
Comunicaciones móviles de banda ancha

PID_00265434

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. Evolución de las redes de comunicaciones móviles	7
2. Estándares HSPA	8
2.1. HSDPA	8
2.2. HSUPA	10
2.3. HSPA+	11
3. LTE	13
4. Redes 4G	20
4.1. Evolución	20
4.2. Características	22
4.3. Comunicaciones de tipo máquina	24
5. Redes 5G	29
5.1. Introducción	29
5.2. Características	31
5.3. Evolución futura	37
6. DVB-H	41
Actividades	45
Ejercicios de autoevaluación	45
Solucionario	46
Glosario	46
Bibliografía	47

Introducción

La definición del estándar de tercera generación significó el primer intento de hacer redes de comunicaciones móviles con el objetivo principal de servir tráfico de datos en vez de tráfico de voz. Se trató, pues, de la primera propuesta de redes de comunicaciones móviles de banda ancha (en inglés, *broadband communications*). En este módulo hablaremos de los estándares que han surgido posteriormente a la aparición de las primeras redes de tercera generación.

Primero hablaremos de los estándares *High Speed Packet Access* (HSPA), que, como el nombre indica, quieren conseguir más velocidad en la transmisión de datos. Esta es una constante en todos estos sistemas, puesto que la principal característica de cada estándar es la velocidad que puede ofrecer. Inicialmente se dio más velocidad al enlace descendente (*High Speed Downlink Packet Access*, estándar HSDPA), después al ascendente (*High Speed Uplink Packet Access*, estándar HSUPA) y finalmente a ambos (estándar HSPA+). Todos se denominan la generación 3.5G.

Posteriormente se empezó a definir un sistema todavía más rápido, que se denomina LTE. Hablaremos de este estándar, conocido también como 3.9G, y de su evolución, que representa el núcleo central de la 4G, así como de las primeras experiencias de la 5G.

Finalmente, en el módulo hablamos de los estándares de recepción de televisión digital en el móvil. Se piensa que estos sistemas pueden dinamizar el mercado de los teléfonos móviles y, por este motivo, explicaremos de qué manera es posible la recepción de televisión en terminales en movimiento. Concretamente, hablaremos del estándar DVB-H.

Objetivos

Los materiales didácticos de este módulo deben permitir a los alumnos:

1. Comparar las prestaciones (velocidad, alcance, etc.) de los estándares HSDPA, HSUPA, LTE, LTE-A y NR.
2. Describir los mecanismos de funcionamiento de HSDPA, HSUPA, LTE, LTE-A y NR.
3. Describir el funcionamiento de LTE.
4. Explicar el significado de un *Resource Block*.
5. Explicar las diferencias más importantes entre WiMAX y LTE.
6. Describir el estándar DVB-H y explicar las diferencias con el estándar DVB-T.

1. Evolución de las redes de comunicaciones móviles

Los sistemas móviles 2G representaron una gran revolución, ya que rápidamente la sociedad valoró una tecnología que le permitía hablar (y enviar mensajes de texto) desde cualquier lugar. Con la popularización de Internet y el correo electrónico, la sociedad también ha aceptado los sistemas 2.5G (GPRS), ya que permiten estar atento a nuestro buzón de correo o consultar algunas páginas web desde cualquier lugar.

Este *boom* de las comunicaciones de datos propició la creación del programa europeo IST para definir cómo tendrían que ser los sistemas 4G. A estos sistemas se les pedía:

- Mucha velocidad (hasta 155 Mbps).
- Provisión de servicios a través de redes heterogéneas. Es decir, que el usuario pueda trabajar con las múltiples tecnologías de área local, metropolitana y gran alcance disponibles (802.11, GSM, GPRS, 802.16, etc.) desde un mismo terminal.
- Calidad de servicio garantizada (QoS).
- Arquitecturas de ordenador de poco consumo. Si un usuario se quiere conectar en una red móvil muy posiblemente lo hará con un equipo alimentado con baterías.
- Disponer de interfaces con las redes de área personal. Es decir, que nuestro terminal pueda entenderse con las múltiples tecnologías de área personal (Bluetooth, NFC, RFID...), con las cuales podemos interactuar en la vida cotidiana (gestión de alarmas mecánicas en vehículos, dispositivos domóticos en el hogar, pago en transportes públicos, compras en supermercados, etc.).

Actualmente la 4G ya es una realidad consolidada y existen despliegues de 5G (sin todas las funcionalidades). La tecnología no se para y cada día tenemos redes con más velocidad y con más capacidad de integrarse con otras redes. En este módulo haremos un repaso de este camino desde la 3.5G hasta la 5G.

2. Estándares HSPA

En este apartado, haremos una descripción de los estándares de la 3.5G: HSDPA, HSUPA y HSPA+.

2.1. HSDPA

HSDPA (*high speed downlink packet access*) es una tecnología disponible en el *release 5* de UMTS/3 GPP pero que se empezó a implantar el 2006. Para un operador sólo implica una actualización del software de la red. Los usuarios tienen que disponer de terminales compatibles con HSDPA.

HSDPA multiplica la velocidad de bajada hasta un factor de 10, y todavía tiene menor latencia que UMTS.

Latencia

La latencia son los retardos que pueden producirse en la red. Voz y vídeo requieren baja latencia, pero soportan la pérdida de algunos bits. Los datos, al contrario (no tienen restricciones de latencia pero no pueden perderse bits).

	Velocidad teórica	Velocidad práctica
GPRS	115 kbps	40 kbps
EDGE	470 kbps	120 kbps
UMTS	2 Mbps	200-300 kbps
HSDPA	14 Mbps	500-1000 kbps

HSDPA usa:

- Canales compartidos *downlink* de alta velocidad (HS-DSCH, *high speed downlink shared channel*).

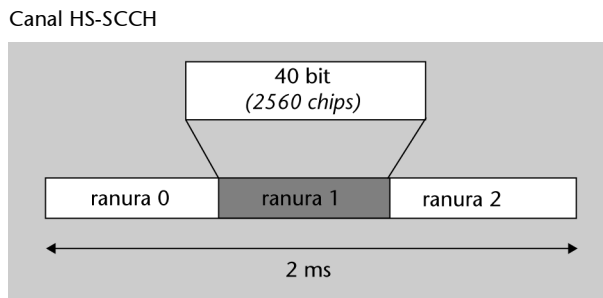
En UMTS, las transmisiones de un usuario se asignan durante 10-20 ms; en HSDPA lo hacen cada 2 ms, y eso permite adaptarse mejor al entorno (permite adaptarse a las condiciones instantáneas del canal).

- QPSK (como UMTS), pero, si las condiciones de radio son buenas, dispone de 16QAM.
- Tasa de codificación variable, de 1/4 (1/4 de los bits son de usuario y 3/4 de corrección) hasta 4/4 (no hay redundancias).

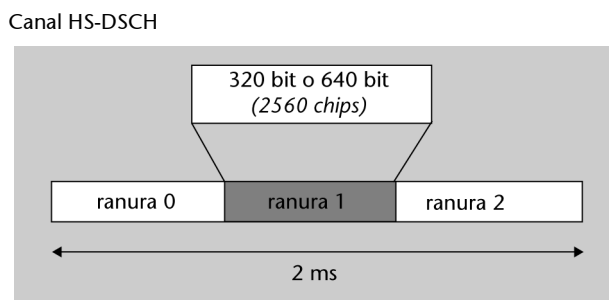
Veamos de dónde salen los 14 Mbps de velocidad teórica. En UMTS, con 640 bits/ranura, y teniendo en cuenta que en una trama (10 ms) hay 15 ranuras, la velocidad es de $640 \times 15 / 10 \text{ ms} = 960 \text{ kbps}$. Como en HSDPA, podemos unir las quince ranuras, la velocidad es quince veces superior. O sea, 14,4 Mbps.

Un usuario conoce la estructura del HS-DSCH leyendo el nuevo canal *downlink* *HS-SCCH* (*high speed shared control channel*). Este canal lleva la señalización asociada con la transmisión del canal HS-DSCH.

HS-SCCH es un canal descendente, que nos dice cómo están organizados los recursos del HS-DSCH. Trabaja en 60 kbps (40 bits/ranura, como se muestra en la figura siguiente):

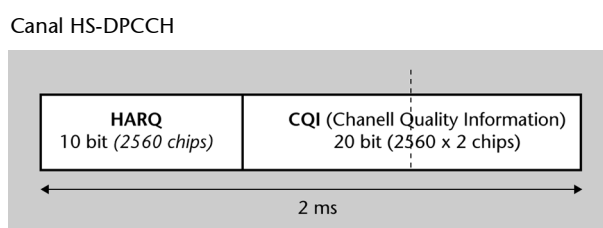


HS-DSCH es un canal descendente compartido. En cada ranura pone 320 bits si modulamos con QPSK o 640 bits si modulamos con 16QAM (ved la figura siguiente). En todo caso, una ranura siempre son 2.560 chips.



Se define también un nuevo canal *uplink* llamado *HS-DPCCH* (*high speed dedicated physical control channel*) que tiene dos utilidades (ver la figura siguiente):

- 1) Si el móvil recibe con errores los datos del HS-DSCH, entonces envía un NACK mediante el HS-DPCCH. A este protocolo de retransmisión de datos lo llamamos *HARQ* (*hybrid automatic repeat request*). La base le podrá retransmitir el paquete con más redundancia.
- 2) El móvil envía mediante el HS-DPCCH unas indicaciones de la calidad del canal (CQI). Así, la base puede decidir qué esquema de codificación aplica en la siguiente transmisión.



HSDPA aumenta la velocidad de bajada (velocidad de base a terminal). La tecnología HSUPA (definida en la *release 6* del 3GPP), aumenta la velocidad de terminal a base. Estos sistemas (HSDPA/HSUPA) están pensados para baja movilidad (menos de 30 km/h).

Las primeras pruebas HSDPA en España...

... se hicieron en febrero de 2006 con motivo del congreso 3GSM de Barcelona y se consiguió una velocidad media real de 400-700 kbps. Hay empresas que ya ofrecen tarjetas PC-MCIA HSDPA para navegar desde el portátil a estas velocidades comparables a las del ADSL.

Categoría de terminal	Velocidad	Modulación
1	1,2 Mbps	QPSK/16QAM
2	1,2 Mbps	QPSK/16QAM
3	1,8 Mbps	QPSK/16QAM
4	1,8 Mbps	QPSK/16QAM
5	3,6 Mbps	QPSK/16QAM
6	3,6 Mbps	QPSK/16QAM
7	7,2 Mbps	QPSK/16QAM
8	7,2 Mbps	QPSK/16QAM
9	10,2 Mbps	QPSK/16QAM
10	14,4 Mbps	QPSK
11	0,9 Mbps	QPSK
12	1,8 Mbps	QPSK

2.2. HSUPA

HSUPA está incorporado en la *release 6* del 3GPP. Un terminal que soporte HSUPA debe soportar HSDPA. La idea básica del HSUPA es hacer crecer la velocidad de transmisión del enlace ascendente mediante mecanismos parecidos a los del HSDPA, como por ejemplo una configuración del enlace ascendente más dinámica y protocolos híbridos de repetición automática (ARQ), entre otros.

Las características más importantes del HSUPA son las siguientes:

- Añade un nuevo canal E-DCH, no compartido, en el que podemos utilizar hasta 4 códigos.
- Dispone de un TTI opcional de 2 ms. Es decir, se puede enviar con 2 ms (3 ranuras) o 10 ms (15 ranuras).
- En modo macrodiversidad, hay celdas servidoras –se encargan de la capa 3 y controlan la potencia *uplink* (hay un nuevo canal)– y no servidoras (no pueden aumentar la potencia; pueden mantenerla o reducirla).

La velocidad máxima se consigue con 4 canales (2 con SF = 2 y 2 con SF = 4). Tenemos $2 \times 960 + 2 \times 1920 = 5,7$ Mbps.

Los terminales se clasifican desde la categoría 1 (0,73 Mbps) a la categoría 6 (5,76 Mbps).

Categoría de terminal	Canales y spreading	TTI	Velocidad con TTI = 10 ms	Velocidad con TTI = 2 ms
1	1 × SF4	10 ms	0,73 Mbps	
2	2 × SF4	2 ms/10 ms	1,46 Mbps	1,46 Mbps
3	2 × SF4	10 ms	1,46 Mbps	
4	2 × SF2	2 ms/10 ms	2 Mbps	2,92 Mbps
5	2 × SF2	10 ms	2 Mbps	
6	2 × SF2 + 2 × SF4	2 ms/10 ms	2 Mbps	5,76 Mbps

Es importante darse cuenta de que, al contrario de lo que sucedía en HSDPA, en HSUPA no se utiliza modulación adaptativa.

