumo de potencia y coste de UE en UL



[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

LTE (IX)

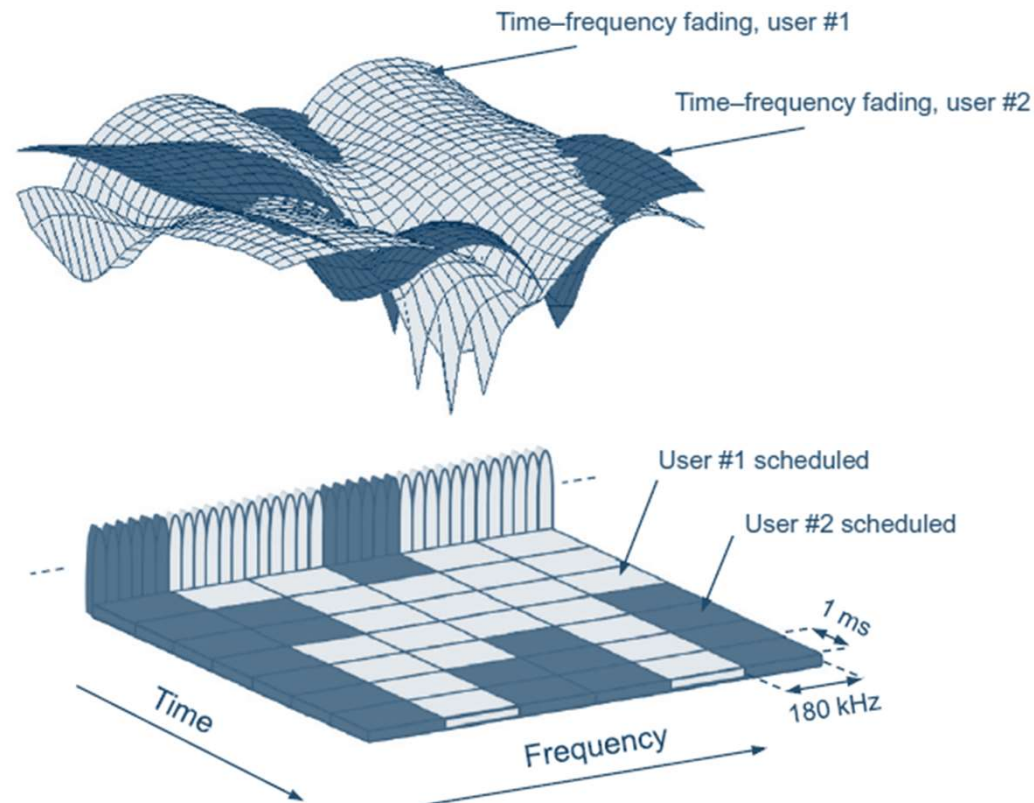
▪ Recurso físico en la transmisión OFDM



[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

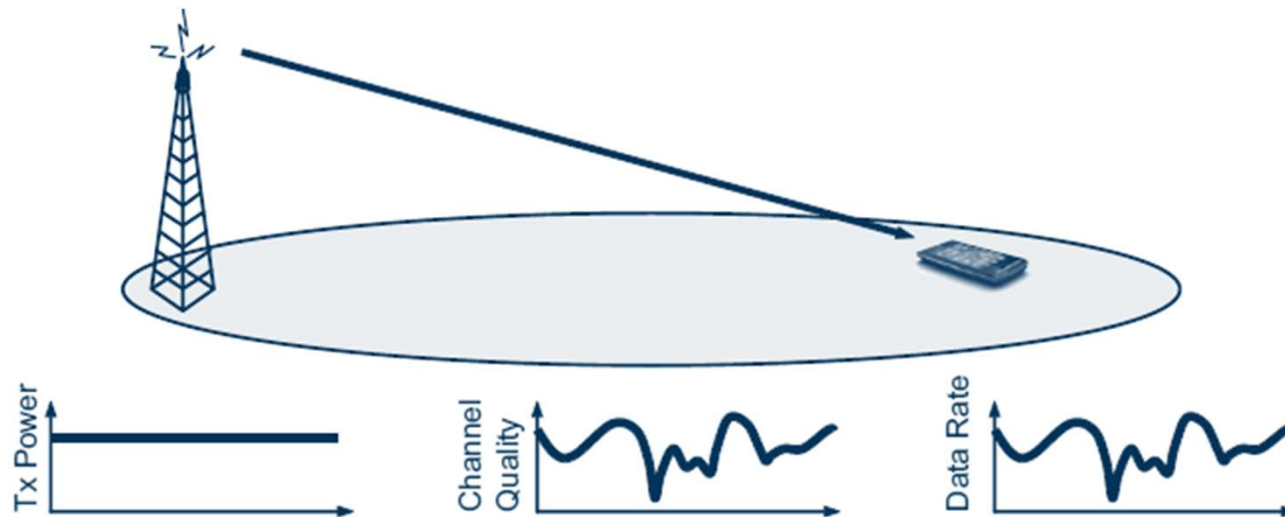
- Recursos tiempo-frecuencia compartidos dinámicamente entre usuarios
- Separación entre subportadoras, $\Delta_f = 15$ kHz o reducida ($\Delta_f = 7.5$ kHz)
- Implementación Tx/Rx basado en FFT (no es obligatorio pero es común)
 - $f_s = 1/T_s = \Delta_f N_{FFT} = 15000 N_{FFT}$ ($N_{FFT} = 2048 \rightarrow f_s = 30,72$ MHz, aceptable)

