CONTRIBUCIÓN AL DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DE RED PARA LA INTEGRACIÓN DE SERVICIOS DE PAQUETES DE DATOS EN EL SISTEMA UMTS

Tesi Doctoral presentada en la
Universitat Politècnica de Catalunya

Autora: **Anna Umbert Juliana**
Directora: **Pilar Díaz Romero**

Julio 2008

Capítulo 3. Descripción del sistema UMTS

En este capítulo se describe de forma general el sistema UMTS (**U**niversal **M**obile **T**elecommunication **S**ystem), que es el estándar de 3G definido en Europa y armonizado con Japón y otros países. Esta descripción intenta abarcar las principales características del sistema con el objetivo de dar un conocimiento general pero amplio del mismo.

En primer lugar se presentan los aspectos de interés del sistema UMTS. A continuación se explican las diferentes técnicas de acceso existentes y se describen las principales características de la técnica CDMA que es la base de la técnica de acceso WCDMA (**W**ideband **C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) usada en UMTS. Después se presenta el modelo de operación considerado para el UMTS y finalmente se describe la arquitectura del sistema UMTS poniendo especial interés en la descripción del interfaz radio.

Como se ha mencionado en el capítulo 2 (páginas 2-12 y 2-15), el IMT-2000 está formado por una familia de sistemas terrestres y vía satélite, con una cierta interoperabilidad entre sí. Para la componente terrestre se han seleccionado cinco interfaces radio: IMT-DS, IMT-MC, IMT-TC, IMT-SC y IMT-FT. Las versiones de WCDMA (IMT-DS) y de TD-CDMA (IMT-TC) son las componentes del IMT-2000 definidas por el 3GPP para el UMTS. Y los modos de operación que se trabajan con cada una de ellas son respectivamente UTRA FDD y UTRA TDD.

3.1. Aspectos de interés del sistema UMTS

Dentro de los aspectos de interés del sistema UMTS se describen diversos aspectos relacionados con la especificación del sistema y las diferentes fases de desarrollo, la asignación de frecuencias para el interfaz radio, la situación particular del sistema UMTS en España, la integración de tráfico de paquetes y circuitos, y finalmente el tema de la calidad de servicio (QoS).

3.1.1. Especificación del UMTS

Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, el 3GPP es el organismo encargado de elaborar las especificaciones del sistema que se realizan a partir de las normas que proponen el ETSI (organismo de estandarización europeo), la ARIB (organismo de estandarización japonés), el TTC (también japonés), el T1 (Estados Unidos), la TTA (Corea) y el CCSA (China, antes CWTS). Las especificaciones que genera el 3GPP se refieren al sistema con el nombre de UMTS por parte del ETSI, y con el nombre de FOMA (**F**reedom **O**f **M**obile multimedia **A**ccess) por parte de la ARIB y el TTC.

Al igual que todo proceso evolutivo, la especificación del UMTS se está realizando en diversas etapas que pretenden completar y mejorar el diseño del sistema. A cada una de estas etapas, que se ajustan a un calendario definido por el 3GPP, se le ha asignado una versión diferente de la especificación.

La primera versión que se definió es la conocida como "Release 1999" (R99) [1] que debía cerrarse en diciembre de 1999 (de ahí el nombre), aunque finalmente se congeló en marzo de 2000. El plazo para completar esta versión se estableció con el objetivo de ofrecer una especificación del sistema a tiempo para el desarrollo de redes UMTS en Japón. Desde los inicios de la 3G este país manifestó su interés en que el despliegue de dichos sistemas se realizara en el año 2000. La congelación de una versión significa que no se pueden introducir prestaciones o funciones nuevas, pero sí correcciones. De hecho el retraso en la fecha de congelación de la R99 tuvo sus aspectos positivos y negativos. Por un lado permitió incluir en ella prestaciones que inicialmente se habían descartado como es el traspaso de llamada en curso con el GSM, un aspecto que interesa mucho a los operadores europeos. Por el otro generó una fuerte incertidumbre sobre el grado de cumplimiento de las especificaciones en los equipos de las redes a desplegar.