Ejemplo de HSUPA

Un ejemplo de producto HSUPA es la familia Huawei UMTS RAN6.0:

- Incluye RNC y Nodo B.
- Basado en 3GPP R6, Vodafone lo empezó a instalar en el 2008.
- HSDPA fase 3: 14.4 Mbps per celda, 7.2 Mbps por usuario, 64 usuarios por celda, soporte de las 12 categorías del terminal.
- HSUPA fase 1: 1.92 Mbps por usuario, 20 usuarios por celda.

2.3. HSPA+

HSPA+ está incorporado en la *release 7* del 3GPP. El estándar HSPA+ intenta explotar al máximo el potencial de los 5 MHz de ancho de banda del canal de UMTS. Usa modulación hasta 64QAM por HSDPA y hasta 16QAM por HSUPA. También hace uso de técnicas MIMO 2 × 2.

Las velocidades máximas son de 11 Mbps en el enlace ascendente y 28 Mbps en el descendente. La latencia de los datos es inferior a 50 ms.

Para categorizar los terminales, se utilizan dos tablas: una para HSDPA y otra para HSUPA. Las nuevas categorías que aparecen respecto de las que había en HSDPA y HSUPA se deben a las nuevas modulaciones que se utilizan y al uso de MIMO. De este modo, dentro de HSPA+ hay 18 categorías de terminales HSDPA y 7 categorías de terminales HSUPA. De las 18 categorías HSDPA, las 12 primeras son las HSDPA originales, la 13 y la 14 añaden 64QAM y la 15 y la 16 usan MIMO. La 17 y la 18 son combinaciones de las 4 anteriores. De las 7 categorías HSUPA, las 6 primeras son las HSUPA originales y la séptima utiliza 16QAM.

MIMO 2×2 : dos antenas transmisoras en el nodo B para transmitir información a las dos antenas receptoras del terminal receptor. Con esta diversidad en el espacio, se consiguen mejoras en los dos enlaces.

	MIMO 2×2 DL	NO MIMO
DL	28 Mbps (16QAM)	14 Mbps (16QAM) 21 Mbps (64QAM)
UL	5,76 Mbps (QPSK) 11 Mbps (16QAM)	5,76 Mbps (QPSK) 11 Mbps (16QAM)

En la *release 8* tenemos DL MIMO con 64QAM a 42 Mbps.

Otra ventaja es la DTX/RTX (transmisión/recepción discontinua). Con este mecanismo, se puede apagar el transmisor del móvil si el móvil no tiene nada que transmitir y se puede apagar el receptor del móvil si éste ha acordado con el nodo B que no tendrá nada que recibir durante un tiempo. De éste modo, conseguimos:

- Reducir el consumo de batería.
- Reducir la interferencia en el aire (y, por lo tanto, aumentar la capacidad)

3. LTE

En este apartado haremos una descripción del estándar LTE, considerado un estándar de la 3.9G. Se trata de un estándar totalmente IP, pero permite a los operadores una introducción progresiva de tal manera que les permite mantener los servicios de voz sobre las plataformas existentes, y aprovechar las ventajas de LTE para los servicios de datos. En este último punto, debe decirse que el objetivo de LTE es proporcionar la Internet de banda ancha que tenemos en redes fijas, pero en redes móviles.

El estudio del estándar LTE se inició en diciembre del 2004 para asegurar la competitividad de UMTS ante tecnologías emergentes como WiMAX. Viene definido por la *release* 8 del 3GPP.

LTE permite anchos de banda escalables hasta 20 MHz (1,25, 1,6, 2,5, 5, 10, 15 y 20). El caso de 5 MHz es el de UMTS.

Sobre 20 MHz, ofrece 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el ascendente.

Permite una fácil interacción entre redes de tercera generación tipo UMTS y redes de tercera generación tipo Wi-Fi/WiMAX. La latencia es inferior a los 10 ms. Con esta latencia, podemos tener aplicaciones en tiempo real (juegos en red, voz sobre IP, etc.) sin que el usuario note los retrasos que sí tenían los otros estándares previos. Los operadores pueden ofrecer servicios como *streaming*, redes para compartir contenidos multimedia (por ejemplo, vídeo), TV de alta definición, videoconferencia de alta calidad, etc.; servicios que hasta la aparición de LTE sólo se podían dar sobre redes fijas de manera masiva.

Además de tener ancho de banda variable según la necesidad, también podemos usar diferentes bandas según los distintos condicionantes (por ejemplo, bandas de frecuencia más bajas en entornos rurales para tener más alcance).

Una de las principales innovaciones que incorpora es el uso de MIMO. MIMO se refiere al uso de antenas múltiples en transmisión y recepción, y aprovecha fenómenos físicos como la propagación multicamino para aumentar la velocidad y reducir la tasa de error.

Veamos con más detalles estas características.

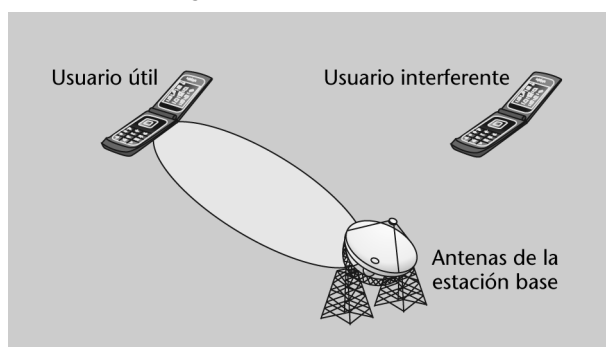
Tenemos tres técnicas MIMO:

1) **MIMO TxD (*Tx diversity*) [MISO]**: transmitimos varias veces lo mismo por varias antenas. Habitualmente, al receptor le llegan distintas versiones de una misma información y las puede combinar para obtener una mejor relación señal-ruido en el receptor.

2) **MIMO SM (*spatial multiplexing*)**: enviamos diferentes cadenas de datos (del mismo o de diferentes usuarios), de manera simultánea en antenas distintas. Haciéndolo así, aumentamos la velocidad.

3) **MIMO *beamforming***: se trata de formar un haz inteligente en el diagrama de radiación de las antenas, que en cada momento apunte allí donde sea más conveniente.

MIMO beamforming



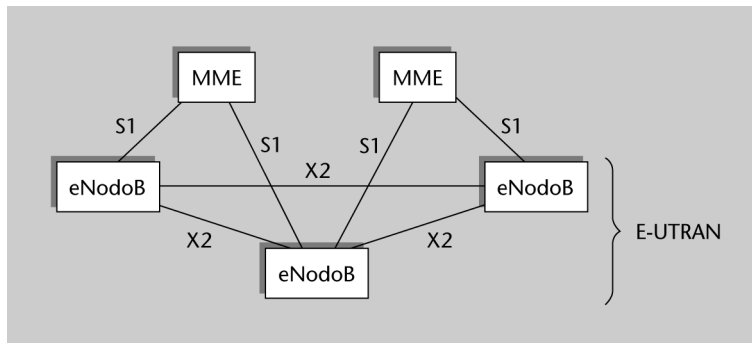
El ancho de banda de canales es flexible (desde 1,25 MHz hasta 20 MHz) y el uso de las portadoras es más eficiente (puede usar cualquier banda frecuencial definida por el 3GPP), características muy interesantes desde el punto de vista del operador de red. Si se utilizan las bandas frecuenciales altas (más allá de 5 GHz), podemos tener una gran capacidad (a más espectro disponible, más capacidad) pero una menor cobertura (ya sabemos que a más frecuencia, más atenuación); si trabajamos en bandas inferiores, tendremos una mayor cobertura pero menores velocidades. Las prestaciones máximas de LTE se pueden tener a distancias de hasta 5 km de la estación base, pero podríamos llegar a tener servicio, con prestaciones limitadas, hasta 100 km.

La buena eficiencia espectral de OFDM se complementa con modulaciones de alto orden (como 64QAM), técnicas de corrección de errores FEC y técnicas MIMO de hasta 4 antenas. Con todo esto conseguimos una velocidad 5 veces mayor que en HSPA. En el enlace descendente, podemos tener hasta 300 Mbps sobre un espectro de 20 MHz. En el ascendente, podemos tener hasta 75 Mbps sobre 20 MHz y soportar 200 usuarios activos en una celda sobre 5 MHz.

En un ámbito de transporte, no hay canales dedicados (sólo compartidos).

Hay nuevos elementos de red: aparece una nueva interfaz (X2) que une los nodos B para facilitar los traspasos. La integración con otras redes es posible con interfaces que se han definido. Por ejemplo, entre el SGSN (de las redes 3G) y el MME (*Mobility Management Entity*) de LTE.

Interfases definidas en LTE



Se usan los HARQ que se usaban en HSPA.

Usa un TTI de 0,5 ms. En HSPA el TTI era de 2 ms, lo que hace que la asignación de recursos sea más eficiente en LTE.

LTE puede convivir con estándares previos. De este modo, un usuario de LTE puede hacer llamadas de voz y acceder a servicios básicos de datos aunque no tenga cobertura LTE, aprovechando redes existentes como HSPA o GPRS.

Permite compartir elementos del acceso radio (RAN) entre los operadores, y dispone de herramientas de optimización de la red, de modo que reduce el coste de explotación.

Se utilizan nuevos esquemas de acceso al medio: OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA (*single carrier FDMA*) en el ascendente:

- **OFDMA se utiliza en WiMAX, WLAN, DVB, etc.** En lugar de poner los datos en una portadora ancha, los distribuye en portadoras estrechas. Estas portadoras son ortogonales entre sí (el espectro de cada portadora tiene un cero en la frecuencia central del resto de las portadoras). Es robusto al multicamino y tiene una buena eficiencia espectral.
- **SC-FDMA todavía no se usa en otros estándares.** Es parecido a OFDMA. Hace más eficientes los amplificadores de potencia de los móviles (por este motivo, lo utilizamos en el enlace ascendente).

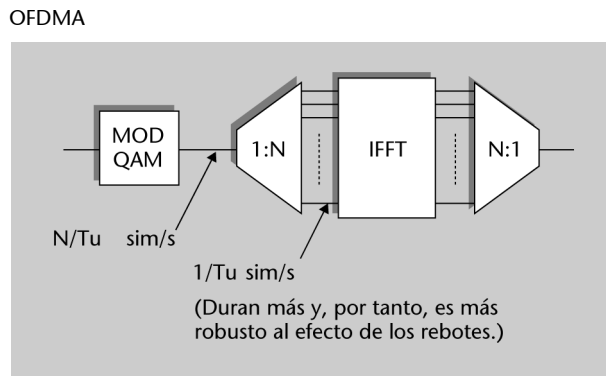
Descripción de la OFDMA que se utiliza en el enlace descendente (DL): de momento, sólo hay que saber que la modulación OFDM se basa en la FFT (*Fast Fourier Transform*) y la IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) para transmitir la información mediante distintas subportadoras.

Interconexión de redes

En febrero del 2008 había unos 20 millones de usuarios de redes HSDPA y más de 25 operadores que también incorporaban HSUPA. También han aparecido otras tecnologías como el Mobile WiMAX (que es el sexto método de acceso de radio de IMT-2000, denominado *OFDMA TDD WMAN*). Por este motivo LTE simplifica la interconexión con otras redes, ya que en el futuro éste será un aspecto que el usuario tendrá en cuenta a la hora de adoptar una tecnología.

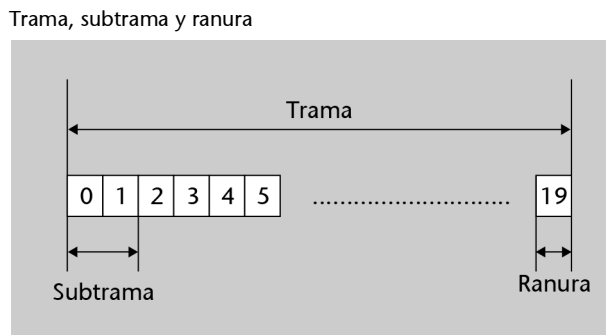
En otras asignaturas, se estudia en detalle la modulación OFDM.

Cada subportadora se modula de manera independiente.



OFDM usa muchas subportadoras estrechas, separadas 15 KHz. La duración de un símbolo OFDM es $1/15.000 +$ prefijo cíclico donde el prefijo cíclico es para mantener la ortogonalidad entre las subportadoras.