- Asignación dinámica de recursos
 - Recursos tiempo-frecuencia asignados por planificador (*scheduler*)
 - Decisiones: 1ms – 180 kHz. A UE se le pueden asignar varios bloques de 180 kHz en cada intervalo de 1 ms



[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

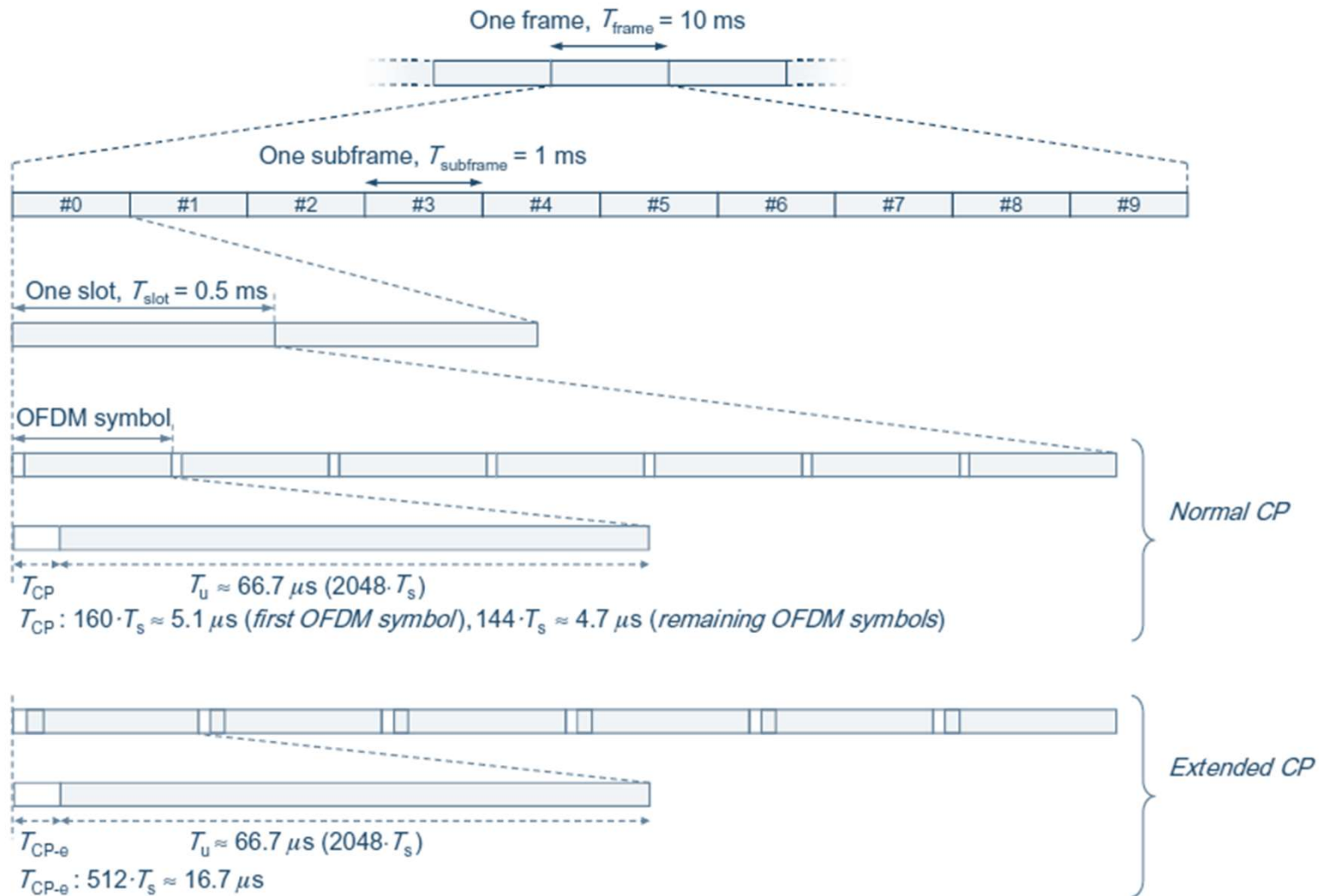
- Asignación dinámica de recursos
 - El planificador también determina la velocidad a utilizar en cada transmisión
 - Ejemplo: enlace radio desfavorable: QPSK y tasa de código baja; enlace radio favorable: 16 QAM ó 64 QAM y tasa de código alta → AMC, *Adaptive Modulation and Coding*
 - Para realizar la planificación en DL se requiere conocer el estado del canal: envío de señales de referencia (CSI, *Channel State Information* → decisiones)



