

Capítulo 3

Contenido

SISTEMAS DIGITALES DE TELEFONÍA MÓVIL.....	64
OBJETIVOS DEL CAPÍTULO	64
3.1 DE LA PRIMERA A LA SEGUNDA GENERACIÓN [5]	64
1G	64
2G	65
3.2 IS-54 E IS-136	67
IS-54.....	67
Características técnicas	68
IS-136.....	68
3.3 IS-95	69
3.4 GSM.....	70
<i>Antecedentes</i>	70
<i>Servicios</i>	71
<i>Arquitectura de la red</i>	71
La estación móvil	74
Subsistema de estación base.....	74
Subsistema de red.....	74
<i>El radio enlace</i>	75
Uso de frecuencias de GSM en América.....	76
Acceso múltiple y estructura del canal	77
Canales de tráfico	78
Canales de control.....	78
Estructura de una ráfaga.....	79
Codificación de la voz.....	79
Codificación del canal y modulación	80
Ecualización por trayectorias múltiples.....	80
Saltos de frecuencia	81
Transmisión discontinua	81
Recepción discontinua	81
Control de potencia	81
<i>Handover (handoff)</i>	82
Gestión de la movilidad	82
Registro y actualización de ubicación.....	82
Autenticación y seguridad.....	83
Enrutamiento de llamadas	84
<i>Impacto social y económico</i>	84
<i>Factores críticos de éxito</i>	85
<i>Conclusiones</i>	85
3.5 HSCSD	85
3.6 GPRS	87
GPRS y HSCSD	90
3.7 PDC.....	90

Sistemas digitales de telefonía móvil

Objetivos del capítulo

El presente capítulo describe los principales sistemas digitales de telefonía móvil, mejor conocidos como sistemas de segunda generación o 2G y los 2.5G que están en la ruta de migración hacia los sistemas 3G.

Después de estudiar el capítulo el estudiante deberá:

- Entender la evolución de los sistemas de telefonía móvil, de analógicos a digitales.
- Saber cuales son los principales sistemas de segunda generación y sus características
- Conocer las características y funcionamiento de GSM
- Conocer las diferencias de GPRS con GSM

3.1 De la primera a la segunda generación [5]

En menos de 25 años la telefonía móvil ha evolucionado de unos sistemas de comunicación inalámbrica muy limitados en extensión, en capacidad y en servicios, a las redes modernas celulares en las cuales estas limitaciones han sido ampliamente superadas, más allá de los pronósticos más optimistas.

Como vimos en el capítulo anterior, las primeras redes de telefonía móvil (anteriores a 1980) estaban restringidas a un área geográfica local: la extensión de una ciudad y sus alrededores.. Los equipos, por su tamaño y alto consumo de energía, se instalaban en vehículos y esto necesariamente limitaba su uso. Nadie esperaba usar el teléfono móvil fuera del área de servicio.

La capacidad de los sistemas para atender un número significativo de usuarios era muy baja (por ejemplo, el sistema de Bell Labs en los años 70 sólo podía atender 12 llamadas concurrentes en toda la ciudad de Nueva York), precisamente por limitaciones técnicas y falta de disponibilidad de frecuencias en el espectro. Estos sistemas estaban circunscritos a unos pocos miles de suscriptores y la concurrencia en el servicio era muy restringida.

El único servicio disponible era voz, igual que el ofrecido por las redes convencionales de telefonía; la novedad estaba en la movilidad pero dentro de las restricciones descritas.

1G

Los sistemas celulares de primera generación (1G), superaron las limitaciones de extensión del servicio y escalabilidad en el número de usuarios. El crecimiento, en estos dos factores, en los primeros años de funcionamiento fue notable, al punto que abrió múltiples oportunidades de negocios e impulsó la industria de telecomunicaciones

vinculándose a la cadena de valor nuevos participantes de distintos países. El impacto social y económico por la industria de la telefonía móvil ha sido realmente significativo.

Sin embargo, en los sistemas 1G el único servicio era la transmisión de voz y el crecimiento de la demanda fue principalmente por la comodidad de la movilidad que ofrece el sistema y el hecho que el servicio está orientado a comunicar directamente a personas, no a comunicar dos sitios o localidades. Este cambio conceptual es una razón para el éxito de los sistemas de telefonía móvil.

La tecnología utilizada en los sistemas de primera generación define claramente las características de extensión, escalabilidad y servicio. Para transmitir voz, las señales son analógicas. La técnica es modular la señal analógica, con base en una portadora de radio frecuencia (RF) y transportarla utilizando tecnología de conmutación de circuitos, como en las redes telefónicas fijas tradicionales. La modulación analógica es fácil de implementar con la tecnología de la época. Los requerimientos de ancho de banda eran muy modestos y el uso eficiente del espectro no era un factor crítico. El método para acceder al medio inalámbrico por múltiples usuarios, con las características anteriores, debe ser por división de frecuencia, es decir, FDMA (véase el capítulo 1).

Lo mejor de los sistemas 1G era que todos los operadores o proveedores del servicio (también llamados WSP o *Wireless Service Providers*) en el país utilizaban la misma técnica de modulación y el mismo método de acceso al medio (Cierto en los Estados Unidos, en el Japón y los países escandinavos). Esta uniformidad en los diversos operadores permite que un suscriptor pueda desplazarse a sitios atendidos por otros operadores y hacer o recibir llamadas sin dificultades. Este concepto se denomina *roaming* y es la facilidad de utilizar el teléfono celular fuera del área de servicio del operador con el cual está suscrito. El *roaming* global es uno de los propósitos de los sistemas modernos de tercera generación.

2G

La demanda creciente por la telefonía celular, apoyada en los avances de la tecnología digital resultó, en menos de una década, en la segunda generación de sistemas de telefonía móvil (2G). Los sistemas 2G utilizan tecnología digital, en parte porque les permite acomodar más usuarios con el mismo espectro, pero también abre posibilidades para ofrecer otros servicios, adicionales al de voz. Se puede ejercer un mayor control sobre la red, sobre los dispositivos móviles (por ejemplo, control en la potencia de la señal) y brindar mayor privacidad (seguridad) para los usuarios.

Los sistemas 2G son digitales que usan FDMA para segmentar la banda de frecuencias del espectro en canales separados pero combinando otra técnica de acceso al medio como TDMA o CDMA pueden compartir el canal asignando a cada usuario una ranura de tiempo (*time slot*) o un código, según la técnica. Esto permitió atender más usuarios concurrentes por celda y alcanzar tasas de transferencia de datos del orden de 14 kbps. El servicio ya no es solamente voz; también incluye transmisión de datos. El inconveniente es que se deben cambiar los teléfonos.

El mayor problema con el cambio a tecnología digital es que se presentan muchas alternativas para escoger. Por un lado, está la opción del método de acceso, TDMA o CDMA. De otro, la banda de frecuencias. Mientras que 1G solo ofrecía servicio en la banda de 900 MHz (en los Estados Unidos), 2G ofrece servicio en las bandas de 900 MHz y 1900 MHz (EU).

Las consecuencias han sido que en los Estados Unidos, de un sistema 1G (AMPS) predominante en todo el país, en diez años habían surgido tres sistemas 2G: IS-54 (D-AMPS), IS-136 e IS-95a (*cdmaOne*).

En Europa ocurrió lo contrario. Varios sistemas 1G diferentes e incompatibles (TACS en el Reino Unido, C-Netz en Alemania Occidental y Austria, NMT en los países escandinavos, Radiocom. 2000 en Francia, Comvik en Suecia, etc.) se integraron en un sistema 2G predominante GSM. El éxito de esa estrategia ha sido tal que en la actualidad GSM cuenta con el mayor número de suscriptores en el mundo: más de 2 mil millones de suscriptores a finales del primer semestre de 2006, con el 82% del mercado mundial y 29% de la población global usando la tecnología en más de 210 países.

Japón migró su sistema analógico J-TACS a uno digital basado en el Norteamericano D-AMPS, llamado PDC. *Personal Digital Cellular* ha tenido un crecimiento extraordinario debido a un servicio novedoso que integra a Internet al sistema celular, llamado *i-mode*.

Estas rutas de migración se muestran en la *Fig. 3.1*. En las siguientes secciones veremos las principales características de estos sistemas de segunda generación, examinando en algún detalle GSM, la tecnología de comunicaciones de crecimiento más acelerado de todos los tiempos.