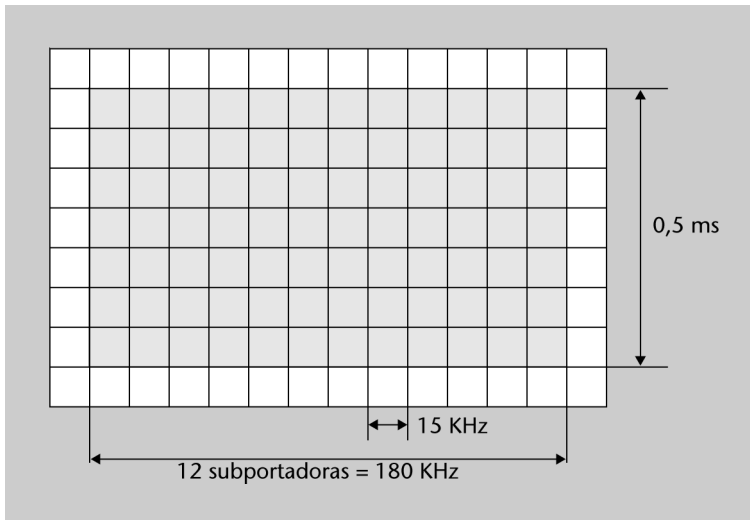
Una ranura dura 0,5 ms. Dos ranuras forman una subtrama radio (1 ms). 20 ranuras (10 subtramas radio) forman una trama. Esta trama dura 10 ms.



Un *Resource Block* es la mínima porción de recurso físico asignable a un usuario, y consta de un número determinado de subportadoras durante un periodo de tiempo determinado.

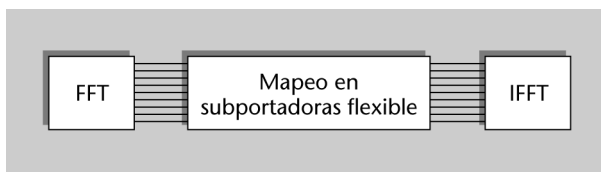
Un *LTE Resource Block* son 12 subportadoras (es decir, $12 \times 15 = 180$ KHz) durante 0,5 ms. Si nos fijamos en el eje de tiempo, en 0,5 ms podemos tener 6 o 7 símbolos OFDM consecutivos (7 si se usa prefijo cíclico normal o 6 si el prefijo cíclico es extendido). Por lo tanto, un *Resource Block* consta de 6 o 7 símbolos OFDM consecutivos en tiempo y 12 subportadoras de 15 KHz consecutivas en frecuencia.

El número de bits que lleva cada símbolo depende de la modulación usada (6 bits con 64QAM, 4 bits con 16 QAM o 2 bits con QPSK).

Visión tiempo-frecuencia de un *Resource Block*

Descripción del SC-FDMA que se utiliza en el enlace ascendente (UL): en OFDMA, cada subportadora sólo lleva información de un símbolo. En SC-FDMA, cada subportadora lleva información de todos los símbolos.

SC-FDMA



La medida del *Resource Block* es como en DL (es decir, 12 subportadoras y 1 ranura).

OFDM tiene una PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) grande y requeriría amplificadores de potencia muy lineales (caros y con elevado consumo). SC-FDMA agrupa los *Resource Blocks* de manera que no es precisa tanta linealidad y el consumo es menor.

Finalmente, comentaremos los canales que utilizan los enlaces ascendente y descendente.

1) Canales del enlace descendente:

- *Physical Broadcast Channel* (PBCH)
 - Usa QPSK.
 - Lleva información de la celda.
 - Lo encontramos en parte de los símbolos 3 y 4 de la ranura 0 y en parte de los símbolos 0 y 1 de la ranura 1.
- *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH)
 - Usa QPSK.
 - Lleva ACK y *scheduling* (asignación de recursos).

- Lo encontramos en parte del símbolo 0 y en los símbolos 1 y 2 de la ranura 0.
- *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH)
 - Usa QPSK, 16QAM y 64QAM.
 - Puede estar en el resto de las ubicaciones.
- Canales de control y/o referencia:
 - RS (*Reference signal*): es una referencia que está en los símbolos 0 y 4 de cada ranura.
 - P-SCH (*Primary Synchronization Channel*): está en el símbolo 6 de la ranura 0.
 - S-SCH (*Secondary Synchronization Channel*): está en el símbolo 5 de la ranura 0.

Para una mejor comprensión, en el gráfico siguiente tenemos la ranura 0 de una trama (recordemos que la trama tiene 20 ranuras). En el eje horizontal tenemos los 7 símbolos OFDM de esta ranura (supongamos prefijo cíclico normal), y en el eje vertical tenemos las 12 subportadoras (de 15 KHz de ancho de banda cada una).

Ranura 0 de una trama descendente

		Símbolos OFDM						
		0	1	2	3	4	5	6
Subportadoras	1	RS y PDCCH	PDCCH	PDCCH	PBCH y PDSCH	RS y PDSCH	S-SCH y PDSCH	P-SCH y PDSCH
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
	7							
	8							
	9							
	10							
	11							
	12							

2) Canales del enlace ascendente:

- *Physical Random Access Channel* (PRACH): usa QPSK y se utiliza para el establecimiento de llamadas (*call setup*).
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH): usa QPSK y BPSK. Se utiliza para ACK y *scheduling*.
- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH): utiliza QPSK, 16QAM y 64QAM.
- RS (*Reference Signal*). Es una referencia, que está en el símbolo 3 de cada ranura.

Es importante destacar que no se utilizan canales dedicados (todos los canales son compartidos), lo que permite optimizar los recursos disponibles en un ámbito de operador.

Antes se ha comentado que WiMAX y LTE son muy parecidos. A continuación, hacemos una enumeración de las diferencias más importantes:

- WiMAX se basa en TDD; LTE soporta FDD y TDD.
- WiMAX tiene *overhead* (más redundancias en las tramas).
- La separación entre portadoras en WiMAX es 11 KHz y en LTE es 15 KHz. O lo que es lo mismo, LTE permite mayor movilidad de los terminales.
- WiMAX es OFDMA en DL y UL, mientras que LTE es OFDMA sólo en el DL. Es decir, LTE tiene mayor autonomía (menor consumo).
- Los terminales WiMAX son más simples que los terminales LTE.

4. Redes 4G

En el apartado anterior hemos hablado de LTE y, concretamente, de la primera versión, que se consideraba un estándar de la generación 3.9. Observamos que no llegaba a ser un 4G, pero el hecho de que la numeración fuera 3.9G y no 3.6G o 3.7G ya indicaba que era la precursora de la 4G. Las sucesivas versiones de LTE lo han configurado como el principal exponente de la cuarta generación (4G) de las comunicaciones móviles. La primera versión de las especificaciones técnicas de LTE se introdujo en del 2009. LTE ha seguido los pasos de HSPA (y sus variantes), proporcionando más eficiencia y velocidades de datos más altos al usuario final.

Esto se proporciona con transmisiones basadas en OFDM, que permite la transmisión en más anchos de banda y el uso de tecnologías de múltiples antenas más avanzadas. Además, mientras la 3G permitía la comunicación móvil en espectro no emparejado por medio de una tecnología específica de acceso por radio (TD-SCDMA), LTE soporta tanto FDD como TDD, es decir, funciona en ambos espectros emparejado y no emparejado, dentro de una tecnología de acceso de radio común.

4.1. Evolución

LTE se define a partir de la versión 8. Las versiones 8 y 9 forman la base de LTE, que partía de las especificaciones de la 3G evolucionada.

La versión 10 de LTE es la primera versión aprobada por la UIT-R como una tecnología de las llamadas IMT-Advanced y es, por lo tanto, también la primera versión LTE-Advanced. Uno de los principales objetivos era asegurarse de que la tecnología de acceso de radio LTE sería totalmente compatible con los requisitos de IMT-Advanced, de aquí que el nombre LTE-Advanced a menudo se utiliza para LTE versión 10 y posteriores. Sin embargo, además de los requisitos de la UIT, el grupo de trabajo 3GPP también define sus propios objetivos y requisitos para LTE-Advanced. Un requisito importante es la compatibilidad hacia atrás (en inglés, *backward compatibility*). Esencialmente, esto significa que un dispositivo LTE de versión 8 o 9 tiene que poder acceder a una portadora LTE de versión 10, aunque no sea capaz de utilizar todas sus ventajas.

El principio de la compatibilidad hacia atrás es importante y se ha mantenido para todas las versiones de LTE, hecho que impone algunas restricciones sobre las posibles mejoras, restricciones que no están presentes cuando se define un nuevo estándar, como por ejemplo NR (siglas en inglés de *New Radio*, la nueva interfaz de radio estandarizada para 5G), que se comentará más adelante. La

LTE versión 10 se completó a finales del 2010 y presentó más flexibilidad de espectro a través de agregación de portadoras (*carrier aggregation*, CA), más transmisión multiantena, apoyo para la retransmisión (*relay*) y mejoras en la interferencia intercelular cuando se hacen despliegues de redes heterogéneas.

La versión 11, de finales del año 2012, extendió todavía más el rendimiento y las capacidades de LTE. Una de las características más notables fue la funcionalidad para la transmisión/recepción multipunto coordinada (CoMP). Es decir, dos o más estaciones base se coordinan para transmitir hacia un usuario concreto, ya sea coordinando las transmisiones de manera intercalada (cada estación base transmite una parte de los paquetes) o de manera simultánea (las diferentes estaciones base transmiten los mismos paquetes hacia un determinado usuario, que posteriormente los combina para mejorar la recepción). Otras mejoras hacían referencia a la agregación de portadoras, una nueva estructura de canal de control (EPDCCH) y la posibilidad de trabajar con dispositivos receptores avanzados.

La versión 12 se completó en el 2014 y se centró en pequeñas celdas (conocidas con el nombre inglés de *small cells*) con características como por ejemplo conectividad dual, activación/desactivación de celdas pequeñas, TDD dinámico, comunicación directa de dispositivo a dispositivo y apoyo para dispositivos de poca complejidad (típico de las comunicaciones donde intervienen máquinas).

La versión 13, finalizada el segundo semestre del 2015, marca el inicio de LTE-Advanced-Pro. Se habla como la 4.5G, puesto que es un paso intermedio entre las primeras versiones de LTE y la interfaz 5G NR. Algunas de sus características son el acceso asistido para apoyar a espectros sin licencia como complemento a los espectros con licencia, el apoyo mejorado para la comunicación de máquinas, las mejoras en la agregación de portadoras, las mejoras en la transmisión de múltiples antenas y las mejoras en las comunicaciones de dispositivo a dispositivo. Cuando hablamos de espectros sin licencia nos estamos refiriendo a espectros de uso común, en los que no hay que pedir licencia para su uso siempre que se cumplan unos requisitos técnicos determinados, como por ejemplo, unos límites de potencia emitida (las bandas ISM son un buen ejemplo).

La versión 14 se completó en la primavera del 2017. Como hemos visto, LTE fue diseñado originalmente como un sistema de banda ancha móvil con el objetivo de proporcionar altas velocidades de datos y alta capacidad en áreas extensas. La evolución de LTE ha mejorado la capacidad y la velocidad de los datos, pero también ofrece mejoras para nuevos casos de uso. La versión 14 se centra en este último punto. Además de mejoras en algunas de las características introducidas en las versiones anteriores, por ejemplo, mejoras en el funcionamiento en los espectros sin licencia, se introdujo el apoyo en comunicaciones de vehículo a vehículo (V2V) y de vehículo a todo (V2X), así

como apoyo al *broadcast* de área extendida con una pequeña separación entre subportadoras. El funcionamiento en zonas sin red, por ejemplo, en una zona de desastre, es un ejemplo al cual ha contribuido la comunicación de dispositivo a dispositivo que se incluye en la LTE, conocido comúnmente como comunicaciones *Device-to-Device* (D2D). Las comunicaciones masivas de tipo máquina en las que un gran número de dispositivos de bajo coste, por ejemplo sensores, están conectados a una red celular es otro ejemplo. Las comunicaciones entre vehículos y carreteras (básicas en ámbitos de conducción autónoma) o los drones por control remoto son ejemplos de nuevos escenarios.

4.2. Características

A continuación ampliaremos la información de las características que hemos ido comentando en el apartado anterior.