La siguiente versión fue denominada temporalmente "Release 2000" ya que tenía prevista su conclusión para diciembre del año 2000, y finalmente fue substituida por dos versiones: "Release 4" (Rel-4) y "Release 5" (Rel-5). Estas dos versiones han sido cerradas, respectivamente, en marzo de 2001 y en marzo de 2002. En la nomenclatura de estas versiones el 3GPP ha reconsiderado su política en este tema pasando a referenciarlas por la numeración de los documentos de las especificaciones en lugar de por la fecha teórica de cierre. Debe tenerse en cuenta que los documentos de la R99 se corresponden con la versión 3 puesto que la numeración de las especificaciones es: 3.x.y, así la siguiente versión es la 4 (4.x.y), y la que le sigue la 5 (5.x.y), etc.

Aunque estas tres primeras versiones se han cerrado con un año de diferencia cada una, no existe una obligación formal de generar una versión anual. La intención es que se genere una nueva versión, consistente e implementable, siempre que la cantidad y contenido de los nuevos aspectos de trabajo lo justifiquen. Así pues actualmente se está trabajando en la "Release 6"

(Rel-6) que debería haberse cerrado en marzo de 2004, pero a fecha de hoy todavía no se ha cerrado.

3.1.2. Fases de UMTS

En el anterior apartado se ha tratado el desarrollo de UMTS desde el punto de vista de las especificaciones. Este desarrollo también puede analizarse desde el punto de vista de implementación real del sistema. En este contexto se habla de cuatro fases que tienen por objetivo "reducir el riesgo y el coste para los Operadores, y asegurar una temprana adopción de servicios por parte de los usuarios finales" [2].

La primera de estas fases consiste en incluir al sistema GSM (**G**lobal **S**ystem for **M**obile communication) conmutación de circuitos a alta velocidad, HSCSD (**H**igh **S**peed **C**ircuit **S**witched **D**ata), conmutación de paquetes, GPRS (**G**eneral **P**acket **R**adio **S**ervice) y operación de datos a alta velocidad, EDGE (**E**nhanced **D**ata for **G**SM **E**volution).

La siguiente fase se conoce como fase de Pruebas Pre-UMTS y en ella se han hecho pruebas de prototipos de estaciones base UMTS en redes de paquetes aisladas y en subconjuntos de redes GSM reales.

La fase de Despliegue Básico sigue la fase de pruebas y consiste en incorporar estaciones base para el acceso radio UMTS en redes en funcionamiento, y empezar a ofrecer servicios UMTS.

Y por último está la fase Comercial Completa que ha empezado después del 2002, y que inicialmente debería alcanzar su madurez en el 2005. Esta fase aportará mejoras en el funcionamiento y la capacidad del UMTS así como la introducción de nuevos y sofisticados servicios UMTS.

3.1.3. Distribución de espectro

La banda de frecuencias que usa el UMTS es la que está asignada al IMT-2000 por parte de la ITU/RR. Esta banda fue definida por la WARC92 (**W**orld **A**dministrative **R**adio **C**onference in the year 19**92**), y determina un espectro mínimo de 230 MHz en la banda de los 2 GHz [3]. La banda incluye tanto las comunicaciones terrestres como las comunicaciones por satélite. La Figura 3-1 muestra la asignación de espectro definida por la WARC'92, comparada con las reservas de Europa, Japón y Estados Unidos al respecto.