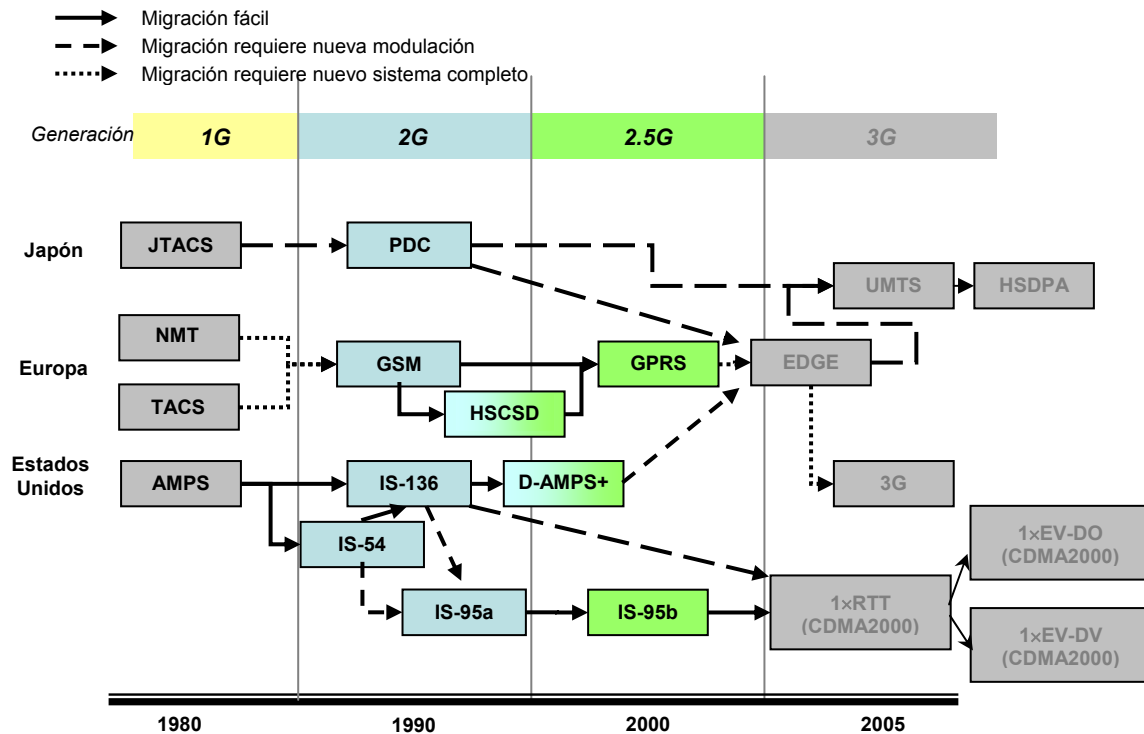


Fig. 3.1 Evolución de los estándares de segunda generación

3.2 IS-54 e IS-136

IS-54

De todos los estándares 1G existentes en los años 80, el de mayor éxito ha sido AMPS. Sin embargo, AMPS presenta varios inconvenientes. En primer lugar, no tiene el potencial para soportar la creciente demanda de servicio; la capacidad de atender usuarios concurrentes en una celda es muy limitada (véase capítulo 2). Además la privacidad y seguridad del sistema es muy deficiente: cualquier persona con el equipo adecuado puede escuchar y grabar las conversaciones; la clonación de los móviles no presenta grandes dificultades técnicas. Estas deficiencias impulsaron la investigación para construir sistemas más adecuados.

El primero de estos sistemas fue IS-54 (*Interim Standard-54*), una versión digital de AMPS. IS-54 triplicó la capacidad con TDMA, multiplexando las llamadas de los usuarios sobre la misma frecuencia (canal). El sistema es compatible hacia atrás con AMPS pues utiliza las mismas frecuencias y estructura lógica, de tal manera que un operador (*cellular carrier*) podía los canales analógicos de voz a digital. Si el suscriptor usa un teléfono de modo dual (nuevos teléfonos) utiliza los canales digitales cuando estén disponibles y de lo contrario funciona, por defecto, con los canales analógicos. Esto significa que los dos sistemas, AMPS e IS-54, pueden coexistir en la misma red. Los suscriptores con teléfonos analógicos no quedan excluidos, simplemente no tienen acceso a los nuevos servicios de IS-54.

Características técnicas

IS-54 utiliza las mismas bandas de frecuencia (824 a 849 y 869 a 894 MHz) y canales de 30 kHz de AMPS. Se aumenta la capacidad digitalizando la voz y dividiendo cada canal de 30 kHz en tres bloques o ranuras (*slots*) de tiempo, asignando cada ranura a un usuario diferente; lo cual resulta en tres usuarios atendidos por cada canal analógico (de ahí la triple capacidad del sistema). Con la ventaja adicional que el sistema digital es más seguro porque los escáners analógicos no pueden interpretar las señales digitales.

El estándar IS-54 especifica 84 canales de control, de los cuales 42 se comparten con AMPS. Para mantener la compatibilidad con AMPS, los canales de control primarios, ascendente y descendente, en IS-54 utilizan las mismas técnicas de señalización y esquema de modulación (binario FSK) que AMPS.

La tasa de transferencia del canal de transmisión para modular la portadora digitalmente es 48.6 kbps.

El esquema de modulación para IS-54 es $\pi/4$ DQPSK (*Differential Quaternary Phase Shift Keying*), que permite que una tasa de transferencia de 48.6 kbps con canales de 30 kHz tenga una eficiencia del ancho de banda de 1.62 b/s/Hz (que es 20% mejor que GSM). El inconveniente es que no es muy eficiente en el gasto de energía y resulta en aparatos más pesados y tiempos de recarga de las baterías más cortos.

IS-54 fue el primer estándar que especificó medidas de seguridad, usando encriptación. Utiliza el algoritmo CAVE (*Cellular Authentication, Voice Privacy and Encryption*) para autenticación y CMEA (*Cellular Message Encryption Algorithm*) para encriptación.

IS-136

Por el año 1993 el sistema celular en los Estados Unidos se estaba quedando corto de capacidad. El número de suscriptores ascendió, de 1.5 millones en 1988 a más de 13 millones en 1993. Se necesitaban avances en la tecnología para atender este crecimiento.

El estándar mejorado se denominó IS-136 (*Interim Standard-136*) y es la segunda versión de un sistema celular digital con TDMA en los Estados Unidos. Se anunció en 1994 como “Digital AMPS” o D-AMPS; también se conoce como TDMA (el producto, distinto del método de acceso múltiple). En general, D-AMPS o DAMPS, se refiere al estándar IS-136 o IS-54 que son muy similares y están juntos basados en TDMA.

Una medida práctica fue adicionar un canal al diseño híbrido de IS-54. A diferencia de IS-54, el estándar mejorado utiliza TDMA en el canal de transmisión de voz y en el canal de control. El canal de control digital permite la cobertura residencial y en interiores de edificios, aumenta significativamente la duración de la batería. IS-136 adicionó varias características al estándar IS-54, incluyendo mensajería de texto, datos por conmutación de circuitos (CSD) y un protocolo de compresión mejorado. SMS y CSD son parte del estándar GSM y la implementación de IS-136 es prácticamente igual.

Los canales de tráfico TDMA de IS-136 utilizan el mismo esquema de modulación que IS-54, $\pi/4$ DQPSK a una tasa de modulación de 24.3 kbaud y una tasa de datos efectiva de 48.6 kbps en los 6 *time slots* que conforman una trama en el canal de 30 kHz.

La tabla de la Fig. 3.2 lista las velocidades de transmisión para D-AMPS. La capacidad es menor que GSM, lo cual significa que la voz es de inferior calidad.

	Voz		Datos
	Full-rate	Half-rate	Max.
Codec	7.95 kbps	3.73 kbps	9.6 kbps

Fig. 3.2 Capacidad de codecs en D-AMPS

3.3 IS-95

IS-95 o *Interim Standard 95* es el nombre del estándar para la primera tecnología celular CDMA, introducida por la compañía *Qualcomm* en los Estados Unidos, pero ahora supervisada por una organización independiente llamada CDG (*CDMA Development Group*). Su nombre comercial es “*cdmaOne*” y ha sido estandarizada por la TIA (*Telecommunications Industry Association*) como IS-95A o TIA-EIA-95. También se conoce en el medio como N-CDMA o *Narrowband CDMA*.

IS-95 un estándar para telecomunicaciones móviles de segunda generación (2G) que utiliza el método de acceso CDMA o *Code Division Multiple Access* (véase Capítulo 1) y opera en las bandas de 800 MHz (824-894 MHz) y 1900 MHz (banda PCS, 1850-1990 MHz). Los sistemas CDMA parecieran ser más sencillos que los basados en TDMA. No tienen ranuras de tiempo o *slots*, ni estructura de tramas; cada dispositivo móvil simplemente transmite y recibe todo el tiempo, enviando muchas copias de la misma información para asegurarse que por lo menos una llega a su destino.

El número de copias es la ganancia y depende del ancho de banda del canal y del código utilizado. *cdmaOne* utiliza un código denominado códigos de Walsh. Este es un conjunto de 64 números, cada uno de 64 bits, que se han calculado para cancelarse uno a otro (son ortogonales). Cada usuario tiene un código de Walsh diferente que lo utiliza para multiplicar cada bit de datos antes de transmitirlo. De tal manera que cada bit se envía 64 veces; la tasa de transferencia bruta por usuario en el enlace descendente es 19.2 kbps, pero el dispositivo móvil está escuchando a 1228.8 kbps (64×19.2).

La alta tasa de transmisión se logra usando dos técnicas diferentes de modulación de fase, QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) en el enlace descendente y OQPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*) en el enlace ascendente. Este último requiere más corrección de errores anticipada (*forward error correction*) porque los teléfonos individuales no pueden coordinar sus transmisiones como lo hacen las estaciones base. La corrección extra realizada significa que la tasa de transferencia bruta en el enlace ascendente es mayor, 28.8 kbps.

La tabla de la Fig. 3.3 muestra los codecs utilizados en *cdmaOne*. Estos codecs son similares a los de GSM y producen la misma calidad de voz. En la tabla pareciera que el sistema es asimétrico y favorece el enlace ascendente. No es así pues la capacidad adicional se requiere para corrección de errores.

	Voz	Datos
	<i>kpbs</i>	<i>kpbs</i>
Codec	13	14.4
FEC (Uplink)	15.8	14.4
FEC (Downlink)	6.2	4.8

Fig. 3.3 Codecs en *cdmaOne*

Transmitir cada bit 64 veces parece un desperdicio extraordinario. De otro lado, el mismo canal se puede utilizar por muchos dispositivos móviles diferentes y por todas las estaciones base, al mismo tiempo. Esto significa que las celdas contiguas pueden utilizar las mismas frecuencias, lo que no puede ocurrir con FDMA o TDMA. Lo cual hace CDMA muy eficiente en términos de uso del espectro pues todas las frecuencias asignadas a un operador se pueden utilizar por cada celda.

3.4 GSM

Antecedentes

A principios de la década de 1980 en Europa occidental habían instalados, o estaban en pruebas de instalación, ocho sistemas celulares analógicos de primera generación (véase Capítulo 2, Sección 2.2). Los países nórdicos de Suecia, Noruega, Dinamarca y Finlandia utilizaban el sistema más avanzado de la época, el NMT 450, la primera red celular internacional que ofrecía *roaming*. En la Gran Bretaña, Alemania occidental, Francia e Italia, los sistemas se habían desarrollado independientemente y eran incompatibles en equipos y operación entre sí. Esta situación, desde el punto de vista de mercado y del servicio, no era conveniente.