[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

LTE (XII)

■ Estructura temporal



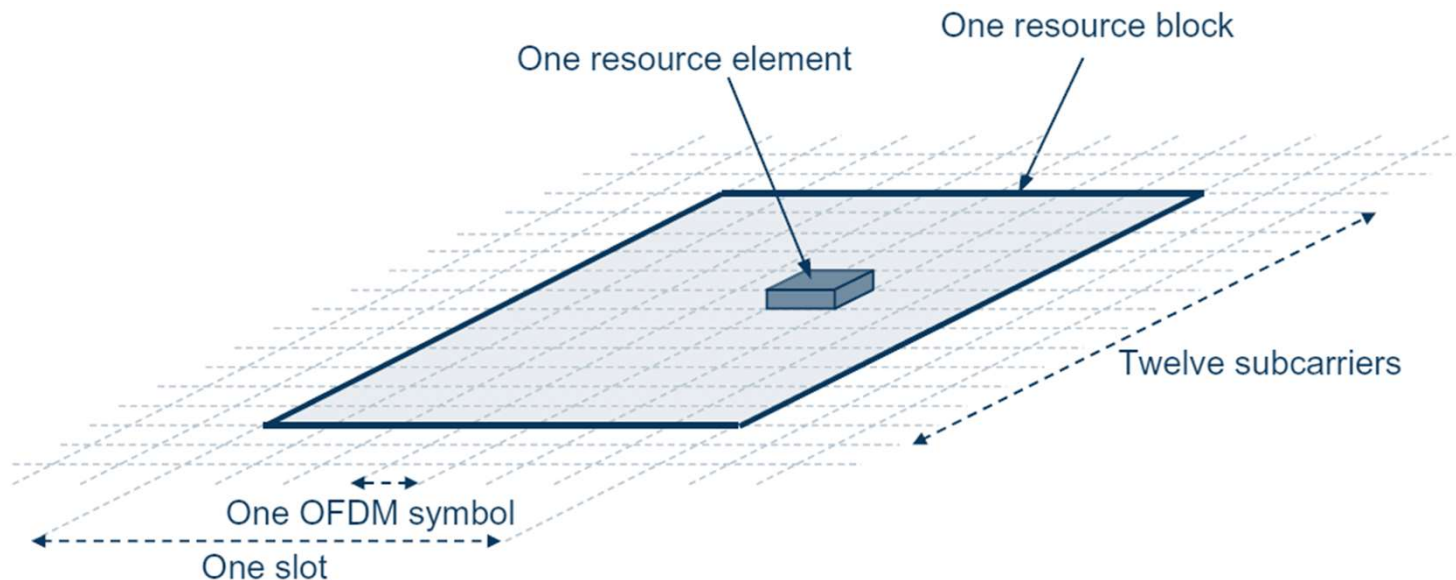
[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