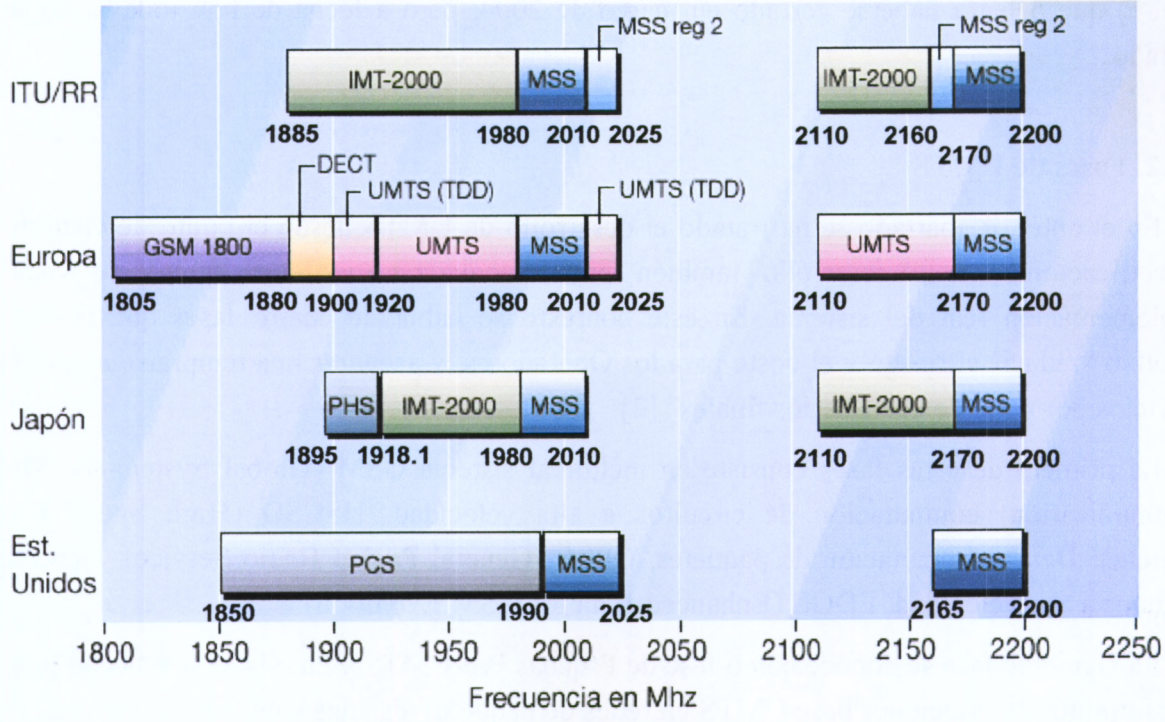

Figura 3-1. Espectro asignado por la WARC'92, y uso en los diferentes países

Aunque no está enteramente disponible ni en Europa ni en Japón, estos países disponen prácticamente de toda la banda requerida, mientras que Estados Unidos y otros países se han visto obligados a instalar sistemas de comunicaciones personales (PCS) en la banda asignada a IMT-2000, por lo que su convergencia al sistema universal de 3G está bastante más lejos.

Para el acceso radio terrestre del UMTS (UTRA) el ETSI estableció en el denominado "Acuerdo de París" que el sistema se estructuraba en dos componentes, FDD (**F**requency **D**ivision **D**uplex) y TDD (**T**ime **D**ivision **D**uplex) dando origen a dos modos diferentes de operación: UTRA FDD y UTRA TDD. La posibilidad de trabajar en FDD y en TDD permite un uso más eficiente del espectro disponible. Estos modos se definen de la siguiente manera:

- FDD: es un método dúplex en el cual las transmisiones del enlace descendiente (uplink) y del enlace ascendiente (downlink) usan dos frecuencias separadas. Se utilizan pues porciones emparejadas de la banda IMT-2000. Esto es:
    - 1920-1980 MHz para el enlace ascendente (*uplink*)
    - 2110-2170 MHz para el enlace descendente (*downlink*)
- TDD: es un método dúplex en el cual las transmisiones del enlace descendiente (uplink) y del enlace ascendiente (downlink) usan la misma frecuencia radio pero cada una

durante un intervalo de tiempo. Se utilizan pues porciones no emparejadas de la banda (aquéllas no repartidas a partes iguales entre los dos sentidos del enlace). Concretamente, usa las siguientes bandas: 1900 – 1920 MHz y 2010 – 2025 MHz.