En la conferencia de correos y telégrafos europeos (CEPT) de 1982 se creó un grupo, *le Groupe Spéciale Mobile*, con el propósito de estudiar y desarrollar un sistema de telefonía móvil para Europa. Debía reunir los siguientes criterios:

- Buena calidad de voz
- Económico para el usuario
- Soporte de *roaming* internacional
- Dispositivos móviles manuales
- Nuevos servicios y facilidades
- Manejo eficiente del espectro
- Compatible con RDSI (ISDN)

La responsabilidad se transfirió a la ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) en 1989 que un año más tarde publicó las especificaciones para GSM. El servicio comercial se inició a mediados de 1991 y rápidamente se extendió por Europa. En 10 años, con sistemas derivados como DCS1800 (en la banda de 1800 MHz) y PCS1900 (Norteamérica, en la banda de 1900 MHz) GSM se había instalado en todos los continentes, con un crecimiento sin precedentes en la industria, convirtiéndose en el estándar *de facto* para sistemas de telefonía móvil de segunda generación. Las siglas ahora significan **Global System for Mobile communications**.

Servicios

Los principales servicios ofrecidos por GSM son:

- Llamadas de voz (voz digitalizada)
- Datos hasta 9600 bps, con conexión a la red telefónica fija (PSTN), a RDSI, o a redes públicas de datos (X.25, X.32)
- Fax
- Mensajes de texto con SMS (*Short Message Service*) que permite mensajes alfanuméricos hasta de 160 bytes, punto a punto o *broadcast*.
SMS es un servicio único de GSM, similar a los servicios de buscapersonas (*beeper* o *paging services*) pero mucho más completo, permitiendo mensajes en las dos direcciones, entrega diferida de mensajes (store-and-forward delivery) y confirmación de entrega de los mensajes.
- Varios servicios adicionales como, reenvío de llamadas, restricción de llamadas, identificación de quien llama, llamada en espera y conversaciones múltiples.
- Servicio de emergencia, con marcación abreviada

Arquitectura de la red

Una red GSM está compuesta por entes funcionales cuyos componentes e interfases se muestran en el diagrama de la *Fig. 3.4*.

Se identifican tres subsistemas:

- la estación móvil que usa el suscriptor (MS o *Mobile Station*),
- el subsistema de estación base que controla el enlace de radio con la estación móvil (BSS o *Base Station Subsystem*) y
- el subsistema de red (NSS o *Network Subsystem*), que contiene el MSC (*Mobile Switching Center*) o centro de conmutación de servicios móviles.
Este es el centro neurálgico del sistema, que realiza la conmutación de llamadas entre los usuarios móviles y entre estos y las otras redes externas. Además controla las operaciones relacionadas con la movilidad de los usuarios.

La estación móvil y el subsistema de estación base se comunican por la interfase *Um* o radio enlace. El subsistema de estación base se comunica con el MSC por la interfase *A*, como se indica en el diagrama.

Para realizar las funciones de registro, conmutación de llamadas, *handoff*, *roaming*, autenticación de usuarios y otros servicios, el MSC utiliza bases de datos que continuamente está actualizando en línea, como HLR, EIR, AuC y VLR, descritas más adelante (véase sección “Subsistema de Red”).

Los componentes indicados en el diagrama son los siguientes:

- SIM *Subscriber Identity Module* (Módulo de identificación del suscriptor)
- ME *Mobile Equipment* (Dispositivo móvil)
- BTS *Base Transceiver Station* (Transceptor de la estación base)
- BSC *Base Station Controller* (Controlador de estación base)
- MSC *Mobile services Switching Center* (Centro de conmutación de servicios móviles)
- GMSC *Gateway MSC*; controla acceso a la PSTN.
- HLR *Home Location Register* (Base de datos para registro de la ubicación de los móviles de la red)
- VLR *Visitor Location Register* (Base de datos para registro de la ubicación de los móviles visitantes de la red)
- EIR *Equipment Identity Register* (Base de datos para registro de la identidad de los móviles de la red)
- AuC *Authentication Center* (Base de datos para el centro de autenticación)

La “otras redes” son redes externas a las cuales tiene acceso el sistema, como parte del servicio que presta a sus suscriptores. Estas redes son, entre otras, la red pública de telefonía fija (PSTN o *Public Switched Telephone Network*), la red digital de servicios integrados o RDSI (ISDN) y otras redes de datos públicas, tipo X.25.

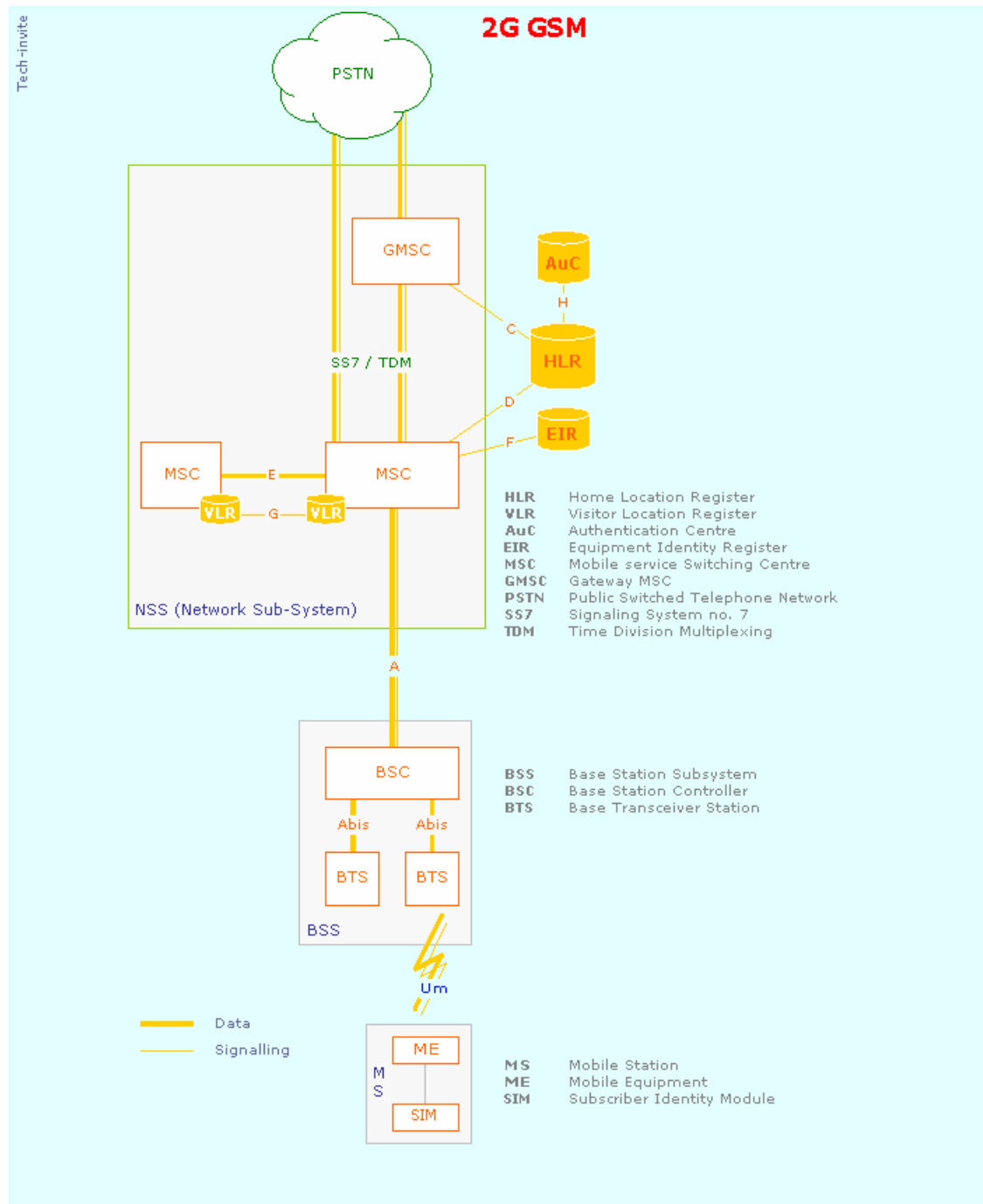


Fig. 3.4 Arquitectura de una red GSM genérica¹

¹ Fuente, Tech-Invite, SIP/IMS Technical Portal, <http://www.tech-invite.com/Ti-ims-releases.html#fig1>

La estación móvil

La estación móvil, MS, consta del dispositivo móvil (ME) y una tarjeta inteligente (SIM). La SIM permite la movilidad personal, de tal manera que el usuario puede acceder a servicios por suscripción independientemente de un aparato específico. Es decir, insertando su tarjeta SIM en otro teléfono celular el suscriptor puede recibir llamadas, hacer llamadas y en general acceder a sus servicios.

El dispositivo móvil se identifica con un código único, el IMEI, o *Internacional Mobile Equipment Identity*. La tarjeta SIM contiene el IMSI o *Internacional Mobile Subscriber Identity*, utilizado para identificar al suscriptor en el sistema; una clave secreta para autenticación y otra información. El IMEI y el IMSI son números independientes que permiten la movilidad del suscriptor. La SIM se puede proteger contra uso no autorizado con una contraseña o PIN (*Personal Identity Number*).

Subsistema de estación base

El BSS o subsistema de estación base consta de dos componentes básicos: el transceptor de la estación base (BTS) y el controlador de la estación base (BSC). Estos se comunican por la interfase estándar *Abis*, permitiendo así la operación entre componentes fabricados por diferentes proveedores.

La BTS contiene el transceptor de radio que define la celda y maneja los protocolos del enlace con la estación móvil (MS). En un área urbana pueden instalarse gran número de BTS, por lo cual se requiere que sean económicos, confiables, compactos y resistentes.

El BSC administra los canales de uno o más BTS. Controla la iniciación del canal (*channel setup*), saltos de frecuencia (*frequency hopping*) y *handovers*². El BSC conecta la estación base (BTS) con el centro de conmutación (MSC).