■ Estructura temporal

- Referencia temporal T_s : $N_{\text{FFT}}=2048$, $T_s = 1/(15000 \cdot 2048)$
 - $T_{\text{frame}}=307200 T_s$, $T_{\text{subframe}}=30720 T_s$ y $T_{\text{slot}}=15360 T_s$
- Prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) normal o extendido
 - Normal: 7 símbolos por intervalo (CP primer símbolo mayor para completar)
 - Extendido: 6 símbolos
 - Menos eficiente (mayor exceso frente a T_u)
 - Útil en escenarios con elevada dispersión del retardo (células extensas)
 - Necesario en transmisiones desde múltiples células (MBSFN) para cubrir dispersión temporal del canal y diferencias en los retardos de las diferentes células (comportamiento SFN)

LTE (XIV)

- Recursos físicos
 - Combinación de asignaciones de tiempo y frecuencia
 - Elemento de recursos (RE, *Resource Element*): subportadora modulada con M niveles ($M=4, 16, 64$ según sea QPSK, 16QAM o 64 QAM) en un símbolo OFDM
 - Bloque de recursos (RB, *Resource Block*): 12 subportadoras consecutivas sobre un intervalo de 0,5 ms (T_{slot}) con un ancho de banda de 180 kHz
 - 1 RB=7·12=84 RE (CP normal) ,, 1 RB=6·12=72 RE (CP extendido)



[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

LTE (XIV)

- Recursos físicos
 - Par bloque de recursos (*resource block pair*): unidad básica de planificación (*scheduling*) formada por dos RB consecutivos en el tiempo en una subtrama
 - Asignaciones de bloques de frecuencia con RB variable entre 1 y 110
 - En frecuencia, las especificaciones permiten portadoras con cualquier número de RB entre 6 y 110

Ancho de banda nominal (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Ancho de banda ocupado en transmisión (MHz)	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Número de RB (UL o DL)	6	15	25	50	75	100
Número de subportadoras	72	180	300	600	900	1200

- Agregación de portadoras, CA (*Carrier Aggregation* - release 10)
 - Combinar hasta 5 portadoras (*component carriers*) de diferentes anchos de banda (hasta 100 MHz)
 - UE pueden transmitir/recibir simultáneamente en múltiples portadoras
 - Compatibilidad hacia atrás con UE compatibles release 8/9
 - Aplicable sobre espectro fragmentado: capacidad de ofrecer servicios de alta velocidad a operadores en función de la disposición global de espectro
 - Es específica del terminal. Diferentes UE pueden tener diferentes conjuntos de portadoras: distribución de la carga y diferenciar capacidades en los UE

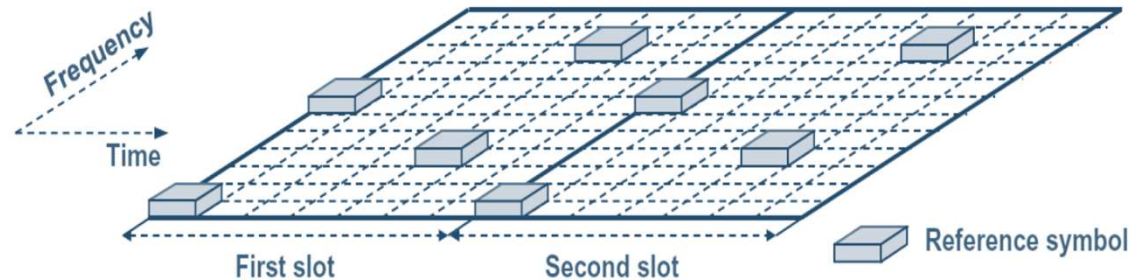


- Señales de referencia en el enlace descendente (DL)

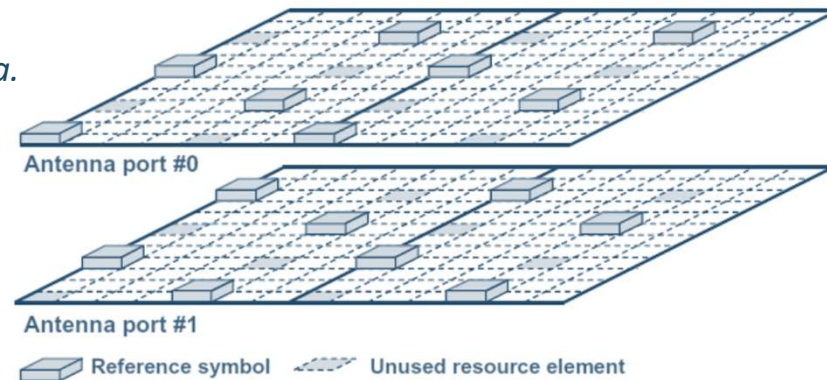
Las subtramas se dividen en una región de control y otra de datos