Acceso asistido con licencia (*License Assisted Access, LAA*)

Originalmente, LTE fue diseñado por espectros con licencia, en los que un operador tiene una licencia exclusiva para un determinado rango de frecuencias. La versión 13 introduce el acceso asistido con licencia, donde se utiliza la agregación de portadoras para aumentar el ancho de banda del enlace descendente en bandas de frecuencia sin licencia, principalmente en el rango de 5 GHz.

Transmisión multiantena extensa

En la versión 10, el multiplexado espacial en enlace descendente se amplió para soportar hasta ocho flujos (MU-MIMO). En la versión 13, y posteriormente en la 14, se soportan agrupaciones masivas de antenas (*massive* MIMO).

Coordinación y transmisión multipunto

Mientras que la versión 8 solo definió ciertos mensajes entre estaciones base para ayudar a la coordinación entre celdas, la versión 11 incluye el apoyo para la transmisión del estado del canal para múltiples puntos de transmisión, una estructura mejorada del canal de control y otras mejoras agrupadas con el nombre CoMP (transmisión/recepción multipunto coordinada). El auge de las transmisiones multiantena comentadas en el punto anterior ha derivado en la necesidad de estas informaciones, que permiten hacer un seguimiento de la calidad de los caminos de transmisión y tomar las decisiones oportunas para maximizar esta calidad.

Relaying

En el contexto de LTE, *relaying* implica que el dispositivo se comunica con la red a través de un nodo de retransmisión intermedio (*relay*) que se conecta inalámbricamente a una celda utilizando la tecnología de radio LTE. Desde un punto de vista del dispositivo, el nodo de retransmisión aparecerá como una celda normal. Esto tiene la ventaja importante de la simplificación de la implementación de dispositivos y hace que el nodo de retransmisión sea compatible hacia atrás (los dispositivos LTE 8 y 9 también pueden acceder a la red a través de este nodo). En esencia, el *relay* es una estación base de baja potencia conectada inalámbricamente a la red.

Small-cell on/off

En un despliegue denso con muchas celdas relativamente pequeñas, la probabilidad de que no todas las celdas sirvan al dispositivo al mismo tiempo puede ser relativamente alta en algunos escenarios. La interferencia de enlace descendente experimentada por un dispositivo puede ser también más grave en dispositivos que experimentan relaciones de señal-interferencia muy bajas debido a interferencias de celdas vecinas, potencialmente vacías, especialmente si hay mucha propagación en línea de visión (*Line of Sight*, LOS). Para hacer frente a esto, la versión 12 introduce mecanismos para encender y apagar celdas individuales en función de la situación del tráfico, y así reducir la interferencia mediana intercelular y minimizar el consumo de energía.

Comunicaciones de dispositivo a dispositivo (D2D)

Los sistemas celulares, como por ejemplo LTE, se diseñan asumiendo el hecho de que los dispositivos se conectan a una estación base para comunicarse. En la mayoría de los casos esto es un enfoque eficaz, puesto que el servidor con el contenido de interés no se encuentra normalmente en las proximidades del dispositivo. Sin embargo, si el dispositivo está interesado en comunicarse con un dispositivo vecino, o simplemente detectar si hay un dispositivo vecino que es de interés, la comunicación centralizada puede no ser el mejor enfoque. Del mismo modo, para la seguridad pública, como podría ser una primera busca para encontrar personas necesitadas en un desastre, hay un requisito imprescindible, y es que la comunicación tiene que ser también posible en ausencia de cobertura de la red. Para hacer frente a estas situaciones, la versión 12 introduce comunicaciones dispositivo a dispositivo asistidas por la red utilizando partes del espectro de enlace ascendente. Así, se consideraron dos escenarios en el desarrollo de las mejoras de dispositivo a dispositivo: en cobertura, para hacer posibles las comunicaciones fuera de cobertura en casos de seguridad pública, y en descubrimiento de dispositivos vecinos, para los casos de uso comercial. En la versión 13, la comunicación de dispositivo a dispositivo se mejoró todavía más con soluciones de *relay* para cobertura extendida. El diseño de dispositivo a dispositivo también sirvió de base para la V2V y V2X de la versión 14.

V2V y V2X

La comunicación entre los vehículos y la infraestructura es también útil, por ejemplo, para obtener información sobre la situación del tráfico, el tiempo atmosférico y rutas alternativas en caso de congestión. En la versión 14, 3GPP especifica mejoras en esta área, de acuerdo con las tecnologías de dispositivo a dispositivo introducidas en la versión 12 y mejoras de calidad de servicio en la red. Utilizar la misma tecnología para la comunicación tanto entre vehículos como entre vehículos e infraestructura es atractivo, tanto para mejorar el rendimiento como para reducir los costes globales.

4.3. Comunicaciones de tipo máquina

Las comunicaciones de tipo máquina (*Machine Type Communications*, MTC) es un término muy amplio, que básicamente cubre cualquier comunicación entre las máquinas. A pesar de que alcanza una amplia gama de diferentes aplicaciones, muchas de las cuales son todavía desconocidas, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), ha clasificado las comunicaciones de tipo máquina (MTC) en dos categorías. La primera categoría es MTC masiva (*massive MTC*, mMTC), que se caracteriza por una alta densidad de conexiones. La segunda son las comunicaciones de baja latencia ultrafiabiles (*Ultra-Reliable Low Latency Communications*, URLLC), que requieren una transmisión de datos fiable sujeta a estrictas limitaciones de latencia en tiempo real. Las últimas versiones de LTE añaden un mejor apoyo para URLLC. Un ejemplo es la característica sTTI (*Shortened Time Transmission Interval*, que hace referencia al hecho de que el tiempo durante el cual se asigna un recurso radio es más pequeño y, por lo tanto, da más flexibilidad a las comunicaciones) y la mejor fiabilidad en la versión 15.

En escenarios MTC masivos, los sensores, actuadores y, en general, los dispositivos empleados, suelen ser de coste muy bajo y tienen un consumo de energía también muy bajo, cosa que permite una vida de la batería muy larga. Al mismo tiempo, la cantidad de datos generados por cada dispositivo es normalmente muy pequeña y no suele ser necesaria una latencia muy baja. URLLC, por el contrario, corresponde a aplicaciones, como por ejemplo la seguridad/control de tráfico o conectividad inalámbrica para aplicaciones industriales y en general escenarios donde es necesaria una fiabilidad y disponibilidad muy altas, además de una latencia baja.

Para apoyar a MTC masivo, se han introducido varias mejoras. En la versión 12 se introdujo una categoría de dispositivo nueva, la categoría 0, que admite velocidades de datos de hasta 1 Mbps, y un modo de ahorro de energía para reducir el consumo de energía del dispositivo. Esta versión definió la categoría M1 con más cobertura y apoyo para dispositivos de 1,4 MHz de ancho de banda, independientemente del ancho de banda del sistema, para reducir el coste

del dispositivo. Desde una perspectiva de red estos dispositivos son dispositivos LTE normales, aunque con capacidades limitadas, y se pueden mezclar libremente con más dispositivos LTE sobre una portadora.

3GPP, en paralelo con los esfuerzos hacia los sistemas 5G, tiene iniciativas de estandarización en los que el objetivo es adaptar las redes móviles actuales para aplicaciones de la internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT). 3GPP lo hace por medio de tres vías:

- LTE-M, centrándose en la modificación de las redes de acceso radio LTE para los servicios IoT y dirigido a dispositivos con capacidades reducidas.
- NB-IoT, que se dirige a dispositivos de banda estrecha de bajo coste con funcionalidades reducidas.
- Sistema global de cobertura extensa (EC-GSM), abordando las mismas necesidades que NB-IoT, pero usando GSM como base.

Los principales objetivos de estas tres vías son soportar un número masivo de dispositivos de baja velocidad de datos con poca complejidad del dispositivo y eficiencia energética mejorada. Hablamos de las dos primeras.

LTE-M: LTE para máquinas

El trabajo sobre LTE-M se inició en el grupo de 3GPP, que trabajaba las especificaciones técnicas de la red de acceso radio (*Radio Access Network*, RAN) con el estudio sobre la prestación de comunicaciones de bajo coste de tipo máquina (MTC) con equipos de usuario basados en LTE. El objetivo inicial del estudio LTE-M era encontrar soluciones con una baja complejidad del dispositivo. Más tarde, se añadió un segundo objetivo pensado para encontrar soluciones que ofrecieran una mejora sustancial de la cobertura. Algunas de las técnicas de reducción de la complejidad se especificaron en la versión 12 en forma de una nueva categoría de dispositivo LTE (Cat-0). La versión 13 permite, además, la reducción de costes del dispositivo en forma de una nueva categoría de dispositivo (Cat-M1).

El cambio más importante es la reducción del ancho de banda de 20 a 1,4 MHz tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente. La consecuencia de este cambio es que las señales de control, que se distribuyen actualmente sobre una banda de 20 MHz, se alteran para apoyar la coexistencia de los dos tipos de dispositivos: LTE-M y los de más capacidad. Otra característica es un consumo de energía más bajo, que se consigue mediante la reducción de la complejidad de la cadena del transceptor.

Como ya se ha comentado, un aspecto muy importante es el consumo energético. La transición de un dispositivo desde el estado no conectado (inactivo)

al estado conectado implica un número sustancial de intercambios de señalización. La transmisión discontinua ya está presente en LTE, pero LTE-M soporta ciclos de transmisión discontinua más grandes para reducir la señalización y optimizar la vida de la batería. Con la transmisión discontinua lo que hacemos es gestionar los instantes en los que se envían las informaciones procurando que si no hay información que se tenga que transmitir se reduzcan los bits de información a enviar. De este modo, reducimos el consumo y las interferencias.

Especificada por 3GPP como Cat-M1 y Cat-M2, la tecnología de baja potencia permite la movilidad y es compatible con velocidades moderadas de transmisión de datos. LTE-M, junto con NB-IoT, son las principales tecnologías 4G para los casos de uso de mMTC y coexisten con el 5G NR mediante el funcionamiento dentro de la banda.

3GPP ha especificado un equipo de usuario de baja complejidad para la comunicación tipo máquina (MTC) que permite operaciones semidúplex de cadenas de radiofrecuencia únicas desde la versión 12. Definido como el nuevo LTE de categoría 0 (Cat 0), necesitaba soportar todo el ancho de banda de la portadora LTE para recibir la información de control LTE. Como mejora (*enhanced MTC*, eMTC), la versión 13 especificaba un equipo de usuario de baja complejidad con un ancho de banda reducido. Los primeros despliegues de red para la Cat-M1 empezaron en Norteamérica a finales del 2017. En el futuro, la gran flexibilidad del 5G NR permitirá también el despliegue de LTE-M.

LTE-M también se denomina el nuevo GSM para M2M/ IoT. Además de la cobertura global y la movilidad, LTE-M también es compatible con VoLTE con unos costes de dispositivo comparables al GSM. Esto hace que sea muy atractivo para varias aplicaciones de IoT, incluidos dispositivos con funciones de llamada de emergencia como los rastreadores de niños. Además, LTE-M puede reducir el consumo de batería y mejorar la cobertura en interiores. Inicialmente estaba limitado a un ancho de banda de 1,4 MHz (Cat M1) y a algunas mejoras de cobertura, como el salto de frecuencia y las repeticiones de subtrama. Para cumplir el requisito de más rendimiento de datos en la versión 14, se implantó la nueva Cat M2, que permite el uso opcional del ancho de banda de 5 MHz. Una vida útil de la batería de más de 10 años exige la existencia de características específicas de ahorro de batería.

En resumen, LTE-M desde la versión 12 a la 16 ha ido introduciendo mejoras. En todas las versiones se ha optimizado el consumo energético, mientras que los perfeccionamientos en la cobertura quedaron solo en las versiones 13 y 15. La versión 16 es la que define la coexistencia con el 5G-NR.

IoT de banda estrecha (*narrowband IoT*, NB-IoT)

Las principales características técnicas de este estándar son un ancho de banda reducido de 180 kHz en los enlaces descendente y ascendente y más cobertura. NB-IoT se ha propuesto permitir una conectividad de bajo coste, una baja potencia y una cobertura extensa para dispositivos MTC. Gracias a la utilización de OFDM con espaciado de 15 kHz entre subportadoras, se puede desplegar dentro de banda en la parte superior de una portadora LTE, fuera de banda en otra asignación de espectro o en las bandas de guarda de LTE, cosa que proporciona un alto grado de flexibilidad para un operador. NB-IoT utiliza la misma familia de protocolos de capa superior (MAC, RLC y PDCP) que LTE, con extensiones para un establecimiento de la conexión más rápido aplicable tanto a NB-IoT como la categoría M1, y por lo tanto puede ser fácilmente integrado en las implementaciones existentes.