Subsistema de red

El componente central del NSS o subsistema de red es el centro de conmutación de servicios móviles o MSC. En términos generales funciona como una central de conmutación telefónica en una PTSN o RDSI, pero incluyendo toda la funcionalidad requerida para manejar un usuario móvil, tal como registro, autenticación, localización, *handover* y *roaming*. Estos servicios se proveen en cooperación con otros componentes del NSS. El MSC proporciona la conexión a las redes fijas (PTSN o ISDN). El NSS utiliza entre sus componentes el sistema de señalización SS7 (Signalling System 7), utilizado ampliamente en las redes telefónicas fijas y en RDSI.

Las bases de datos HLR (*Home Location Register*) y VLR (*Visitor Location Register*), con su correspondiente software y en cooperación con el MSC, permiten a la red enrutar llamadas y ofrecer *roaming*. La HLR contiene toda la información sobre cada suscriptor registrado en la red GSM, incluyendo la ubicación (la celda en que se encuentra) del móvil en cualquier momento. Existe una base de datos HLR lógica por red GSM, aunque

² Los europeos utilizan el término *handover*; en los Estados Unidos lo llaman *handoff*. Tienen el mismo significado.

en la implementación la base de datos puede ser distribuida. La VLR es una base de datos que contiene información sobre los suscriptores que, en un momento dado, están en su área de servicio.

Las otras dos bases de datos se utilizan para autenticación y seguridad de las operaciones. La EIR o *Equipment Identity Register* contiene la lista de todos los equipos móviles válidos en la red, donde cada estación móvil se identifica por su IMEI. Un IMEI se marca no válido si ha sido reportado robado o no es del tipo aprobado. El AuC es una base de datos encriptada que guarda una copia de la llave secreta almacenada en cada tarjeta SIM del suscriptor, que se utiliza para autenticación y encriptación en el canal de radio.

El radio enlace³

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU o *International Telecommunications Union*), que administra la asignación del espectro de radio a nivel internacional, designó inicialmente las bandas de 890 a 915 MHz para el enlace ascendente (ME a estaciones base) y 935 a 960 MHz para el enlace descendente (estaciones base a ME), para telefonía móvil en Europa. Para ampliar la cobertura del sistema a otros países y continentes, eventualmente se han designado otras bandas de frecuencias.

En la actualidad las redes GSM operan en cinco bandas de frecuencia diferentes, GSM-900, GSM-1800, GSM-850, GSM-1900 y GSM-400. El espectro utilizado por cada sistema es variable, pero todos los canales son de 200 kHz. La tabla de la Fig. 3.5 muestra los rangos de las bandas de frecuencia.

Sistema	Banda (MHz)	Espectro (MHz)	Enlace ascendente	Enlace descendente	Número de canales	Número del canal
GSM 400	450	7.2	450.4 – 457.6	460.4 - 467.6	35	259 – 293
GSM 400	480	7.2	478.8 – 486.0	488.8 – 496.0	35	306 – 340
GSM 850	850	25	824.0 – 849.0	869.0 – 894.0	124	128 – 251
GSM 900 (P-GSM)	900	25	890.0 – 915.0	935.0 – 960.0	124	1 – 124
GSM-900 (E-GSM)	900	35	880.0 – 915.0	925.0 – 960.0	174	0 – 124 975 – 1023
GSM-R (R-GSM)	900	4	876.0 – 880.0	921.0 – 925.0	19	955 – 973
DSC 1800	1800	75	1710.0 – 1785.0	1805.0 – 1880.0	374	512 – 885
PCS 1900	1900	60	1850.0 – 1910.0	1930.0 – 1990.0	299	512 - 810

Fig.3.5 – Bandas de frecuencia para GSM⁴

La mayoría de las redes en el mundo funcionan en las bandas de 900 MHz y 1800 MHz. GSM-900 (P-GSM) básica utiliza la banda de 890 a 915 MHz para enviar información entre el móvil y la estación base (enlace ascendente) y 935 – 960 MHz para el enlace

³ Esta sección utiliza material de [Wikipedia article "GSM frequency ranges"](https://en.wikipedia.org/wiki/GSM_frequency_ranges)

⁴ Adaptada de <http://www.answers.com/topic/gsm-frequency-ranges>

descendente, comprendiendo 124 canales de RF (radio frecuencia) con número 1 a 124, espaciados en 200 kHz. El espacio entre las dos bandas (*duplex spacing*) es de 45 MHz.

En algunos países la banda de GSM-900 se ha extendido para cubrir un rango de frecuencias mayor. Esto se denomina GSM extendido, o E-GSM, y utiliza una banda de 880 a 915 MHz para el enlace ascendente y 925 a 960 MHz para el enlace descendente, resultando en 174 canales (50 más que P-GSM, numerados del 975 al 1023). Las especificaciones de GSM también describen una versión desarrollada específicamente para comunicaciones y aplicaciones ferroviarias llamada GSM-R (*GSM-Railway*). Utiliza los rangos de frecuencia de 876 a 915 MHz para el enlace ascendente y 921 a 960 para el enlace descendente. Los canales están numerados del 955 al 973; esta versión provee canales adicionales y servicios especializados requeridos por las comunicaciones ferroviarias.

GSM-1800 (DSC 1800) utiliza 75 MHz en la banda 1710 a 1785 MHz para el enlace ascendente y de 1805 a 1880 para el enlace descendente, que corresponde a 374 canales, numerados del 512 al 885. Con espacio entre las dos bandas de 95 MHz.

Algunos países en América, incluyendo los Estados Unidos y Canadá, utilizan las bandas de 850 ⁵ MHz y 1900 MHz porque las anteriores ya estaban asignadas. GSM-850 utiliza 25 MHz en la banda de 824 a 849 MHz para el enlace ascendente y lo mismo en la banda de 869 a 894 MHz para el enlace descendente, con 124 canales numerados del 128 al 251. GSM-1900 (PCS-1900) utiliza la banda de 1850 a 1910 MHz para el enlace ascendente, del móvil a la estación base; para el enlace descendente se utiliza la banda de 1930 a 1990 MHz, con 299 canales, numerados del 512 a 810.

PCS o *Personal Communications Service* es el nombre para la banda de 1900 MHz en Norteamérica. Así como “celular” es el término utilizado para referirse a la banda de 850 MHz, pues el primer sistema de telefonía móvil analógico utilizaba ésta banda.

Unos pocos países, particularmente los escandinavos, utilizan las bandas de 400 y 450 MHz. Utiliza las mismas frecuencias y puede coexistir con NMT 450, el sistema analógico anterior a GSM. Opera con una de dos parejas de bandas: las bandas de 450.4 a 457.6 MHz y 460.4 a 467.6 MHz, con 35 canales numerados del 259 al 293, o las bandas 478.8 a 486 MHz y 488.8 a 496 MHz, también con 35 canales, del 306 al 340.

Uso de frecuencias de GSM en América

En Norteamérica, GSM opera en las bandas de 850 y 1900 MHz. Por lo general 1900 MHz se usa en las áreas urbanas y 850 MHz en las áreas rurales. Las dos bandas también se usan en muchos países de Centroamérica y Suramérica (Argentina, Chile, Honduras); otros usan solo la banda de 1900 MHz (Belice, Bolivia, Colombia, República Dominicana, Méjico, Paraguay, Perú), la banda de 850 MHz (Panamá, Ecuador), o la banda de 900 MHz (Venezuela y Brazil, que también opera en la banda de 1800 MHz). Costa Rica opera en la banda de 1800 MHz.

⁵ GSM 850 ocasionalmente se denomina GSM 800 pero ésta última no está incluida en las especificaciones.

Debido a esta diversidad de frecuencias utilizadas, el viajero debe confirmar que el teléfono que tiene sea compatible con la frecuencia de la red donde va a estar. Los problemas de compatibilidad de frecuencias se pueden obviar usando teléfonos multi-banda, tri-banda o quad-banda.

Los teléfonos multi-banda soportan múltiples frecuencias utilizadas en las diversas redes GSM. Los móviles de banda dual (*dual-band*) sirven en redes GSM que ofrecen dos bandas de frecuencias, como 900 y 1800 MHz (por ejemplo en Europa, Asia, Australia y Brazil), o 850 y 1900 MHz (como en Norteamérica). Los teléfonos europeos de tres bandas (*tri-band*) usualmente cubren las frecuencias de 900, 1800 y 1900 MHz utilizadas en Europa y parte de Norteamérica. Los móviles de tres bandas norteamericanos utilizan 850, 1800 y 1900 para lograr una cobertura amplia en Norteamérica, pero uso limitado a nivel mundial. Están disponibles teléfonos de cuatro bandas (*quad-band*) que funcionan con los cuatro grupos de frecuencias principales permitiendo acceso mundial, incluyendo Norteamérica.

También existen teléfonos multi-modo que pueden operar con sistemas GSM y otros sistemas de telefonía móvil que utilizan algún estándar diferente. Por lo general estos dispositivos también aceptan múltiples rangos de frecuencias.

Acceso multiple y estructura del canal

GSM es un sistema digital que funciona sobre un medio inalámbrico y para lograr un manejo eficiente del espectro utiliza una combinación de dos métodos de acceso, TDMA y FDMA.

Se utiliza FDMA para dividir el espectro. Por ejemplo en GSM-90, el ancho de banda de 25 MHz se divide en 124 canales separados por 200 kHz. A cada estación base se le asignan dos o más canales que contienen un par de frecuencias para los enlaces ascendente y descendente. Cada una de estas frecuencias portadoras se divide en el tiempo, usando TDMA. La unidad fundamental de tiempo en este esquema de TDMA es una “ráfaga” (*burst period*)⁶ y tiene una duración de 15/26 ms, o 0.577 ms aproximadamente. Ocho ráfagas se agrupan en una trama TDMA (*TDMA frame*) cuya duración es de 120/26 ms, o 4.615 ms aproximadamente. Esta forma la unidad básica para la definición de los canales lógicos. Un canal físico es una ráfaga por trama TDMA.