- Específicas de la célula, CRS (*Cell-specific Reference Signals*)
 - Transmitidas en cada subtrama y RB
 - Estimación de canal por UE salvo en algunos tipos de transmisión y CSI
 - Utilizadas como base para la selección de célula y decisiones de traspaso
- Específicas UE o de demodulación, DM-RS (*DeModulation Reference Signals*)
 - Transmitidas en RB asignados a UE
 - Estimación de canal para la demodulación del canal físico principal de datos
- De información de estado de canal, CSI (*Channel State Information*)
- Para MBSFN (*Multicast Broadcast Single Frequency Network*)
 - Transmisión en subtramas específicas
 - Estimación de canal por UE en transmisiones desde múltiples células
- De posicionamiento (release 9)
 - Estimación de la posición geográfica de UE

- Ejemplo: señales de referencia específicas de la célula, CRS

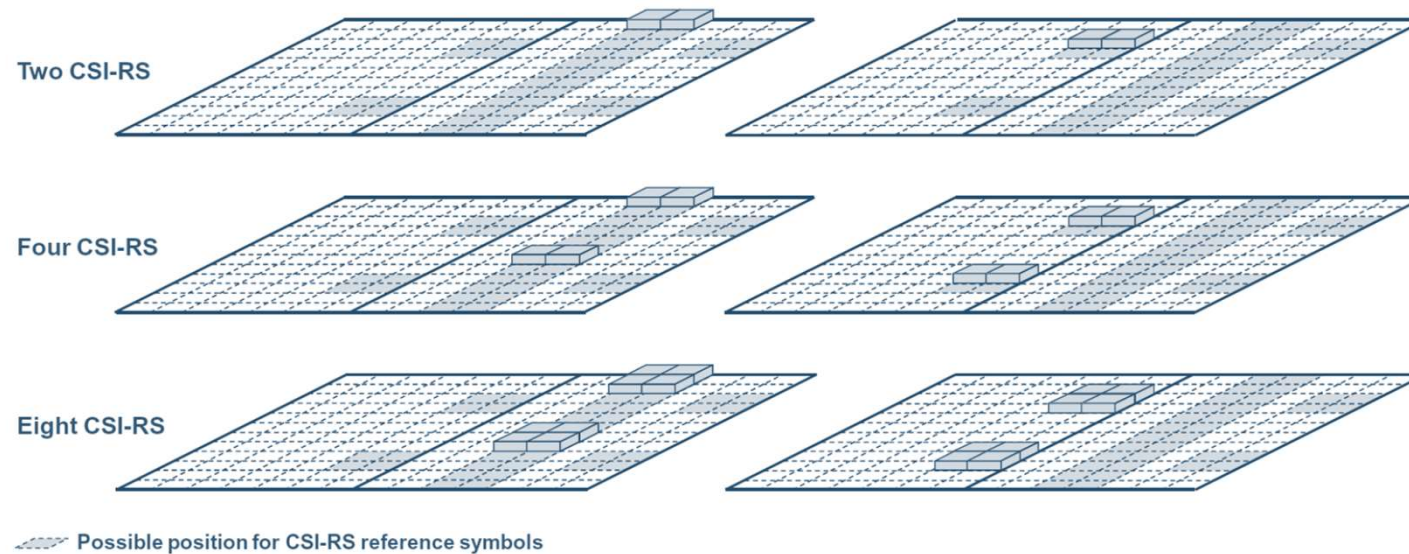


*Estructura de las CRS con uno y dos puertos de antena.
[7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld*



- Los valores de los símbolos de referencia forman una secuencia con un período de 10 ms (trama)
- Hay 504 secuencias y son diferentes para cada célula (identidad de célula)
- Multiplexación espacial: se dejan libres símbolos utilizados por otras antenas

- Ejemplo: señales de referencia de estado de canal, CSI-RS



Ejemplos de diferentes posiciones para CSI-RS. [7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld

- Adquisición de CSI por UE: planificación dependiente del canal, adaptación del enlace (velocidad) y ajustes para transmisión multi-antena
- Periodicidad de envío variable (5, 10, 20, 40 u 80 ms)
- Introducido para soportar multiplexación espacial de hasta 8 capas (Rel. 10)