Un factor importante para la mejora de la cobertura es la introducción de lo que se denominan múltiples categorías de cobertura, que permite a la red adaptarse a las deficiencias de cobertura de un dispositivo. Las diferentes categorías de cobertura corresponden al funcionamiento con diferentes órdenes de modulación, tasas de codificación y factores de repetición, entre otros, para que la velocidad de datos del dispositivo coincida con la capacidad del enlace. Esto permite que los dispositivos con mejor cobertura funcionen a velocidades de datos más altas y con una latencia más baja que los dispositivos que tienen mala cobertura. La principal ventaja de este esquema es que permite dar servicio a dispositivos con fuertes restricciones de cobertura.

3GPP versión 14 añade nuevas características al estándar NB-IoT para mejorar la experiencia de usuario. El registro de la diferencia de tiempo observada en la llegada (OTDOA) es un método de determinación de posición de enlace descendente que describe 3GPP como uno de los métodos específicos de NB-IoT para incrementar la precisión en el posicionamiento. Utiliza celdas adyacentes para deducir una diferencia de tiempo observada en la llegada (*Time of Arrival*, TOA) en cuanto a la celda que hace la entrega. Dependiendo de la manera de determinar la posición según cómo esté configurado, bien basado en equipo de usuario o bien asistido por equipo de usuario, el dispositivo NB-IoT medirá y determinará la posición (basada en equipo de usuario), o enviará los valores a la red para la determinación de la posición (asistido por el equipo de usuario). Con el método OTDOA se puede conseguir una exactitud en la posición mejor de 50 metros.

Los dispositivos NB-IoT con función de posicionamiento hacen posible toda una gama de productos y servicios nuevos, como por ejemplo, prendas de ropa inteligentes, bicicletas inteligentes, seguimiento de objetos, localización de animales y monitoreado medioambiental.

Las categorías NB1 y NB2 fueron especificadas por 3GPP para una cobertura muy grande y para aplicaciones de potencia extremadamente baja. NB-IoT es una tecnología clave para mMTC-5G y funciona de manera sencilla dentro de bandas de frecuencia 5G NR de una forma similar a la tecnología LTE actual.

Las aplicaciones de IoT que exigen una cobertura excepcionalmente amplia y un consumo de energía mínimo se caracterizan típicamente por disponer de una velocidad de transmisión de datos baja y unos tiempos de reacción moderados de unos cuantos segundos, como por ejemplo, contadores inteligentes, contenedores de reciclaje conectados, bicicletas, granjas de abejas o trampas para ratones. Los primeros despliegues de red empezaron a finales del 2017 y los lanzamientos comerciales a escala global empezaron en el 2018. Como ya se ha comentado, IoT de banda estrecha puede desplegarse dentro de una portadora LTE, en la banda de guarda LTE y como solución independiente. En el futuro, la gran flexibilidad del 5G-NR facilitará también el funcionamiento de 5G dentro de la banda para IoT de banda estrecha.

IoT de banda estrecha puede clasificarse como una tecnología móvil de área extendida y baja potencia (LPWAN) que trabaja en enlace descendente con menos de 180 kHz y una separación de subportadora de 15 kHz, y en enlace ascendente típicamente con una transmisión de un único tono de 3,75 kHz o 15 kHz. IoT de banda estrecha también utiliza técnicas de mejora de la cobertura, como por ejemplo el aumento de potencia en enlace descendente o la repetición de subtrama tanto en enlace ascendente como descendente. Una vida útil de la batería de más de 10 años exige la existencia de características específicas de ahorro de energía, como por ejemplo, las transmisiones discontinuas ya comentadas previamente.

En resumen, NB-IoT desde la versión 12 a la 16 ha ido introduciendo mejoras. En todas las versiones se ha optimizado el consumo energético, mientras que las mejoras en la cobertura quedaron solo en las versiones 13 y 15. La versión 16 es la que define la coexistencia con el 5G-NR. Como vemos, la trayectoria ha sido paralela a la de LTE-M.

Tanto LTE-M como NB-IoT tendrán un papel importante en las redes 5G para comunicaciones masivas de tipo máquina. Se han incluido mecanismos para el despliegue de NR en la parte superior de una portadora ya existente utilizada para la comunicación masiva de tipo máquina.

5. Redes 5G

Las discusiones sobre la quinta generación (5G) de comunicaciones móviles empezaron alrededor del 2012. El trabajo de normalización para la NR (*New Radio*) se inició en la versión 14 y continuó con el desarrollo de un primer conjunto de especificaciones en la versión 15. Una primera versión de la versión 15 se publicó en diciembre del 2017. 3GPP hizo una primera presentación de NR como candidato IMT-2020 de la UIT-R en la reunión de febrero del 2018 y se aprobó en septiembre del 2018. Dos mejoras que incorpora son la reducción de la latencia a través de la llamada característica sTTI (*Shortened Transmission Time Interval*) y la comunicación usando dispositivos voladores, como podría ser, por ejemplo, un dron. NR no está limitado por la necesidad de mantener la compatibilidad hacia atrás, puesto que está previsto que se despliegue en nuevas bandas de frecuencia.

5.1. Introducción

La primera especificación a partir de diciembre del 2017 se limita a la operación NR no autónoma (*non-standalone*), que implica que los dispositivos NR se basan en LTE para el acceso inicial y la movilidad. Es decir, el dispositivo solo puede operar en la interfaz NR si a la vez está conectado en otra banda a LTE (principalmente para canales de control). La especificación 15 final también soporta el funcionamiento independiente, conocido como *standalone*. La diferencia entre el autónomo y no autónomo afecta principalmente a las capas superiores y la interfaz al núcleo de red; la tecnología radio es la misma.

En paralelo a los trabajos sobre la tecnología de acceso radio NR en 3GPP, se ha desarrollado un nuevo núcleo 5G (*Next Generation Core*, NGC), responsable de las funciones no relacionadas con el acceso de radio, pero necesaria para proporcionar una red completa. Sin embargo, es posible conectar la red de acceso de radio NR también al núcleo de red LTE preexistente conocido como el núcleo evolucionado de paquetes (*Evolved Packet Core*, EPC). De hecho, este es el caso cuando trabaja NR en modo no autónomo, en el que LTE y EPC gestionan funcionalidades como la configuración de la conexión y el *paging*, y NR ofrece más velocidad de datos y capacidad. Las versiones posteriores introducirán funcionamiento autónomo con NR para conectarse en el núcleo 5G.

En comparación con LTE, NR ofrece muchos beneficios. Algunos de los principales son:

- la explotación de bandas a más frecuencia como un medio para obtener espectro adicional y así soportar anchos de banda de transmisión muy grandes y las elevadas velocidades asociadas;
- diseño para mejorar el rendimiento energético de la red y reducir interferencias;
- compatibilidad hacia delante (*forward compatibility*) para prepararse para futuras tecnologías;
- baja latencia para mejorar el rendimiento y permitir nuevos casos de uso;
- un diseño de haces que permite un uso amplio del *beamforming* y un número masivo de elementos de antena, no solo para la transmisión de datos (que ya es posible en LTE), sino también para procedimientos del plano de control, como por ejemplo, el acceso inicial.

En el contexto de 5G, a menudo se habla de tres clases de uso: banda ancha móvil mejorada (eMBB), comunicación masiva de máquinas (mMTC) y comunicación ultrafiabile y de baja latencia (URLLC):

- eMBB corresponde a una evolución más o menos directa de los servicios de banda ancha móvil de hoy en día, que permite volúmenes de datos todavía más grandes y una experiencia mejorada de usuario, como por ejemplo con mayores velocidades de datos para el usuario final.
- mMTC corresponde a los servicios que se caracterizan por un número masivo de dispositivos. Por ejemplo, sensores remotos, actuadores y el monitoreo de equipos. Los requisitos clave para estos servicios son un coste muy bajo de los dispositivos y un consumo de energía del dispositivo también muy bajo, que permite una larga duración de la batería del dispositivo de al menos unos cuantos años. Típicamente, cada dispositivo consume y genera solo una pequeña cantidad de datos, es decir, el apoyo para alta velocidad de datos es de menor importancia. Tampoco son sensibles al retraso.
- URLLC (comunicaciones ultrafiabiles y de baja latencia) es para servicios que requieren una latencia muy baja y una fiabilidad extremadamente alta. Las URLLC cubren una gama de casos de uso totalmente nueva, puesto que satisfacen los nuevos requisitos de la industria, como por ejemplo, la conducción autónoma en el caso de la industria automotriz, la cirugía remota en el caso de la sanidad electrónica y la robótica en la nube en el caso de la Industria 4.0.

5.2. Características

La primera versión de NR, la versión 15, se ha centrado en el soporte básico para eMBB y, en cierta manera, para URLLC. A continuación, se discuten algunas áreas en las que es probable que NR evolucione.

Funcionamiento en frecuencias más altas y flexibilidad de espectro

Con la introducción de 5G, se pueden conseguir velocidades de datos todavía más altas y una gran capacidad en los despliegues de red densos. Mientras que muchos de los primeros despliegues 5G trabajan en bandas que ya se utilizan en anteriores generaciones móviles, se están estudiando bandas de frecuencias superiores a 24 GHz como un complemento a las bandas de frecuencia habituales, que están por debajo de 6 GHz. Así, cuando se requieran velocidades de datos extremos en áreas localizadas, se podrá hacer uso de frecuencias más altas, incluso por encima de 60 GHz. Abusando del lenguaje, las bandas destinadas a 5G por encima de 6GHz son denominadas bandas milimétricas. Así, una característica clave de NR es una expansión sustancial en términos de la gama de espectro donde la tecnología de acceso de radio se puede desplegar.

En resumen, el funcionamiento a frecuencias de ondas milimétricas ofrece la posibilidad de disponer de grandes cantidades de espectro (en un futuro de hasta 500MHz o 1GHz) y anchos de banda de transmisión muy grandes, de forma que se consiga una capacidad muy alta y velocidades de datos extremos. Aun así, las frecuencias más altas tienen también más atenuación, cosa que limita la cobertura de red.

El margen de frecuencias de 3.300 a 4.990 MHz es de especial interés para 5G, puesto que es un nuevo espectro en bandas por debajo de 6GHz. Esto implica que se ajusta bien a los nuevos escenarios de uso que requieren velocidades de transmisión de datos altas y también es adecuado para una implementación masiva de MIMO, donde se podrán diseñar agrupaciones de muchos elementos más pequeños puesto que la longitud mínima de las antenas es proporcional a la longitud de onda de la señal y, por lo tanto, inversamente proporcional a la frecuencia. Como se trata de un nuevo espectro sin uso generalizado para sistemas de hoy en día, será más fácil asignar este espectro en bloques de espectro más grandes, lo cual permitirá portadoras de radiofrecuencia más anchas y, en última instancia, velocidades de datos de usuario final más elevadas. También la Conferencia Mundial de Radiocomunicación identificó bandas de alta frecuencia por encima de 24 GHz para servicios de telefonía móvil 5G. Son las siguientes:

- 24,25-27,5 GHz
- 37-40,5 GHz
- 42,5-43,5 GHz
- 45,5-47 GHz

- 47,2-50,2 GHz
- 50,4-52,6 GHz
- 66-76 GHz
- 81-86 GHz

Hay un gran interés en todo el mundo por hacer despliegues 5G. El espectro de interés puede ser dividido en bandas de frecuencia baja, media y alta:

- Las bandas de baja frecuencia corresponden a las bandas LTE existentes por debajo de 2 GHz, que son adecuadas como capa de cobertura y proporcionan una cobertura amplia e incluyen interiores. Las bandas con más interés aquí son las bandas de 600 y 700 MHz. Dado que las bandas no son muy amplias, se espera un ancho de banda máximo de canal de 20 MHz. Además, se han identificado un número de bandas LTE adicionales en el rango de 3 GHz para su posible reubicación. Dado que las bandas, en general, ya se han desplegado con LTE, se espera que NR lo haga en una etapa posterior.
- Las bandas de frecuencia mediana están en el intervalo 3-6 GHz y pueden proporcionar cobertura, capacidad y altas velocidades de datos. Típicamente, los anchos de banda disponibles en estas bandas de frecuencia son canales de hasta 100 MHz. Se podrán asignar hasta 200 MHz por operador y se podría usar entonces agregación de portadoras para desplegar el ancho de banda completo. Además, hay posibilidades para la reordenación de bandas LTE en 2-6 GHz, que actualmente se han identificado como bandas candidatas para NR.
- Las bandas de alta frecuencia están por encima de 24 GHz. Serán lo más adecuado para la cobertura de punto de acceso de manera local con una capacidad muy alta, y puede proporcionar velocidades de datos muy altas. Se han definido anchos de banda de hasta 400 MHz para estas bandas, con anchos incluso más altos gracias a la agregación de portadoras. El rango de frecuencia de ondas milimétricas es nuevo para el despliegue de las redes IMT. Para el funcionamiento NR en las nuevas bandas por encima de 24 GHz, los dos dispositivos y las estaciones base se llevarán a cabo con tecnología innovadora, y habrá un uso más generalizado de MIMO masivo puesto que, como se ha comentado anteriormente, las agrupaciones pueden ser de dimensiones más reducidas.