Los canales se definen por el número y la correspondiente posición de las ráfagas dentro de la trama. Todas estas definiciones son cíclicas y el patrón completo se repite cada tres horas, aproximadamente. Los canales se pueden dividir en canales dedicados, que se asignan a una estación móvil y canales comunes, que se utilizan en las estaciones móviles cuando están en reposo.

En resumen, con GSM 900 básico están disponibles 124 canales de tráfico con 8 *slots* por canal para un total de (124×8) 992 conversaciones simultáneas.

⁶ La “ráfaga” es equivalente a la ranura o bloque de tiempo o *time slot*.

Canales de tráfico

Un canal de tráfico o TCH (*Traffic CHannel*) se utiliza para transportar voz y datos. Los canales de tráfico se definen usando una trama compuesta (o multitrama) o grupo de 26 tramas TDMA. La duración de una multitrama es 120 ms, en la cual está basada la duración de una ráfaga: 120 ms dividido por 26 tramas y dividido por 8 ráfagas por trama.

De las 26 tramas, 24 se utilizan para tráfico y 2 para canales de control, uno de los cuales se denomina SACCH o *Show Associated Control Channel*. Los canales de tráfico para los enlaces ascendente y descendente se separan en el tiempo por 3 ráfagas, de tal manera que la estación móvil no tiene que transmitir y recibir simultáneamente.

Los canales de tráfico descritos son de velocidad plena (*full-rate*); también los hay de velocidad media (*half-rate*), que efectivamente doblan la capacidad del sistema. También se han especificado canales de un octavo de velocidad que se utilizan para señalización. En la recomendación se denominan SDCCH o *Stand-alone Dedicated Control Channels*.

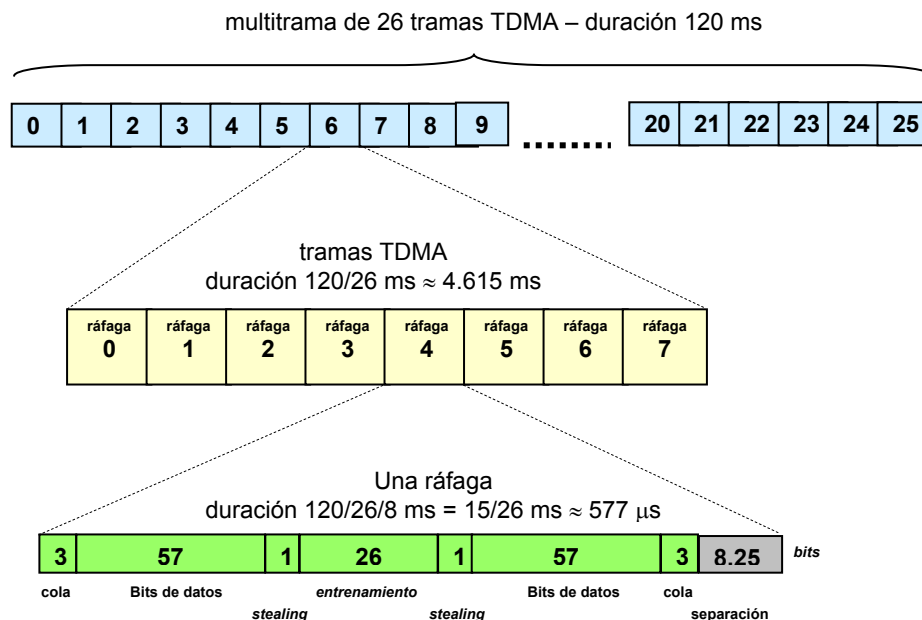


Fig. 3.6 Organización de ráfagas, tramas TDMA y multitramas

Canales de control

Los canales comunes se pueden acceder por las estaciones móviles que están en reposo (*idle mode*) o activadas (*dedicated mode*). Los móviles en reposo los utilizan para intercambiar la información de señalización requerida para activarse. Los móviles que ya están activados monitorean las estaciones base dentro de su alcance para cambiar de celda (*handover*) u otra información.

Los canales comunes se definen con una multitrama de 51 tramas, de tal manera que los móviles activos que utilizan una multitrama con estructura TCH de 26 tramas pueden monitorear los canales de control.

Hay cinco tipos de canales comunes:

- **BCCH o *Broadcast Control Channel***
Continuamente transmite, por el enlace descendente y a todos los móviles, información sobre la identidad de las estaciones base, asignación de frecuencias y secuencias de saltos de frecuencia (*frequency hopping*)
- **FCCH o *Frequency Correction Channel* y SCH o *Synchronisation Channel***
Utilizado para sincronizar el móvil con la estación base.
- **RACH o *Random Access Channel***
Una canal tipo “Aloha ranurado”, utilizado por el móvil para solicitar acceso a la red.
- **PCH o *Paging Channel***
Utilizado para avisar a la estación móvil que está entrando una llamada.
- **AGCH o *Access Grant Channel***
Utilizado para asignar un SDCCCH a un móvil para señalización (para obtener un canal dedicado), después de una solicitud de un RACH.

Estructura de una ráfaga

Existen cuatro tipos de ráfagas empleadas para la transmisión en GSM. La *Fig. 3.6* muestra la estructura de la ráfaga normal que se utiliza para transportar datos y señalización. Su longitud total es de 156.25 bits y consta de dos 2×57 bits de información del usuario, 26 bits de “entrenamiento” utilizados para ecualización; 1 bit con cada bloque de información, 3 bits de cola en cada extremo y 8.25 bits de protección. Los 156.25 bits se transmiten en 0.577 ms, correspondiendo a una tasa de transferencia de bits de 270833 bps.

Las otras ráfagas son, la F que se utiliza con el FCCH y la S con el SCH; estas tienen la misma longitud de una ráfaga normal pero la estructura interna es diferente. Finalmente, la ráfaga de acceso es más corta que la normal y se utiliza solamente con el RACH.

Codificación de la voz

En GSM es necesario digitalizar la voz. El método utilizada por los sistemas telefónicos fijos y RDSI es PCM⁷ pero éste produce 64 kbps por un canal de voz que es una tasa muy alta que no es adecuada para un enlace de radio; es fácil de implementar pero la señal contiene mucha redundancia. GSM utiliza un algoritmo de codificación para la voz denominado RPE-LPC o *Regular Pulse Excited—Linear Predictive Coder*.

RPE-LC Es un método que con base en información de muestras anteriores, que no cambian abruptamente, predice la muestra actual. Los coeficientes de la combinación lineal de las muestras anteriores, más una forma codificada del residuo o diferencia entre la muestra estimada y la actual, representan la señal. La voz se divide en muestras de 20 ms, cada una de las cuales se codifica en 260 bits, resultando en una tasa de bits de 13 kbps. Esta es la tasa utilizada por el codec de voz, originalmente, que produce voz de

⁷ Véase el Capítulo I – *Fundamentos de la tecnología inalámbrica*.

buena calidad. Avances en microelectrónica permiten la fabricación de móviles con un codec de la mitad de la tasa de transferencia o *half-rate voice codec*. Estos reducen a la mitad el ancho de banda requerido por llamada y por consiguiente doblan la capacidad, con un pequeño decremento de la calidad. Los datos no pueden beneficiarse de codecs de media tasa, lo cual explica porqué algunos operadores cobran más por la transferencia de datos que por llamadas de voz.

También existe un codec de tasa plena mejorada o *enhanced full-rate codec*, que utiliza la misma tasa de bits de 13 kbps, pero con mejor calidad. La mayoría de los operadores y los dispositivos móviles soportan los tres tipos de codecs, aunque debido a la menor calidad del codec de tasa media, esta no se promueve.

Los primeros esquemas para enviar datos por GSM los enrutaban por el codec de tasa plena, a una tasa de transferencia de datos de solo 9.6 kbps. Una mejora, no disponible con todos los aparatos o las redes, no utiliza los codecs y logra 14.4 kbps. Esta tasa es mayor que la salida de los codecs de voz porque no requiere la misma corrección de errores que para la voz comprimida. La tabla de la figura siguiente indica cifras de los codecs para voz y datos.

	Voz			Datos		
	<i>Full-rate</i>	<i>Half-rate</i>	<i>Enhanced</i>	<i>Regular</i>	<i>Enhanced</i>	<i>Max.</i>
Codec	13 kbps	6.5 kbps	13 kbps	9.6 kbps	14.4 kbps	21.4 kbps

Fig. 3.7 Capacidad de codecs en GSM

Codificación del canal y modulación

Debido a interferencia electromagnética por diversas fuentes, la voz codificada o señal de datos transmitida por el enlace de radio debe ser protegida de errores. GSM utiliza *convolutional encoding* y bloques intercalados (*block interleaving*) para lograr esa protección.

Por otro lado, cada vez que se transmite una ráfaga a 270833 bps, esta señal digital debe ser modulada sobre la portadora analógica usando GMSK o *Gaussian-filtered Minimum Shift Keying*. Se seleccionó ésta técnica de modulación especial porque es más eficiente en el uso del espectro, no es muy complicada de implementar y produce emisiones espurias limitadas (*spurious emissions*). La complejidad del transmisor está relacionada con el consumo de energía, que debe ser minimizado para la estación móvil. Las emisiones de radio espurias, es decir aquellas fuera de la banda asignada, deben ser controladas estrictamente para reducir interferencia entre canales adyacentes y permitir la coexistencia de GSM con sistemas analógicos anteriores.

Ecualización por trayectorias múltiples

En la banda de 900 MHz, las ondas de radio se reflejan (rebotan) de cualquier objeto: construcciones, montañas, vehículos, etc. Por lo tanto muchas señales reflejadas, cada una con diferente fase, pueden ser captadas por la antena. Para extraer la señal original de

varias señales reflejadas se utiliza la ecualización. La secuencia de 26 bits de “entrenamiento” en la estructura de la ráfaga se relaciona con el proceso de ecualización.