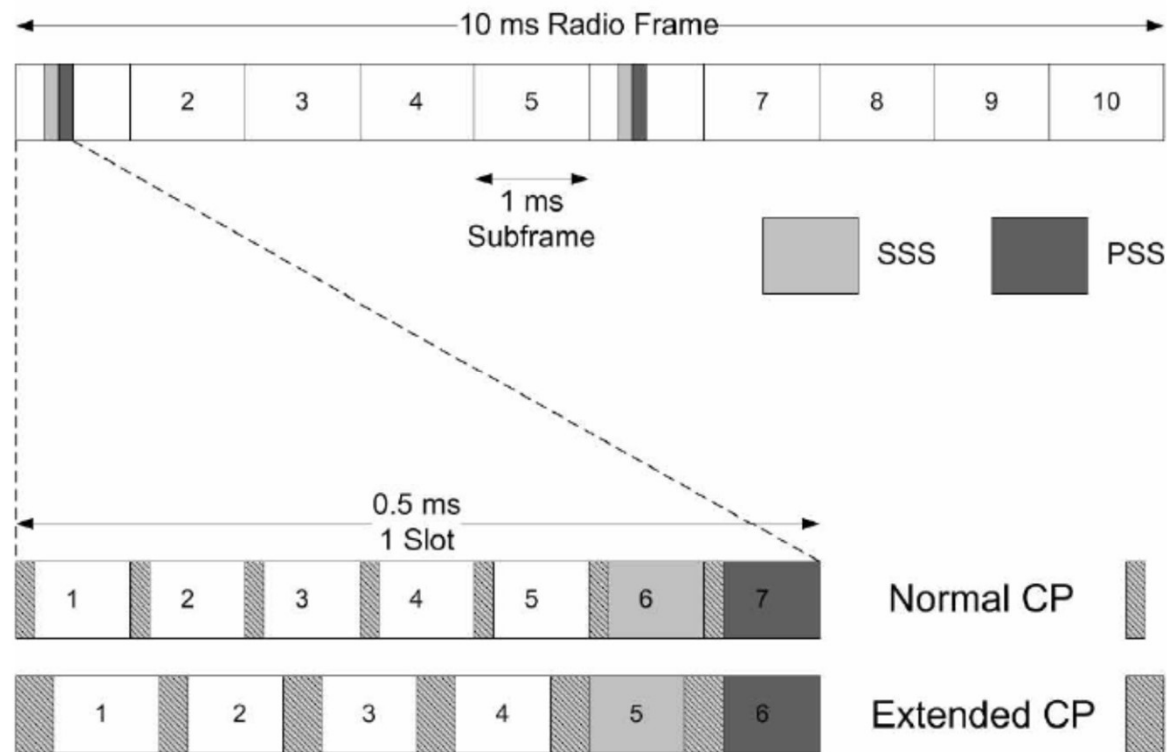
- Sincronización y búsqueda de celda

Antes de que un UE pueda acceder a la red, tiene llevar a cabo un procedimiento de búsqueda de celda que implica diversas tareas de sincronización

- Se usan dos señales físicas que se difunden en cada célula
 - PSS (Primary Synchronization Signal)
 - SSS (Secondary Synchronization Signal)
- Detección de PSS y SSS proporciona al UE
 - Sincronización en tiempo y frecuencia
 - Identidad de capa física de la celda y longitud del prefijo cíclico
 - Información sobre el tipo de modo: FDD o TDD

LTE (XXI)

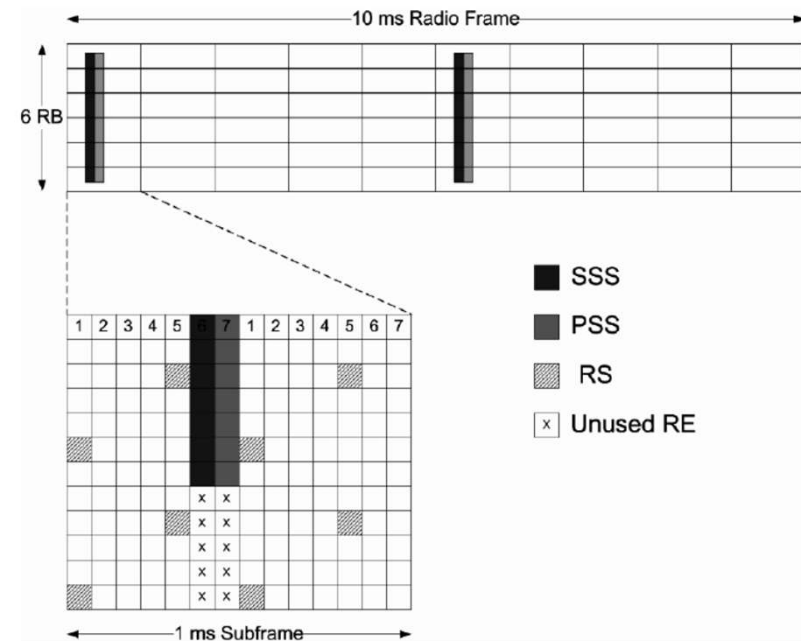
- Sincronización y búsqueda de celda: PSS y SSS en el tiempo
 - Se transmiten dos veces por trama
 - PSS en el último símbolo OFDM de 1º y 11º slots de cada trama
 - SSS en el símbolo que precede al PSS