Aunque las elevadas pérdidas de propagación a altas frecuencias pueden ser compensadas por medio de transmisión/recepción multiantena avanzada, la cobertura sigue siendo peor, especialmente en condiciones sin línea de visión y en entornos de propagación de exteriores hacia interiores. Por lo tanto, el funcionamiento en las bandas de frecuencias más bajas continuará siendo un componente vital para la telefonía móvil, también en el 5G. De manera especial, el funcionamiento conjunto en espectros altos y bajos, por ejemplo 2

GHz y 28 GHz, puede proporcionar beneficios sustanciales. Las frecuencias más altas, con acceso a una gran cantidad de espectro, pueden dar servicio a una gran parte de los usuarios, a pesar de la cobertura más limitada. Esto reducirá la carga en el espectro de baja frecuencia, siempre más colapsado, que quedaría para los usuarios en casos de menos cobertura.

Las bandas de frecuencia en NR estarán tanto en espectros emparejados como en los no emparejados y requieren flexibilidad en la disposición dúplex. Por esta razón, NR ofrece apoyo tanto a FDD como TDD.

Diseño *ultra-lean*

Este principio de diseño tiene como objetivo minimizar las transmisiones siempre activas, y de este modo se permite un mayor rendimiento energético de la red y velocidades de datos más altas. Si las transmisiones son mínimas, consumimos menos e interferimos menos.

Esquema de transmisión y estructura de tramas

Como en LTE, se consideró que OFDM también era un buen mecanismo para NR. Aun así, a diferencia de LTE, donde OFDM con precodificación de DFT es el único esquema de transmisión en el enlace ascendente, NR utiliza OFDM convencional, es decir, no precodificada, como mecanismo de transmisión en el enlace ascendente.

En LTE, todos los dispositivos admiten el máximo ancho de banda de portadora de 20 MHz. Pero teniendo en cuenta los anchos de banda tan diversos que son posibles en NR, no es razonable exigir que todos los dispositivos soporten la portadora de ancho de banda máximo. Además, NR permite que el dispositivo en recepción pueda adaptar el ancho de banda como un medio para reducir el consumo energético del dispositivo. La adaptación de ancho de banda se refiere al uso de un ancho de banda relativamente pequeño para monitorear los canales de control y recibir con velocidades medias, y dinámicamente, abrir un receptor con banda más ancha solo cuando sea necesario para soportar velocidades de datos muy altas. Para gestionar estos dos aspectos, NR define partes del ancho de banda que indican el ancho en el cual un dispositivo se supone que está recibiendo.

La estructura de NR en el dominio temporal se fundamenta en una trama radio de 10 ms que se divide en diez subtramas de 1 ms. Una subtrama se divide en ranuras que constan de 14 símbolos OFDM cada una, es decir, la duración de una ranura en milisegundos no es fija: como una ranura se define como un número fijo de símbolos OFDM, más espaciamiento de subportadoras conduce a una duración más corta de la ranura. NR puede conseguir menos latencia al permitir la transmisión a través de una fracción de ranura. Estas transmisiones también pueden hacerse en una transmisión ya en curso a otro dispositi-

tivo, hecho que permite una transmisión inmediata de datos que requieren una latencia muy baja.

Esquemas dúplex

Teniendo en cuenta las frecuencias portadoras significativamente más altas soportadas por NR en comparación con LTE, un soporte eficiente a los espectros no emparejados es todavía más crítico en NR, en comparación con LTE. NR puede trabajar tanto en espectros emparejados como no emparejados, usando una estructura marco común, a diferencia de LTE, donde se hacía uso de dos estructuras diferentes.

TDD aumenta en importancia cuando nos movemos en las bandas de frecuencia más alta, donde las asignaciones de espectro no emparejado son más comunes. Como ya se ha comentado, estas bandas de frecuencia son menos útiles para la cobertura de área extendida con celdas muy grandes debido a las condiciones de propagación, pero son altamente relevantes para la cobertura de área local con formatos de celdas más pequeñas. En estas implementaciones más densas con formatos de celda más pequeños, las variaciones de tráfico por celda son más rápidas en comparación con las implementaciones de celdas grandes con un buen número de dispositivos activos por celda. Para hacer frente a estas situaciones, el TDD dinámico, es decir, la posibilidad de la asignación dinámica y la reasignación de los recursos en el dominio del tiempo entre los enlaces descendente y ascendente, es un punto clave de la tecnología NR. En contraste con LTE, donde la asignación no cambia con el tiempo, el TDD dinámico (adaptación dinámica del tiempo destinado a las transmisiones en el enlace ascendente y las transmisiones en el enlace descendente) permite seguir las variaciones rápidas de tráfico, que son particularmente pronunciadas en los despliegues densos con un número relativamente pequeño de usuarios por celda.

Soporte para latencia baja

Los protocolos de capa superior MAC y RLC también se han diseñado con latencia baja, con cabeceras que permiten el procesamiento sin saber la cantidad de datos que se tienen que transmitir. Esto es especialmente importante en el enlace ascendente, puesto que el dispositivo puede tener solo el tiempo equivalente a unos cuantos símbolos OFDM desde el momento de la recepción de la confirmación de enlace ascendente y hasta que la transmisión tiene que tener lugar. Por el contrario, el diseño de LTE requiere que las capas MAC y RLC conozcan la cantidad de datos que hay que transmitir antes de que se haga cualquier procesamiento, cosa que hace más complicado un funcionamiento con una latencia muy baja.

Asignación de recursos y transmisión de datos

La asignación de recursos dinámica ya se utiliza en LTE, y es parecido a la de NR.

Los mecanismos de retransmisión de paquetes son clave tanto en la fiabilidad como en la latencia de las transmisiones. Las retransmisiones automáticas híbridas (HARQ) con redundancia incremental se utilizan cuando el dispositivo informa a la estación base del resultado de la decodificación. En el caso de error en los datos recibidos, la red puede retransmitir los datos y el dispositivo combina la información de múltiples intentos de transmisión. A pesar de que el HARQ se ha mostrado como un mecanismo eficaz para la corrección de errores, la retransmisión de todo el bloque de transporte puede ser ineficiente. NR soporta retransmisiones con una granularidad más fina, conocida como grupo de código de bloque (CBG). Esto también puede ser útil cuando gestionamos prioridades. Una transmisión urgente a un segundo dispositivo puede utilizar solo uno o unos cuantos símbolos OFDM, y por lo tanto, causar una alta interferencia al primer dispositivo en solo algunos símbolos OFDM. En este caso, puede ser suficiente con retransmitir solo los CBG interferidos. Además, podríamos indicar al primer dispositivo cuáles son los recursos de tiempo-frecuencia afectados, de forma que pueda tenerlo en cuenta en el proceso de recepción.

Canales de control

Una diferencia importante entre NR y LTE es la estructura tiempo-frecuencia más flexible de los canales de control de enlace descendente, donde se transmiten los PDCCH en uno o varios conjuntos de recursos de control (CORE-SET). A diferencia de LTE, en el que se utiliza todo el ancho de banda de la portadora, se puede configurar para ocupar solo una parte de este ancho. Es necesario para gestionar dispositivos con diferentes capacidades de ancho de banda.

Hay varios formatos diferentes de PUCCH, dependiendo de la cantidad de información y la duración de la transmisión de PUCCH. El más óptimo es el PUCCH corto, que se transmite en los últimos uno o dos símbolos de una ranura y puede soportar un canal de realimentación muy rápido de reconocimientos del HARQ para que el retraso desde el final de la transmisión de datos hasta la recepción del acuse de recibo desde el dispositivo esté en la orden de la duración de un símbolo OFDM.

Diseño centralizado de haces y transmisión multiantena

El apoyo para un gran número de elementos de antena orientables, tanto para la transmisión como por la recepción, es una característica clave de NR. En las bandas de frecuencias más altas, el gran número de elementos de antena se

utiliza principalmente para la formación de haces que permiten extender la cobertura. Por el contrario, en las bandas de frecuencias más bajas, permiten implementar MIMO multidimensional, también conocido como MIMO masivo, que minimiza las interferencias mediante la separación espacial (transmisiones muy directivas).

Con el uso de un número masivo de elementos de antena para las frecuencias más bajas, la posibilidad de separar a los usuarios espacialmente aumenta tanto en el enlace ascendente como en el descendente, pero pide que el emisor tenga conocimiento del canal. En NR se introduce apoyo para el multiplexado espacial multiusuario, ya sea usando un canal de realimentación del estado del canal con alta resolución (utiliza una combinación lineal de vectores de DFT), ya sea con señales de sondeo de referencia en el enlace ascendente (aprovechando la reciprocidad del canal en TDD, en la que el canal en el enlace ascendente es el mismo que el canal en el enlace descendente).

Además, NR permite soportar MIMO distribuido, a pesar de que el soporte no es completo en la versión 15. MIMO distribuido implica que el dispositivo puede recibir múltiples canales compartidos de datos (PDSCH) por ranura para permitir la transmisión simultánea de datos desde múltiples puntos de transmisión al mismo usuario. En esencia, algunas capas MIMO se transmiten desde una estación base, mientras que otras lo hacen desde otra estación base.

MIMO masivo

En los sistemas MIMO multiusuario, un nodo central con múltiples antenas (por ejemplo, una estación base) sirve a un número de usuarios móviles que disponen de un pequeño número de antenas. Por lo tanto, la complejidad de procesamiento de señal en los terminales móviles es baja, especialmente en el caso de los terminales de una sola antena. Aun así, los múltiples usuarios en el sistema introducen interferencia interusuario, que tiene que ser mitigada para tener un funcionamiento apropiado.

A diferencia de los sistemas MIMO multiusuario convencionales, que usan comparativamente un pequeño número de antenas en la estación base (por ejemplo, menos de 16), los sistemas MIMO masivos se espera que puedan hacer uso de centenares o incluso miles de antenas en las estaciones base. Por ejemplo, si el número de antenas en las estaciones base es mucho más elevado que el número de usuarios en el sistema, un simple filtro adaptado de precodificación (enlace descendente) y de detección (enlace ascendente) a la estación base nos dará prestaciones casi óptimas, cosa que facilita el procesamiento de señales tanto en la estación base como en los terminales de usuario.

El MIMO masivo también tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia energética. Se ha demostrado que, si el número de antenas crece

mucho y todos los otros parámetros del sistema son constantes, la potencia de transmisión por usuario en los sistemas MIMO masivos multiusuario se puede reducir proporcionalmente. De hecho, gracias al gran número de grados de libertad espaciales, el MIMO masivo puede ser empleado para proteger los sistemas celulares contra escuchas.

5.3. Evolución futura

En este apartado se hace un recorrido por algunos de los aspectos que se espera que sean puntos clave de la versión 16, prevista para finales del 2019 o comienzos del 2020.

Acceso – *backhaul* integrado

Entendemos por *backhaul* la red que comprende los enlaces entre el núcleo de red y otros elementos de esta red. Es decir, hace funciones de red de apoyo. Para NR, es de esperar una convergencia entre la red *de backhaul* y la red de acceso por varias razones:

- El enlace de acceso puede explotar frecuencias milimétricas, es decir, el mismo rango de frecuencias que se utiliza actualmente para el *backhaul*.
- La densificación esperada de las redes móviles, con muchas estaciones base situadas en interiores y exteriores a nivel de calle, requerirá un *backhaul* inalámbrico capaz de operar en condiciones sin línea de visión y de propagación muy similares a las del enlace de acceso.

La clave es que la separación del espectro entre *backhaul* y acceso no tendría que ser una cuestión reglamentada. Por el contrario, un operador tiene que tener acceso a una parte del espectro. Es entonces decisión del operador cómo utilizar este espectro de la mejor manera posible y cómo dividirlo entre el acceso y el retorno.