Salto de frecuencia

La estación móvil es muy ágil cambiando de frecuencias pues se puede desplazar entre una ranura de tiempo para transmisión, recepción o monitoreo dentro de una trama TDMA, que generalmente está en diferentes frecuencias. GSM también tiene implementado saltos de frecuencia lentos, en los cuales el móvil y el BTS cada uno transmiten tramas TDMA en diferentes frecuencias portadoras. El algoritmo para saltos de frecuencia se transmite a todas las estaciones por el BCCH (*Broadcast Control Channel*)

Transmisión discontinua

Uno de los objetivos de cualquier sistema celular es minimizar la interferencia entre canales pues permite ofrecer mejor servicio para un determinado tamaño de celda, o utilizar celdas más pequeñas, incrementando la capacidad global del sistema. El método de transmisión discontinua o DTX permite aprovechar el hecho de que una persona habla menos del 40 por ciento del tiempo en una conversación normal, apagando el transmisor durante los períodos de silencio. Un beneficio adicional de DTX es que conserva energía en la unidad móvil.

El componente más importante de DTX es la detección de actividad de voz (*Voice Activity Detection*) que debe distinguir entre voz y ruido de fondo, una tarea compleja. Si la señal de voz se malinterpreta como ruido, el transmisor se apaga y resulta en un efecto molesto (*clipping*) en el lado del receptor. De otro lado, si el ruido se interpreta como una señal de voz con cierta frecuencia, se reduce significativamente la eficiencia de DTX.

Otra consideración es cuando el transmisor interrumpe las transmisiones, hay silencio total en el lado del receptor debido a la naturaleza digital de GSM. Para asegurar al receptor que no se ha perdido la conexión, se crea un ruido de confort en el receptor para simular el ruido de fondo del transmisor.

Recepción discontinua

Otro método para conservar energía en la estación móvil es recepción discontinua. El canal PCH (*paging channel*) utilizado por la estación base para indicar que va a entrar una llamada, está estructurado en subcanales. Cada estación móvil solo necesita escuchar su propio subcanal. En el tiempo entre intervenciones del canal PCH, el móvil puede estar en modo inactivo (*sleep mode*) en el cual prácticamente no consume energía.

Control de potencia

Existen cinco clases de estaciones móviles, definidas de acuerdo a su máxima potencia de transmisión, especificadas en 20, 8, 5, 2 y 0.8 vatios. Para minimizar interferencia entre canales y conservar energía, los móviles y las BTS (*Base Transceiver Stations*) operan en el nivel más bajo de potencia que mantenga la calidad de la señal aceptable. Los niveles

de potencia se pueden reducir o incrementar en saltos de 2 dB de la potencia máxima para la clase, reduciendo hasta un mínimo de 13 dBm (20 milivatios).

La estación móvil mide la potencia o calidad de la señal (por el BER o *Bit Error Rate*) y pasa la información al BSC (*Base Station Controller*) que en últimas decide como y cuando ajustar el nivel de potencia.

Handover (handoff)

En una red celular, los enlaces de radio y fijos requeridos no están asignados en forma permanente por la duración de una llamada. El *handover* es la conmutación de una llamada activa a un canal o a una celda diferente.

Existen cuatro tipos diferentes de *handover* en GSM, que implican transferir una llamada entre:

- Canales (ranuras de tiempo) en la misma celda,
- Celdas (BTS) bajo control del mismo controlador de estación base (BSC),
- Celdas bajo el control de diferentes BSC, pero conectados al mismo MSC (*Mobile services Switching Center*), y
- Celdas bajo control de diferentes MSC.

Los primeros dos tipos son *handovers* internos e involucran un solo controlador de estaciones base (BSC). Para economizar transmisiones estos se manejan sólo con el BSC sin intervención del MSC, excepto para notificarlo una vez terminada la operación. Los otros dos tipos son *handovers* externos y los manejan los MSC involucrados. Un aspecto importante de GSM es que el MSC original es responsable por la mayoría de las funciones relacionadas con llamadas, con la excepción de subsiguientes *handovers* entre BSC, bajo control del nuevo MSC.

Los *handovers* se pueden iniciar por el móvil o el MSC. Durante las ranuras de tiempo de reposo, el móvil examina el canal de control de difusión (BCCH) de hasta 16 celdas vecinas y elabora una lista de las 6 más apropiadas para un posible cambio (*handover*), con base en la potencia de la señal recibida. Esta información se transmite al BSC y MSC, por lo menos uno por segundo y se utiliza en el algoritmo de *handover*.

Gestión de la movilidad

La gestión de la movilidad incluye la gestión de la localización y la autenticación y seguridad.

Registro y actualización de ubicación

La gestión de la localización comprende los procedimientos que le permiten al sistema conocer la ubicación, en tiempo real, de una estación móvil activa de tal manera que se le puedan transferir llamadas.

El móvil activado se informa de una llamada entrante por un mensaje que recibe por el canal de control PAGCH de la celda. Una manera de hacerlo sería avisar a todas las celdas de la red por cada llamada, pero esto obviamente sería un desperdicio de recursos

de radio frecuencias y congestionaría el sistema innecesariamente. El otro extremo sería que el móvil notifique al sistema continuamente, con mensajes de actualización, sobre su localización actual. Estos avisos se enviarían sólo a una celda pero también representan un gran desperdicio por el gran número de mensajes de actualización que se deben enviar. Una solución intermedia utilizada por GSM es agrupar las celdas en áreas de localización. Se requiere enviar mensajes de actualización cuando el móvil se desplaza entre áreas de localización y las estaciones móviles se alertan en las celdas de su área de localización actual.

Los procedimientos para actualización de la ubicación y enrutamiento de las llamadas utilizan el MSC y dos registro de localización (bases de datos): el HLR (*Home Location Register*) y el VLR (*Visitor Location Register*). Cuando la estación móvil se activa (*on*) en una nueva área de localización o se desplaza a otra área de localización, o a una celda de otro operador, se debe registrar con la red para indicar su localización actual. Normalmente se envía un mensaje de actualización al nuevo MSC y VLR que registra la información y la envía al HLR del suscriptor. La información remitida al HLR es usualmente la dirección SS7 del nuevo VLR, o un código de enrutamiento. GSM también utiliza un procedimiento de actualización de localización periódica para lograr mayor confiabilidad.

Relacionada con la actualización de la localización es el procedimiento de ligar y desligar (*attach y detach*) el IMSI (*Internacional Mobil Subscriber Identity*). Desligar informa a la red que la estación móvil no está disponible (por ejemplo, fuera del alcance) y evita tener que asignar canales y enviar mensajes de aviso innecesariamente. Ligar es similar a una actualización de localización e informa al sistema que el móvil está nuevamente disponible. La activación de ligar/desligar el IMSI es decisión del operador a nivel de celda individual.

Autenticación y seguridad

Un elemento muy importante en una red de telefonía móvil es la autenticación del suscriptor para garantizar que realmente es quien dice ser. La autenticación involucra dos entidades funcionales, la tarjeta SIM de la estación móvil y el centro de autenticación (AuC). A cada suscriptor se le asigna una llave privada, de la cual una copia se almacena en la SIM y la otra en el AuC. Durante la autenticación, el AuC genera un número aleatorio que envía al móvil. Tanto el móvil como el AuC utilizan este número aleatorio, en combinación con la llave secreta y un algoritmo de encriptación denominado A3 para generar una respuesta firmada (autenticada) que se retorna al AuC. Si el código retornado por el móvil es igual al calculado por el AuC, el suscriptor queda autenticado.

Opcionalmente, también se puede encriptar la información transmitida. Utilizando el mismo número aleatorio inicial y la llave privada del suscriptor se calcula una llave de encriptación con un algoritmo denominado A8. Esta llave de encriptación, en combinación con el número de la trama TDMA y usando el algoritmo A5 crean una secuencia de 114 bits que se aplica a los 114 bits de una ráfaga (los dos bloques de datos de 57 bits) con una operación XOR. La encriptación de los datos es innecesaria, excepto en casos que

requieran la máxima seguridad, porque la señal ya está codificada, entrelazada y transmitida en ráfagas TDMA que la protegen de curiosos.

Existe otro nivel de seguridad sobre la propia estación móvil. Cada terminal GSM está identificado con número único, el IMEI (*Internacional Mobile Equipment Identity*). La lista de los IMEI de la red se guarda en la base de datos EIR o *Equipment Identity Register*. En respuesta a una consulta, el IER retorna el estado del dispositivo, indicando si está en:

- Lista blanca: se permite al dispositivo conectarse a la red.
- Lista gris: el dispositivo está bajo observación de la red por posibles problemas.
- Lista negra: el dispositivo ha sido reportado robado, o no es del tipo aprobado para conectarse a una red GSM. No se permite la conexión a la red.

Enrutamiento de llamadas

El usuario de GSM puede deambular por la red local de la ciudad, o nacional e inclusive por área más extensa, internacionalmente. El número de directorio marcado para acceder a un subscritor se denomina el MSISDN, o *Mobile Subscriber ISDN*. Este número incluye el código del país y un código de destino nacional (*National Destination Code*) que identifica al operador del subscritor. Los otros dígitos del número del subscritor identifican el HLR del abonado.

Impacto social y económico

GSM es solamente una de la piezas en el complejo de redes de telecomunicaciones, actuales y futuras, pero su habilidad para proveer comunicación prácticamente a cualquier sitio y sin restricciones de tiempo ha tenido consecuencias significativas en los ámbitos social y económico.

Las telecomunicaciones móviles son una de las más importantes industrias en el mundo, en parte gracias al impulso que le han dado estándares como GSM, con más de 2 mil millones de suscriptores en 212 países en todos los continentes.

GSM ha tenido un efecto catalizador en la industria, promoviendo investigación y desarrollo significativo en el área de comunicaciones inalámbricas y ampliando las fronteras del conocimiento. Los retos tecnológicos que debieron ser superados para introducir una segunda generación de telefonía móvil con tecnología digital como GSM, han generado cambios económicos importantes en la cadena de valor de la industria que comprende operadores móviles, fabricantes de equipos, proveedores de componentes, proveedores minoristas y un importante segmento del mercado de software. La generación de empleo y oportunidades de negocios por nuevas industrias y ampliación de otras tradicionales ha tenido un impacto positivo muy importante en la industria.