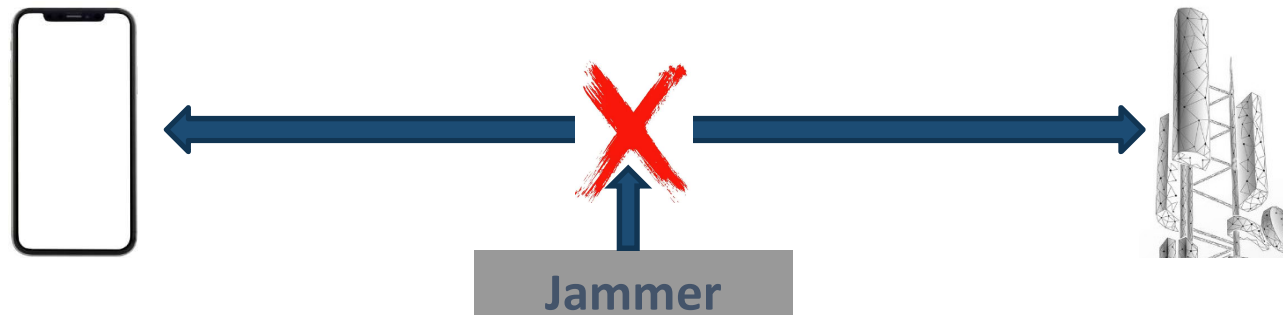
S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, LTE The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, John Wiley&Sons, 2nd. Ed., 2011

LTE (XXII)

- Sincronización y búsqueda de celda: PSS y SSS en frecuencia
 - Se transmiten en los 6 RBs centrales de la banda (comp. Carrier)
 - Permite al UE sincronizarse con independencia del BW disponible
 - Secuencia de 62 símbolos (sin usar 10)
 - Se transmite tb en estos RBs:
 - Canal PBCH
 - MIB (Master Information Block)
 - Parámetros esenciales acceso inicial



- Bloqueo intencionado de comunicaciones móviles
 - Uso intencionado y permitido para proteger recintos concretos (organismos gubernamentales)
 - Se basa en el uso deliberado de señales para interrumpir la comunicación
 - Diferente de las interferencias propias de los sistemas a considerar en planificación



- Fundamentos: atacar “principalmente” la capa física
 - Emular carga en célula para evitar acceso en escucha del medio por parte del móvil
 - Reducir la relación señal a ruido en el receptor

- Bloqueo intencionado de comunicaciones 4G
 - Bloqueo de señales de sincronización y del canal PBCH
 - Es el método más sencillo: fuerza bruta
 - Las señales se transmiten ocupando 1.08 MHz (6 RBs) con independencia del BW del operador
 - Transmisión intencionada, continua y de banda estrecha en la frecuencia deseada
 - Esta estrategia requiere transmitir potencia elevada, es fácil de detectar la interferencia y neutralizarla
 - Bloqueo selectivo de PSS en el DL
 - Técnica más sofisticada y compleja
 - Para acceder a la celda, un UE lo primero que debe hacer es detectar la PSS
 - Bloqueo de símbolos OFDM en estructura de trama
 - Mayor dificultad al requerir sincronización temporal con la estructura de trama
 - Además la PSS pensada para ser detectada con niveles altos de interferencia
 - UEs pueden detectar de hecho celdas vecinas
 - Más efectivo: Tx PSS falsa
 - UEs no encuentran SSS ni la información MIB

LTE (XXV)