Funcionamiento en espectro no licenciado

El espectro con licencia es fundamental para proporcionar calidad de servicio (no tendremos interferencias) y garantizar una cobertura amplia. Se trata del modelo tradicional de asignación de espectro, en el que cada operador adquiere la licencia en exclusiva de una parte del espectro.

El espectro sin licencia, por el contrario, está abierto para que cualquiera lo pueda utilizar sin ningún coste, sujeto a un conjunto de reglas, por ejemplo, en la potencia de transmisión máxima. Ejemplos claros son los que se utilizan en las tecnologías WiFi, Bluetooth, LoRaWAN o SigFox. Como cualquiera puede utilizar el espectro, la interferencia en las bandas sin licencia es típicamente

mucho más alta e impredecible que en los espectros con licencia. En consecuencia, la calidad de servicio y la disponibilidad no pueden ser garantizadas.

Una opción interesante es la combinación de los dos espectros. Dado que los espectros con licencia se utilizan para proporcionar una cobertura amplia y con calidad de servicio garantizada, con un espectro sin licencia tenemos un complemento de área local para aumentar las velocidades de datos de usuario y la capacidad total sin comprometer la cobertura general, la disponibilidad y la fiabilidad.

Aunque la versión 15 no soporta espectros sin licencia, se consideró en el desarrollo del marco básico de NR.

Acceso múltiple no ortogonal (NOMA)

NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*) fue incluido en la norma LTE-Advanced (LTE-A) para 3GPP, donde se denominó transmisión multiusuario por superposición (MUST). Aunque MUST es un caso especial de NOMA con dos usuarios, el concepto de NOMA es escalable y este es el uso que le da 5G NR. Específicamente, la asignación de recursos no ortogonal indica que el número de usuarios o dispositivos soportados no está limitado estrictamente a la cantidad de recursos disponibles ortogonales. Por lo tanto, NOMA puede acomodar significativamente más usuarios que los esquemas OMA (*Orthogonal Multiple Access*) mediante el uso de la asignación de recursos no ortogonal.

NR usa acceso múltiple ortogonal si los diferentes dispositivos están separados en el tiempo y/o frecuencia. Ahora bien, el acceso no ortogonal tiene el potencial de aumentar la capacidad en algunos escenarios. Durante las primeras etapas de desarrollo NR, el acceso múltiple no ortogonal (NOMA) se estudió brevemente, pero no se priorizó.

Los sistemas de comunicación inalámbricas tienen que prestar servicios a muchos usuarios en la misma área (por ejemplo, la misma celda) al mismo tiempo. Para coordinar y garantizar los servicios de varios usuarios, hace falta algún tipo de técnica de acceso múltiple. Las cuatro primeras generaciones de sistemas móviles se han basado en el acceso múltiple ortogonal (OMA). La tercera generación (3G) lo hizo en acceso múltiple por división de código (CDMA). La cuarta generación (4G), que implementa LTE, adopta el acceso múltiple por división en frecuencia ortogonal (OFDMA). La principal ventaja de OMA es que en condiciones ideales se evita la interferencia interusuario. En cambio, el número de usuarios que pueden ser gestionados en un sistema OMA está limitado por el número de dimensiones ortogonales disponibles.

En NOMA, varios usuarios transmiten utilizando el mismo recurso (en términos de tiempo y frecuencia). De este modo, se tolera una cierta cantidad de interferencia entre usuarios introducida por la transmisión no ortogonal, que,

posteriormente, se elimina en el receptor mediante la técnica SIC (cancelación sucesiva de interferencias). Aunque hay varias implementaciones de NOMA, las dos arquitecturas más populares son el NOMA en el dominio de la potencia y el acceso múltiple por codificación dispersa (SCMA). En el NOMA en el dominio de la potencia, varios usuarios son multiplexados en el mismo recurso de tiempo y frecuencia, y en el receptor se explotan las diferencias de potencia recibida para la separación de las señales de los usuarios a través de la SIC. Así, el receptor descodifica los paquetes con una potencia recibida más alta o, dicho de otro modo, con la mejor relación señal a ruido más interferencia (SINR). Una vez descodificadas, las señales son extraídas de la señal recibida. De este modo, aquellas transmisiones que inicialmente no habían podido ser descodificadas por su baja SINR, pasan a ser las señales con una mejor SINR y ya pueden ser descodificadas. Este proceso se repite sucesivamente hasta que ya no es posible descodificar ninguna otra señal.

Comunicaciones de dispositivo a dispositivo

La versión 15 no admite la comunicación directa de dispositivo a dispositivo. La transferencia de datos directa entre dispositivos se tendría que configurar si la red llega a la conclusión de que es más eficiente (hacen falta menos recursos) o proporciona más calidad (más velocidades de datos y/o menos latencia) en comparación con la conectividad indirecta a través de la infraestructura. Esta funcionalidad abre todo un campo de nuevas oportunidades, empezando por las comunicaciones en los casos de situaciones de emergencia.

Red de acceso radio en la nube (C-RAN)

Las redes de acceso radio en la nube (*Cloud-Radio Access Network*, C-RAN) se han visto como una de las arquitecturas RAN clave para 5G. Las principales motivaciones para la propuesta de C-RAN son dos. Por un lado, la progresiva densificación de la red de acceso (es decir, el incremento de estaciones base desplegadas) incrementa los costes de los operadores. En concreto, la centralización de parte de las funciones de red permite desplegar estaciones base menos complejas y más baratas y, a la vez, aprovechar la ganancia estadística que significa compartir la capacidad computacional. Por la otra, la densificación de la red pide más coordinación entre estaciones base para minimizar, entre otras cosas, la interferencia. Esta mayor coordinación se consigue de manera más eficiente y con retrasos menores si las funciones de las diferentes estaciones base son implementadas en las mismas máquinas.

El concepto de C-RAN fue propuesto por primera vez por China Mobile en un libro blanco en el 2009. La idea básica de C-RAN se inicia con la centralización de una parte de las funciones implementadas hasta entonces en las estaciones base. Así, consiste en agregar en la misma ubicación diferentes unidades de banda base (BBU), que en una implementación tradicional están separadas geográficamente. Una vez centralizadas en una unidad central, tendría que ser

posible hacer que diferentes BBU se comunicaran entre sí de una manera más óptima, conectándolas con redes de conmutación de alta velocidad, cosa que permitiría la aplicación de algoritmos cooperativos para mejorar el rendimiento del sistema. La simple centralización no admite la compartición de recursos entre diferentes BBU físicas. Con la virtualización esto cambia. El objetivo final de C-RAN es hacer la función llamada cloudificación de recursos, que es poner en común los recursos de procesamiento en banda base para que puedan ser manejados y asignados dinámicamente según la demanda.

La demanda de tráfico de pico puede ser 10 veces mayor que fuera de horas punta. En C-RAN, el procesamiento de señal de banda base y las funcionalidades de radio están desacoplados. En general, un C-RAN consta de una unidad de banda base (BBU) colocada en un centro de datos basado en la nube, y un gran número de cabeceras radio remotas de bajo coste (RRH), cada una desplegada en una pequeña celda. Las BBU y RRH se conectan a través de enlaces de retorno (fronthaul). Las BBU hacen procesamiento de señal centralizada y gestión de interferencias.

La arquitectura C-RAN tiene varias ventajas. En primer lugar, C-RAN puede adaptarse a las fluctuaciones temporales y espaciales de tráfico para proporcionar servicios a la carta mediante la explotación de la ganancia de multiplexación estadística. En segundo, C-RAN facilita la implementación de estrategias cooperativas de transmisión/recepción, por ejemplo, una mejor coordinación de interferencia interceldas (el CIC) y la transmisión multipunto coordinada (CoMP). Con estas estrategias cooperativas, la eficiencia espectral puede aumentar significativamente con una gestión de interferencias eficaz entre múltiples RRH.

C-RAN también plantea nuevos retos para la investigación:

- En las BBU se requieren cantidades masivas y precisas de información de estado de canal (CSI).
- La movilidad del usuario genera canales con una gran variabilidad en el tiempo, un aspecto que aumenta la frecuencia de actualización de la CSI.

Debido a los recursos limitados de entrenamiento y el retraso de transmisión introducido por los enlaces de retorno, el CSI recibido por los BBU puede ser poco preciso.

6. DVB-H

En este apartado haremos una descripción del estándar DVB-H, que nos permite la recepción de televisión en un terminal alimentado por baterías y que puede estar en movimiento.

En la televisión digital en movilidad, se pueden diferenciar dos modalidades de trabajo.

- **Unicast:** se establece un canal exclusivo (comunicación punto a punto) entre la estación base y el usuario. Esta modalidad sólo puede ser utilizada por un limitado número de usuarios de manera simultánea, tantos como canales exclusivos de comunicación se puedan establecer entre la estación base y los usuarios. Se trata de la modalidad que vienen utilizando los operadores de telefonía móvil.

Este modelo se basa en *streaming unicast*. Cada terminal solicita una sesión de *streaming* a los servidores y para cada solicitud que reciben los servidores, se origina una transmisión del *stream*. Hay una transmisión diferente para cada usuario, aunque solicitemos el mismo canal. Esto es claramente ineficiente.

- **Broadcast (TDT móvil).** consiste en un auténtico servicio de difusión, ya que se establece una comunicación punto (estación emisora) - multipunto (dispositivos móviles), sin limitación en el número de usuarios que acceden al servicio de manera simultánea.

En un modelo *unicast* tenemos fuertes limitaciones a la hora de comprimir la información. Aunque un móvil 3 G puede recibir datos a 384 Kbps sin problemas, si codificamos los canales a esta velocidad llegaremos enseguida al límite de capacidad del nodo B. Por este motivo, se limitan a unos 128 Kbps. A esta velocidad, una pantalla de 176 × 144 píxeles (tamaño QCIF) se ve con calidad aceptable. Sin embargo, aparecen dos problemas:

- 1) Si en la imagen hay pequeños objetos en movimiento (por ejemplo, un partido de tenis), la calidad será mala.
- 2) Hay pantallas con más resolución (QVGA, 320 × 340) que requerirán más velocidad. Por este motivo, los modelos *broadcast* son los más apropiados para TV en el móvil.

Además, la modalidad *broadcast* es la que más similitudes tiene con el servicio de televisión digital proporcionado por el resto de las tecnologías (terrestre, cable, satélite, ADSL).

DVB-H (*Digital Video Broadcasting Handheld*) es un estándar abierto desarrollado por DVB. La tecnología DVB-H constituye una plataforma de difusión IP orientada a terminales portátiles que combina la compresión de vídeo y el sistema de transmisión de DVB-T, estándar utilizado por la TDT (televisión digital terrestre).

DVB-H hace compatible la recepción de la TV terrestre en receptores portátiles alimentados con baterías. Es decir, DVB-H es una adaptación del estándar DVB-T adaptado a las exigencias de los terminales móviles.

El mayor competidor para este estándar es la tecnología DMB. DVB-H es un estándar abierto.