El acceso a una terminal móvil de bolsillo ha tenido un impacto profundo en la sociedad. Por primera vez desde el inicio de las telecomunicaciones modernas (es decir, desde el telégrafo) la tecnología es personalizada, dirigida directamente al individuo y efectiva.

No está orientada a un sitio o localización (oficina de telégrafo, teléfono residencial o de oficina); es personal y tiene el potencial para integrar otras tecnologías de punta como Internet, GPS, etc., evolucionando eventualmente en una verdadera red para comunicaciones personales o PCN (*Personal Communications Network*).

Factores críticos de éxito

Algunos de los factores críticos requeridos para el éxito continuado de GSM se anotan a continuación:

- Convergencia con otras tecnologías inalámbricas
- Desarrollo de aplicaciones centradas en la movilidad
- Evolución del modelo de negocios móvil (*m-commerce*)
- Innovaciones y variedad en los terminales móviles
- Interoperabilidad y extensión de la compatibilidad entre las diversas generaciones y plataformas para extender los servicios de *roaming*.

Conclusiones

El sistema GSM y sus diversas versiones (como DCS1800 y PCS1900) son una primera aproximación a un verdadero sistema de comunicación personal o PCS (*Personal Communication System*). La tarjeta SIM implementa la movilidad personal y del dispositivo. En combinación con la capacidad de hacer *roaming* internacional y acceder a una amplia variedad de servicios como telefonía, transferencia de datos, fax, SMS (*Short Message Service*) y otros servicios suplementarios, GSM es la base para la siguiente generación de comunicación móvil en Europa, el “sistema de comunicación móvil universal” o UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), que estudiaremos en el siguiente capítulo.

Un aspecto que se debe resaltar es el enfoque y compromiso de GSM a los estándares abiertos, la interoperabilidad y la compatibilidad con sistemas de comunicación integrales como ISDN (*Integrated Services Digital Network*). GSM es el primer sistema que utiliza el concepto de interconexión inteligente de redes (*Intelligent Networking*), en el cual servicios como los números 800 se concentran y manejan desde unos pocos centros de servicios centralizados, en vez de estar distribuidos por todas las centrales de conmutación del país. Este es el concepto detrás de varios de los registros que utiliza GSM, como HLR y VLR, incorporando el sistema de señalización SS7 (*Signalling System Number 7*), que es un estándar internacional definido como el sistema básico de señalización para ISDN.

GSM es un estándar complejo, pero con un alto nivel de integración de servicios de calidad, estando sujetos a las limitaciones impuestas por el ambiente inalámbrico. Actualmente juega un papel crucial en facilitar la transición a los servicios de telecomunicaciones móviles de tercera generación (3G).

3.5 HSCSD

High Speed Circuit Switched Data o HSCSD tiene el objetivo de prestar mejores prestaciones a los servicios móviles de datos y se considera la primera de las tecnologías

2.5G. Ha sido estandarizado por ETSI en 1997 y primero ofrecido comercialmente en el año 2000.

HSCSD es una mejora sobre GSM, supuestamente sencilla de implementar, que le entrega a cada usuario más de una ranura de tiempo (ráfaga) en la multiplexión. Es el equivalente a juntar dos o más líneas telefónicas y agregar su capacidad.

Todas las redes y terminales HSCSD utilizan el codec de datos mejorado (véase Fig. 3.5), de 14.4 kbps por cada canal. El estándar permite agregar hasta cuatro de estos canales, por un total de 57.6 kbps. También se pueden agregar solo dos o tres, e incluso en forma asimétrica; por ejemplo agregar tres canales de la estación base al móvil y dos de la estación móvil a la estación base.

En teoría se podrían agregar los ocho canales en una ráfaga de la trama TDMA, pero se presentan complicaciones en el diseño de los equipos móviles. Agregando sólo cuatro canales el móvil no tiene que transmitir y recibir al mismo tiempo; cada ráfaga en el canal ascendente de GSM se acopla con una “opuesta” en el correspondiente enlace descendente, como lo indica la figura siguiente.

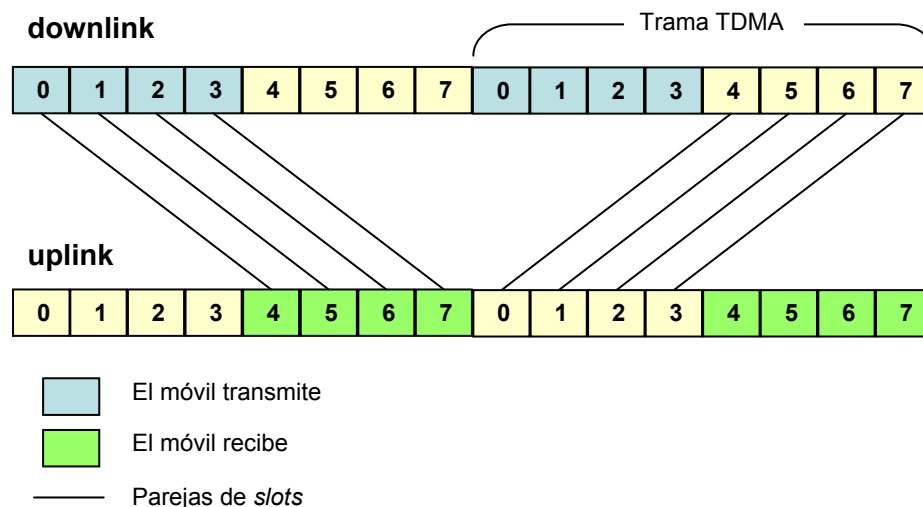


Fig. 3.8 HSCSD con cuatro slots

Otros problemas relacionados con la utilización de canales adicionales son el consumo de energía y la capacidad.

Muchas redes GSM ya están al límite de su capacidad, instalando más estaciones base para mantenerse a la par con el crecimiento de sus abonados. HSCSD de tasa plena significa que cada suscriptor requiere cuatro veces más ancho de banda que para una llamada normal y ocho veces más que para una llamada usando un codec de tasa media. La mayoría de los usuarios no están dispuestos a pagar cuatro u ocho veces el costo de una llamada normal, especialmente si tienen la percepción que la transmisión de datos debería ser sin costo o a muy bajo costo, como es en Internet. Por esta razón muchos

operadores de GSM han decidido no implementar HSCSD, esperando la introducción de otros sistemas que utilicen el ancho de banda en forma más eficiente.

El diseño de los dispositivos móviles para HSCSD también ha presentado dificultades. Cuatro ráfagas deben transmitir cuatro veces más tiempo que un teléfono GSM común, con el correspondiente consumo de energía, menor duración de las baterías y mayor emisión electromagnética. Los primeros terminales sufrían de recalentamiento hasta el punto de quemarse.

Debido a este problema, la mayoría de los dispositivos HSCSD son asimétricos, permitiendo que el canal descendente tenga mayor capacidad que el canal ascendente. Esto es común en aplicaciones con la Web, en las cuales en una dirección viajan páginas completas con texto, gráficas o imágenes y en la otra unos pocos impulsos del ratón (*mouse clicks*). Sin embargo, esto desperdicia capacidad pues el sistema utiliza parejas de enlaces (*paired spectrum*) y no hay manera de utilizar el ancho de banda correspondiente a los *slots* de tiempo (ráfagas) no utilizados y algunos viajan sin información.

3.6 GPRS

De todos los esquemas inalámbricos para usar Internet, *General Packet Radio Service* o GRPS es el más popular con los operadores de telefonía móvil. Está diseñado para datos y ofrece al usuario una conexión a Internet permanente y de alta capacidad. GPRS está diseñado para ser integrado a la red GSM, para proveer el acceso a Internet. El diagrama de la Fig. 3.9 muestra la arquitectura de una red GSM con GPRS incluido (comparar este diagrama con el de la Fig. 3.4).

Inicialmente se concibió que GPRS podría actualizar cualquier sistema TDMA, pero en la práctica sólo está integrado con GSM. La primera generación de terminales soportan tasas de transferencia inferiores a las más primitivas de tecnología HSCSD, lejos de los 115.2 kbps anunciados. Sin embargo, GPRS representa un paso importante en redes de telefonía móvil. El principal avance es la utilización de conmutación de paquetes, que es bastante más eficiente para la mayoría de aplicaciones de datos que conmutación de circuitos. Con GSM o HSCSD, cada usuario debe mantener abierto un circuito completo de 9.6 kbps o más por la duración de su transmisión en línea, aunque en las consultas por la Web el usuario utiliza más tiempo leyendo páginas que transfiriendo información. Esto es un desperdicio de recursos, tanto para el operador como para el suscriptor.

La conmutación de paquetes sólo utiliza ancho de banda cuando lo necesita, permitiendo que otros usuarios utilicen y compartan los recursos de la red. Con GPRS un solo *slot* de tiempo de 14.4 kbps se puede compartir con cientos de usuarios, siempre y cuando no lo utilicen concurrentemente. Cada uno tiene una conexión continua por un tiempo muy pequeño a una tasa de transferencia de 0.1 kbps o menor, con ráfagas a mayor velocidad cuando reciben o envían datos.

Debido a esta mayor eficiencia, la especificación requiere que los dispositivos puedan utilizar los ocho *slots* de tiempo a la vez. En efecto, esto elimina la estructura rígida de TDMA, permitiendo que cada usuario disponga hasta de 115.2 kbps (14.4×8). Sin

embargo, tales velocidades de transmisión han sido difíciles de lograr por los mismos problemas de recalentamiento y consumo de energía que afectan a HSCSD.