El sistema de acceso que usa UMTS es DS-CDMA (**D**irect **S**equence **C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) con un ensanchamiento (*spread*) de la información en un ancho de banda de o bien unos 5 MHz (para FDD y TDD con velocidad de chip 3.84Mcps), llamado habitualmente Wideband CDMA (WCDMA), o bien de 1.6MHz (para TDD con velocidad de chip 1.28Mcps), llamado habitualmente Narrowband CDMA. Se explicará más adelante.

En UTRA TDD hay una componente TDMA (**T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) además de la DS-CDMA. Por eso este acceso también se ha referenciado como TDMA/CDMA.

El espaciado entre los canales es de 5 MHz lo que supone disponer de 60+60 MHz para la componente FDD (60 MHz para un sentido del enlace y otros 60 MHz para el contrario), y de 15+20=35 MHz para la TDD. Esto se traduce en 12 portadoras FDD y 7 portadoras TDD.

En Europa está previsto que parte de la banda TDD se destine a la explotación sin licencia de redes TDD, es decir sin condiciones de exclusividad, y expuestas a la potencial interferencia de este tipo de redes. Esta utilización se conoce como aplicaciones no coordinadas.

En España, la Administración ha concedido cuatro licencias de UMTS con la siguiente asignación de espectro cada una: 3 portadoras FDD y 1 portadora TDD. En consecuencia, quedan todavía disponibles 3 portadoras TDD.

Además de estas bandas en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del año 2000 (WRC 2000) se añadieron unas bandas adicionales (véase la Tabla 3-1). En muchos países dichas bandas se utilizan actualmente para otras redes en servicio, por lo que, la ITU deja a criterio de las administraciones la decisión sobre el momento y la forma de destinar dichas bandas a la 3G.

Tabla 3-1. Bandas IMT-2000 adicionales identificas en la WRC 2000

Región 1	Región 2	Región 3
862-890 MHz	806-890 MHz	806-890
890-942 MHz 942-960 MHz	890-902 MHz 928-942 MHz 942-960 MHz	890-942 MHz 942-960 MHz
	1710-1885 MHz 2500-2690 MHz	

3.1.4. UMTS en España

Uno de los problemas que más discusiones ha generado en los diferentes países es el tema de la adjudicación de nuevas licencias para poder implantar UMTS. Se han planteado diferentes métodos de adjudicación: subastas, concursos, o incluso hay países que han optado por dar estas licencias gratis. A continuación se muestran ejemplos de países que han usado los diferentes métodos:

- ⇨ Subasta: Reino Unido, Alemania, Holanda e Italia. Se han llegado a pagar hasta 8 billones de las antiguas pesetas, cosa que favorece principalmente al respectivo gobierno.
- ⇨ Concursos: España y Francia. En este método se han llegado a pagar cifras de 86.000 millones de las antiguas pesetas, un precio considerablemente inferior al anterior.
- ⇨ Gratis: Japón, Corea del Sur, Finlandia y Suecia.

Viendo esto llama la atención la escasa importancia que se le otorga a estas licencias en países que se encuentran más adelantados que la media de la Unión Europea, como puede ser Japón que las adjudica gratuitamente y EE.UU. que aun no se ha preocupado por el tema, ya que todavía están discutiendo la liberación del espectro en que deben operar los móviles de tercera generación.