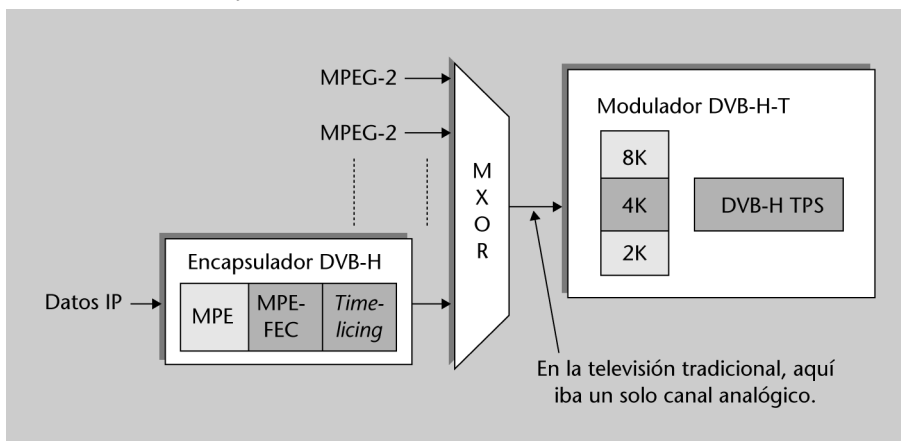
A causa de algunas especificaciones técnicas de los dispositivos para los cuales se ha creado el estándar, DVB-H ha tenido que someterse a algunos cambios respecto a su estándar predecesor DVB-T. Algunos de los cambios más destacables se enumeran a continuación:

- **Bajo consumo:** el primer problema al que se debía hacer frente era la necesidad de reducir el consumo de esta nueva tecnología, ya que está enfocada a terminales portátiles. Para el usuario, es importante el hecho de no tener que recargar constantemente el terminal, por lo que se debía buscar una solución que el estándar DVB-T no ofrecía. La mencionada solución recibe el nombre de *time-slicing*. A partir de las esperas introducidas por este mecanismo, se ahorra hasta un 90% de batería respecto al funcionamiento proporcionado por DVB-T. Además, el mecanismo de *time-slicing* resulta especialmente útil para llevar a cabo el *Handover*.
- **Mejora la recepción:** el segundo problema al que se debía hacer frente tiene lugar en recepción, ya que los terminales portátiles a los que se dirige este estándar tienen antenas de reducidas dimensiones. El nuevo estándar propone la solución denominada MPE-FEC (*MultiProtocol Encapsulation / ForwardError Correction*), sistema que proporciona una sólida protección ante errores. A pesar de que MPE-FEC es opcional en este estándar, su uso proporciona una notable mejora en la relación portadora a ruido (C/I) y una minimización del efecto Doppler, uno de los principales problemas presentes en los receptores móviles.
- **Calidad de recepción:** el modo 4k, que proporciona un total de 4.096 portadoras, presenta un compromiso entre calidad de recepción en movimiento y tamaño de la red. Por lo tanto, el mencionado estándar introduce un modo adicional a los ya contemplados por DVB-T.

Ya que DVB-H está basado en DVB-T, es compatible introducir servicios DVB-H en la banda de frecuencia en la que se encuentra DVB-T. Por lo tanto, DVB-H, al igual que su predecesor, utiliza canales de 5 MHz de ancho de banda.

- **Handover:** DVB-H soporta el *handover* de manera muy eficiente. Este hecho se debe en gran parte a los periodos de silencio generados gracias al *time-slicing*. En estos periodos de silencio, el receptor puede escanear otras frecuencias para encontrar aquella que le suministre una mayor potencia y, llegado el caso, ejecutar el *handover*. Se puede destacar que la posibilidad de hacer la evaluación de frecuencias alternativas en estos periodos de silencio sin perturbar la recepción del servicio en curso es una característica muy importante del estándar DVB-H.
- **Uso de los bits reservados de la trama TPS (Transmitter Parameter Signalling):** con esto, señalizamos de manera rápida la existencia de servicios DVB-H en un canal. Un receptor no necesita decodificar el canal para tener esta información. Facilitan el *handover*. Se usan durante la búsqueda de nuevos canales en el tiempo entre ráfagas. Un receptor no DVB-H ignora esta señalización.

Diferencias entre DVB-H y DVB-T



Los canales TDT de cobertura autonómica o nacional van entre los 758 y 862 MHz y cada uno ocupa 8 MHz. En cada canal podemos tener unos 3-5 programas. En cambio, en el espacio de un canal TDT podemos tener unos 10-50 canales para DVB-H.

Además de DVB-H, tenemos otros estándares:

- El **DVB-SH** es una versión mejorada del DVB-H y hará posible que realmente la televisión llegue a unos dispositivos móviles de tercera generación (3G) no sólo en áreas urbanas, sino también en áreas rurales donde sería muy costoso para los operadores de telefonía móvil enviar su señal. El DVB-SH utiliza tanto señales terrestres como vía satélite, y ofrece un mayor ancho de banda, lo que permite captar más canales y a un menor coste que el de las soluciones utilizadas hasta ahora.
- **MediaFLO** de Qualcomm, principal competidor de DVB-H, que puede enviar contenido de manera más económica utilizando tecnología multi-

transmisión para emitir muchos canales a través del ancho de banda requerido por un único canal UHF de TV.

- **DMB (*Digital Media Broadcasting*)**, que ha tenido éxito en Asia. También conocido como DMB-T, *Digital Media Broadcasting - Terrestrial*, es el más joven de los principales estándares y brinda la mejor calidad de recepción para la potencia requerida. Ha evolucionado del estándar *European Digital Audio Broadcasting* (DAB), que fue ampliamente soportado por los fabricantes coreanos.

Se espera que la mayor parte de los ingresos provenga de los servicios interactivos, y no de la suscripción mensual. También habrá ingresos por publicidad. Los servicios interactivos son una buena fuente de ingresos, ya que las comunicaciones de retorno se hacen por la red de telefonía.

Móviles que incorporan DVB-H

Algunos terminales móviles que incorporan receptor DVB-H son el Nokia N92 y el LG KU950.

Actividades

1. En este módulo, se ha hablado del estándar DVB-H como un sistema para poder recibir televisión en el terminal móvil. Una de las innovaciones tecnológicas que incorpora es el *time-slicing*.

a) Explicad por qué no es posible hacer *time-slicing* con el DVB-T. También incorpora mecanismos de protección ante errores.

b) Explicad el mecanismo MPE/FEC que incorpora el DVB-H. Todos los sistemas de telecomunicaciones que usan el espectro radioeléctrico deben cumplir unas normas nacionales (UN).

c) Indicad cuál es la UN que regula las transmisiones de televisión digital (incluyendo el DVB-H) y explicad la situación actual del DVB-H dentro de este marco. Además del DVB-H, hay otros estándares para recepción de televisión en el móvil.

d) Explicad las principales características de los estándares DVB-SH, T-DMB, FLO, ISDB-T, OneSegment, CMMB y S-DMB. Especialmente, indicad cuál es el organismo promotor, las frecuencias de trabajo y las ventajas/inconvenientes respecto de DVB-H.

Ejercicios de autoevaluación

1. Una de las principales innovaciones del futuro estándar LTE (casi cuarta generación) es el uso de técnicas MIMO. Explicad qué son estas técnicas y los tipos de técnicas MIMO.

2. Explicad el concepto de *fast scheduling* en el estándar HSDPA.

3. En HSDPA se define un canal HS-DPCCH, que contiene dos informaciones: el HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) y el CQI (*Channel Quality Information*). Explicad qué son estas dos informaciones y para qué sirven, y aclarad si van de móvil a base o de base a móvil.

4. Una cierta base UMTS acepta HSDPA fase 3 y HSUPA fase 1. Explicad qué quiere decir esto.

5. Un sistema LTE que sin MIMO dé 60 Mbps, ¿qué velocidad puede dar con un MIMO 4×4 ? Razonadlo.

6. Enumerad los canales del enlace ascendente de LTE explicando la modulación que usan.

7. ¿Qué es el *time-slicing* en el estándar DVB-H?

8. ¿Cuántos programas de televisión en DVB-H podemos tener en el espacio frecuencial que ocupa un programa de televisión en TDT?

9. Cuando hablamos de televisión en el móvil, ¿qué es el DVB-SH?

10. En el estándar de televisión por móvil DVB-H se habla de las SFN (*Single Frequency Network* o redes de frecuencia única). Explicad qué quiere decir este concepto y por qué es de utilidad en los sistemas de televisión por móvil.

Solucionario

1. Las técnicas MIMO (*multiple input multiple output*) son aquellas que usan diferentes antenas para transmitir y/o recibir. Hay tres técnicas principales: la denominada *beamforming* (que combina las antenas para crear un diagrama de radiación a nuestra medida en cada momento), la de diversidad en transmisión (transmitimos lo mismo por diferentes antenas, con lo que mejoramos la relación señal/ruido) y la de multiplexado en espacio (enviamos diferentes cadenas de datos de manera simultánea en antenas diferentes).

2. El *fast scheduling* es un mecanismo de asignación de recursos que tiene en cuenta la calidad del enlace de cada usuario. De este modo, en cada instante se asignan los recursos del canal compartido al usuario que tiene más calidad en su enlace (el que tiene un mejor C/I).

3. El HARQ es una información que el móvil envía a la base para decirle que los datos que ésta le ha enviado son erróneas; entonces, el móvil solicita una repetición selectiva de estos datos.

El CQI lo envía el móvil e indica la calidad del canal, para que la base decida cuál es el esquema de codificación que hay que aplicar en el envío siguiente.

4. HSDPA fase 3 quiere decir que podemos tener hasta 14,4 Mbps/celda, 7,2 Mbps/usuario y 64 usuarios/celda. Además, soporta las 12 categorías de terminales. HSUPA fase 1 quiere decir que podemos tener hasta 1,92 Mbps/usuario y hasta 20 usuarios/celda.

5. En un MIMO 4×4 , lo que tenemos son cuatro antenas transmisoras que se reparten el flujo de datos originales. Es decir, que si teníamos 60 Mbps, ahora tendremos una velocidad unas 4 veces superior (unos 240 Mbps).

6. El canal PRACH (*Physical Random Access Channel*) se usa para establecer llamadas y utiliza QPSK. El canal PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) se utiliza para los ACK y el *scheduling* y usa BPSK o QPSK. El canal PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*) utiliza QPSK, 16QAM o 64QAM.

7. El *time-slicing* es la técnica que permite que el receptor DVB-H no deba estar todo el tiempo mirando el canal, sino que sólo será necesario que lo haga en los instantes de tiempo asignados. Entre otras ventajas, esto hace que el consumo eléctrico sea menor.

8. Cada programa en DVB-H requiere unos 256 Kbps. Teniendo en cuenta que cada programa en TDT requiere unos 4 Mbps, podemos tener unos 15 canales, aproximadamente.

9. DVB-SH son las siglas de *DVB satellite handheld*. Se trata del DVB pensado para móviles pero que se ayuda de satélites para difundir las imágenes. De este modo, puede conseguir una cobertura global.

10. DVB-H permite trabajar con redes de frecuencia única. Esto significa que todos los transmisores radian la misma información a la misma frecuencia y al mismo tiempo. De este modo se simplifica el terminal, ya que no deberá cambiar de frecuencia de recepción. Además, podremos tener estaciones emisoras muy cercanas y emitiendo con poca potencia, algo especialmente interesante en ciudades donde es habitual la aparición de zonas de sombra.

Glosario

DL *m Downlink*. Hace referencia al enlace descendente.

DVB-H *m Digital Video Broadcasting Handheld*. Es un estándar de vídeo digital pensado para recepción en terminales portátiles.

DVB-T *m Digital Video Broadcasting Terrestrial*. Se trata de un estándar de vídeo digital que se emite desde antenas terrenales.

HARQ *m Hybrid Automatic Repeat Request*. Es un protocolo de recepción y control de errores.

HSPA *m High Speed Packet Access*. Acceso de paquetes a alta velocidad.

HSUPA *m High Speed Uplink Packet Access*. Acceso de paquetes a alta velocidad en el enlace ascendente.

LTE *m Long Term Evolution*. Es un sistema que conecta los estándares HSPA con la 4G.

MIMO *m Multiple Input Multiple Output*. Con esta palabra, se describen los sistemas que tienen diferentes entradas y distintas salidas.

MISO *m Multiple input single output*. Con esta palabra, se describen los sistemas que tienen diferentes entradas y una sola salida.

MME *m Mobility management entity*. Es un bloque encargado de la gestión de la movilidad en redes móviles.

QAM *f Quadrature amplitude modulation*. Modulación de amplitud en cuadratura.

RAN *m Radio access network*. Son los elementos que forman parte del acceso radio (por ejemplo, estaciones base).

SF *m Spreading factor*. Es el factor de ensanchamiento en los sistemas basados en CDMA.

SM *m Spatial multiplexing*. Multiplexado espacial.

TTI *m Time transmission interval*. Es el tiempo durante el cual se asigna un recurso en sistemas de transmisión digital.

UL *m Uplink*. Hace referencia al enlace ascendente.

WMAN *f* Red de área metropolitana sin hilos.

Bibliografía

Agustí, R. (2010). *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Ed. Fundación Vodafone España.

Dahlman, E. y otros (2018). *Cellular Internet of Things*. Elsevier.

Holma, H. (2007). *WCDMA for UMTS-HSPA evolution and LTE*. John Wiley.

Huidobro. (2002). *Comunicaciones móviles*. Editorial Paraninfo.

Liberg, O. y otros (2018). *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Elsevier.

Sauter, M. (2006). *Communication Systems for the Mobile Information Society*. John Wiley.

Sendín (2004). *Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles*. Ed. McGraw Hill.

Wong, V. y otros (2017). *Key Technologies for 5G Wireless Systems*. Cambridge: University Press.