Como en HSCSD, la mayoría de los sistemas GPRS son asimétricos, en parte por aspectos relacionados con el diseño de los dispositivos móviles, pero también por la forma como se implementa la conmutación de paquetes. Una estación base puede monitorear todo el tráfico descendente y organizarlo en la manera más eficiente posible, pero el móvil no puede hacer lo mismo para el tráfico ascendente porque no tiene acceso a las otras transmisiones. El resultado es que existe más capacidad disponible para el enlace descendente que para el ascendente.

El plan es que las redes GPRS se transporte voz sobre los paquetes (voz sobre IP), usando codecs de tasa variable, de tal manera que se puedan transmitir datos entre las pausas de una conversación. Mientras tanto, GPRS debe coexistir con GSM y posiblemente HSCSD, lo cual significa que los móviles deben soportar conmutación de circuitos y de paquetes.

Se han definido tres grados distintos de GPRS, que corresponden a como los terminales soportan las dos técnicas de conmutación:

- Grado C: terminales con la capacidad de operar con conmutación de circuitos o conmutación de paquetes, pero no en forma simultánea. Cuando se hace una llamada de voz se debe deshabilitar la conexión permanente de datos.
- Grado B: terminales que pueden mantener la conexión de conmutación de circuitos mientras una llamada que utiliza conmutación de circuitos está activa, pero no se pueden transmitir datos. Por ejemplo, un suscriptor puede ser notificado de que está recibiendo un correo electrónico mientras está conversando por el móvil, pero debe cancelar la llamada para recibir el correo.
- Grado A: terminales que pueden mantener la conexión de conmutación de circuitos y de paquetes al mismo tiempo. El usuario puede conversar por el teléfono y navegar por la Web al mismo tiempo.

Para complicar más las cosas, los dispositivos móviles GPRS se dividen en 29 clases, dependiendo de la combinación específica de *slots* y la correspondiente capacidad de transferencia de datos que pueda manejar. No todas las clases tienen capacidad de *full-duplex* en el uso del enlace ascendente y descendente. De todas las clases, solamente los terminales de clase 18 pueden transmitir *full-duplex* a 115.2 kbps, que es lo que generalmente se anuncia para el sistema.

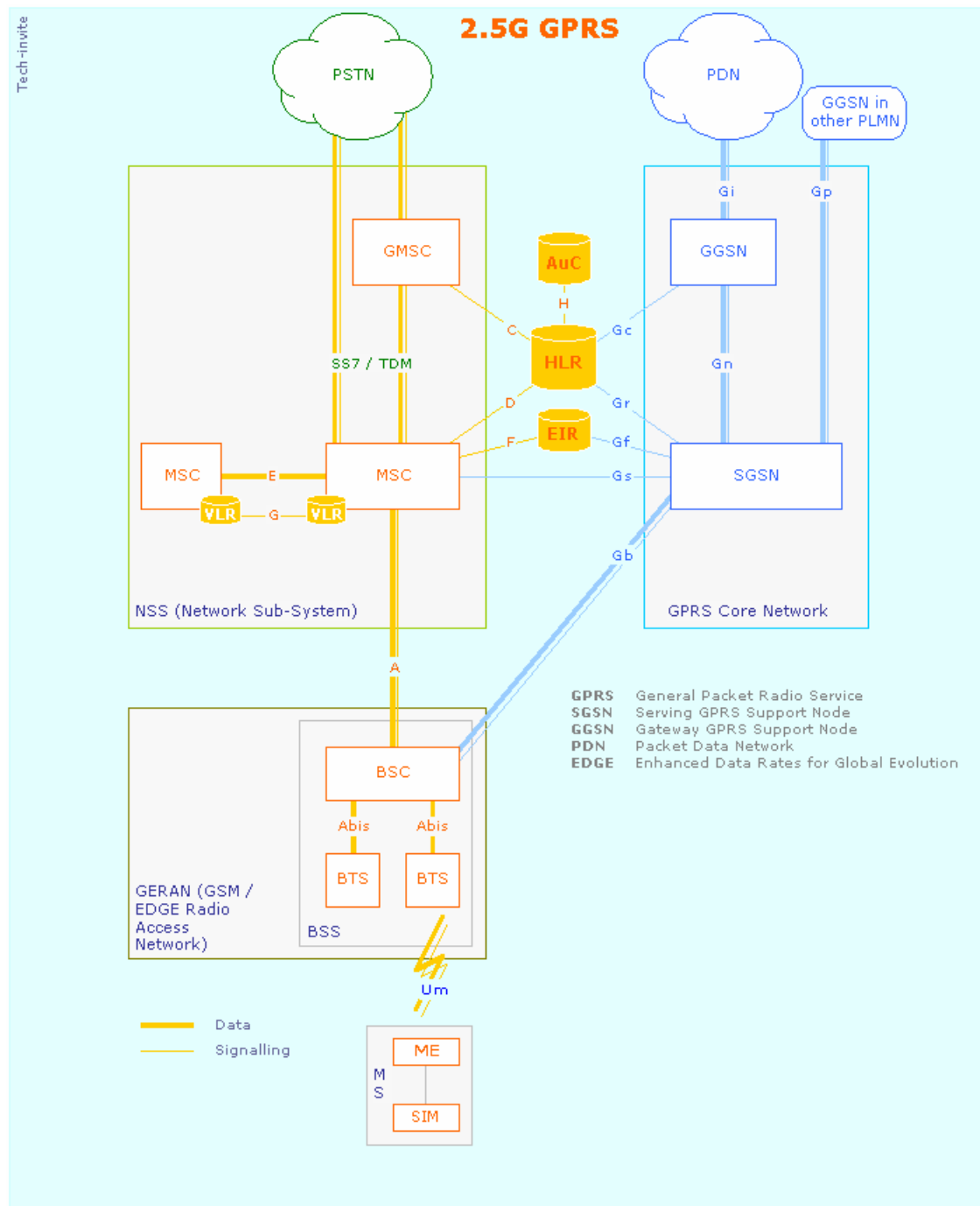


Fig. 3.9 Arquitectura de una red GSM con GPRS⁸

Además de nuevos dispositivos móviles, la red GPRS requiere cambios importantes en la infraestructura que representan inversiones adicionales para los operadores. Se requiere construir una nueva estructura dorsal (*backbone*) en la red, reemplazando el sistema

⁸ Fuente, Tech-Invite, SIP/IMS Technical Portal, <http://www.tech-invite.com/Ti-ims-releases.html#fig2>.

telefónico por uno más parecido a Internet. Sin embargo este es un paso en la dirección de 3G pues la mayoría de esa tecnología se basa en conmutación de paquetes.

GPRS y HSCSD

Estos dos sistemas son muy similares y compatibles. Todo operador de GSM tiene el plan de migrar eventualmente a GPRS. La duda es si vale la pena migrar antes a HSCSD. HSCSD es fácil de implementar, de tal manera que la pregunta es si disponen de suficiente capacidad para dar a cada usuario varios *slots* de tiempo dedicados.

GSM, HSCSD y GPRS pueden coexistir todos en una sola red y los móviles serán compatibles hacia atrás para efectos del desplazamiento o *roaming*. Por ejemplo, si un suscriptor utiliza en GPRS una terminal clase 18 que utiliza 8 *slots*, puede bajar a 4 *slots* para hacer *roaming* por la red HSCSD y a un *slot* cuando esté en la red GSM.

Algunos operadores de GPRS que manifiestan no dar soporte a HSCSD posiblemente no lo den para usuarios externos (que están haciendo *roaming*), pero sí para sus propios usuarios internos. Esto se debe a que los operadores usualmente subsidian el costo de los móviles a sus suscriptores y de esta manera tienen algún control sobre cual tecnología usar. Pero una vez instalado, GPRS es más eficiente.

3.7 PDC

El sistema Japonés de segunda generación PDC o *Personal Digital Cellular*, está basado en D-AMPS y diseñado para compatibilidad hacia atrás con el sistema analógico 1G existente, J-TACS. A pesar de solo estar instalado en el Japón, es el segundo estándar con mayores suscriptores en el mundo, detrás de GSM, debido en parte a servicio de Internet inalámbrico, *i-mode*.

J-TACS utilizaba canales de 25 MHz, por lo cual fue necesario hacer ajustes a D-AMPS que tiene canales de 30 kHz. Se utiliza el mismo tamaño de ranuras de tiempo y el mismo esquema de modulación, resultando en tasas de bits inferiores. Sin embargo, utiliza los codecs de voz de D-AMPS y obtiene los mismos 9.6 kbps, simplificando la corrección de errores, lo cual hace el sistema menos confiable. Este inconveniente se reduce haciendo las celdas más pequeñas de tal manera que el usuario tenga una vista más directa a la estación base. La tabla de la Fig. 3.10 muestra las diferencias de PDC con AMPS y GSM.

Por la densidad de la población, en el Japón las celdas son pequeñas para conseguir el mayor cubrimiento de suscriptores, pero debido a interferencia y dificultades con el *handover*, el tamaño inferior de la celda está acotado. Para el año 2000 el sistema PDC se estaba quedando sin capacidad, por lo cual los operadores optaron por incorporar conmutación de paquetes en las redes para utilizar la capacidad existente de una manera más eficiente.

La causa principal del éxito de PDC es el sistema para utilizar Internet en forma inalámbrica integrado con el teléfono móvil, denominado *i-mode* y desarrollado por el mayor operador, NTT DoCoMo. Este sistema provee acceso a miles de sitios Web

adaptados para las características físicas de los teléfonos celulares, utilizando la tasa de datos normal de 9.6 kbps, o inclusive a menor velocidad.

Sistema	Canal	Slots	Longitud de slots	Bits/slot	Modulación	Tasa de bits	Capacidad de datos
D-AMPS	30 MHz	3	6.67 ms	324	DQPSK	16.2 kbps	9.6 kbps
GSM	200 MHz	8	0.577 ms	156.25	GMSK	33.9 kbps	14.4 kbps
PDC	25 MHz	3	6.67 ms	290	DQPSK	14 kbps	9.6 kbps

Fig. 3.10 PDC comparado con otras tecnologías TDMA [4]