- Cobertura y balance de enlaces
 - Valor máximo según T_g del PRACH

Formato	$T_g (\mu s)$	d (km)
0	96,88	14,5
1	515,63	77,3
2	196,88	29,5
3	715,63	100,2

$$d = \frac{c \cdot T_g}{2}$$

- Sensibilidad de recepción

$$P_n = k T_o B F_r$$

$$P_n (\text{dBm}) = -121,4 + NF_r (\text{dB}) + 10 \log(N_{RB})$$

$$S (\text{dBm}) = -121,4 + NF_r (\text{dB}) + 10 \log(N_{RB}) + SINR (\text{dB}) + M_l (\text{dB})$$

UL	
B (MHz)	S (dBm)
1,4	-106,8
3	-103
5, 10, 15, 20	-101,5

DL	
B (MHz)	S (dBm)
1,4	-102,2
3	-99,2
5	-97
10, 15, 20	-94

3GPP: TS 36.104

LTE (XXVI)

- Cobertura y balance de enlaces
 - *SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)* necesaria en LTE
 - 3GPP: TR 36.942. Ajuste experimental de la fórmula de Shannon
 - Tablas para diferentes tipos de modulación y tasas de código

Modulación	Tasa de código	<i>SINR</i> (dB)	η (bit/s/Hz)
QPSK	1/8	-5,1	0,25
	1/5	-2,9	0,4
	1/4	-1,7	0,5
	1/3	-1,0	1,5
	1/2	2,0	1,0
	2/3	4,3	1,3
	3/4	5,5	1,5
	4/5	6,2	1,6
16QAM	1/2	7,9	2,0
	2/3	11,3	2,6
	3/4	12,2	3,0
	4/5	12,8	3,2
64QAM	2/3	15,3	4,0
	3/4	17,5	4,5
	4/5	18,6	4,8

LTE (XXVII)

■ Cobertura y balance de enlaces: LTE - 1800 MHz

	Parámetro	DL	UL	Consideraciones
A	Potencia eNodeB/UE, P_t (dBm)	30	23	eNodeB, PDSCH (TS 36.104), UE (TS 36.101)
B	Pérdidas Tx (cables, conectores), L_{ct} (dB)	2	0	DL (1-6 dB RRH-0dB)
C	Ganancia antena Tx, G_t (dBi)	18	0	Efecto del cuerpo del usuario (3 dB)
D	PIRE (dBm)	46	23	D=A-B+C
E	Nº de bloques radio, N_{RB}	25	6	5 MHz (DL) y 1,4 MHz (UL)
F	Figura de ruido Rx UE/eNodeB, N_{Fr} (dB)	4	3	
G	Potencia de ruido térmico, P_n (dBm)	-103,5	-110,6	$G=-121,4+10\log E+F$
H	SINR (dB)	5,5	2,0	DL (QPSK y $r=3/4$) UL (QPSK y $r=1/2$)
I	Margen de interferencia, M_I (dB)	3	0,5	
J	Sensibilidad de recepción, S (dBm)	-95	-108,1	$J=G+H+I$
K	Margen desvanecimientos, M_L (dB)	10,2	10,2	$t \approx 1,28$ ($\alpha=90\%$) y $\sigma_L=8$ dB
L	Ganancia antena Rx, G_r (dBi)	0	18	
M	Ganancia por diversidad Rx, G_{div} (dB)	0	2	
N	Pérdidas Rx (cables), L_{cr} (dB)	0	1	
O	Pérdida por penetración, L_p (dB)	12	12	
P	Atenuación compensable, L (dB)	118,8	127,9	$P=D-J-K+L+M-N-O$
Q	Cobertura interior, d (km)	0,3	0,5	Hata-COST231, $h_b=25$ m, $h_m=1,5$ m, gran ciudad

Bibliografía

- [1] M. Mouly, M-B. Pautet, *The GSM System for Mobile Communications*, Cell & Sys, 1992
- [2] J.M. Hernando Rábanos, *Comunicaciones Móviles*, Ed. Centro de Estudios Ramón Areces, 3ª Ed., 2015
- [3] S. R. Saunders, A. A. Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, John Wiley & Sons, 2nd Ed., 2007
- [4] J.M. Hernando Rábanos, C. Lluch Mesquida (coords.), *Comunicaciones Móviles de Tercera Generación, UMTS*, Telefónica Móviles, 2ª Ed., 2001
- [5] J. Laiho et. al, *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*, John Wiley & Sons, 2002
- [6] B. Walke et. al, *UMTS The Fundamentals*, John Wiley & Sons, 2003
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, *LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Academic Press, 2nd Ed., 2014
- [8] The 3rd Generation Partnership Project: <http://www.3gpp.org>