Como consecuencia de los diferentes métodos de obtención de licencias hay algunos operadores que se encuentran con un grave problema ya que no tienen muy claro si llegaran a rentabilizar las altas cifras que han invertido para obtener sus licencias, puesto que esto supondría aumentar los costos de sus productos y eso resultará muy difícil por la competencia entre operadores. Algunos incluso, ya han empezado a hacer renuncias a las licencias obtenidas.

En España se han adjudicado cuatro licencias individuales de tipo B2 para UMTS que deberán proporcionar "*el establecimiento de la red de telecomunicaciones necesaria, y para la explotación del servicio de comunicaciones móviles de tercera generación*" [4]. La vigencia de estas licencias es de 20 años prorrogables por una sola vez por 10 años más. La adjudicación de estas licencias comenzó el 11 de Noviembre de 1999 con la convocatoria de concurso público por procedimiento abierto por parte del Ministerio de Fomento, y finalizó el viernes 10 de Marzo del 2000 con la adjudicación de las licencias. La Orden no apareció en los medios de comunicación hasta el lunes 13 de Marzo, por lo que en cierta bibliografía puede encontrarse esta fecha como fecha de asignación.

El concurso se dividía en tres pliegos: la documentación, indispensable para pasar a evaluar el resto de pliegos; la oferta técnica (plan técnico y visión de mercado) que se evaluaba sobre 300 puntos; y ultimo, la contribución económica (generación de puestos de trabajo y desarrollo tecnológico e industrial relacionado directamente o no con el proyecto) que se evaluaba sobre 100 puntos.

Los licitadores fueron seis: Telefónica Servicios Móviles, Airtel Móvil, Retevisión Móvil, Xfera Móviles, Movilweb 21 y Movi2. Los dos primeros son operadores de GSM con licencias en la banda de 900 MHz y 1800 MHz, el tercero es también operador de GSM pero sólo puede operar en la banda de 1800 MHz. Los tres últimos son consorcios que se crearon especialmente para el concurso. El resultado de la Mesa de Contratación fue la asignación de las cuatro licencias a:

- Telefónica Servicios Móviles, S.A.
- Airtel Móvil, S.A.
- Retevisión Móvil, S.A.
- Xfera Móviles, S.A.

De los diferentes tipos de licencias definidas (Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones: www.cmt.es), las que se pusieron a concurso en España son B2. La licencia de tipo B2 habilita para el establecimiento de la red necesaria y la explotación del servicio de comunicaciones móviles de tercera generación en todo el territorio nacional y incluye una asignación del espectro radioeléctrico de 15 MHz en la banda pareada, (es decir 15 MHZ entre 1920 MHz y 1980 MHZ y 15 MHz más entre 2010 MHz y 2170 MHz), y 5 MHz en la banda de 1900 a 1920 ó 2010 a 2025 MHz.

Aunque inicialmente el servicio de UMTS debía estar disponible en el año 2001, su aparición en España, como en el resto de Europa, se ha retrasado. Oficialmente Telefónica Móviles España empezó a ofrecer tarjetas para acceder a Internet a gran velocidad (hasta 384 kilo bits por segundo) desde ordenadores portátiles el 13 de febrero de 2004, y su principal rival en la competencia Vodafone tres días más tarde. Sin embargo este primer servicio ofrecido no está destinado al gran público sino a un pequeño sector de mercado formado por empresas.

3.1.5. Integración de tráfico de paquetes y circuitos

La provisión de acceso en modo paquete va a jugar un papel decisivo en la implantación del sistema UMTS ya que el porcentaje de tráfico de datos respecto a los servicios basados en conmutación de circuitos va a aumentar progresivamente en las redes de telecomunicación. Sin embargo hasta que los mecanismos basados en transmisión en modo paquete puedan soportar eficientemente servicios de tiempo real como la telefonía, resulta necesaria la coexistencia de ambas tecnologías. Así pues el UMTS debe albergar redes de conmutación de paquetes y de conmutación de circuitos en una misma plataforma de transporte.

Se plantearon dos opciones, basadas en ATM y IP, para la implementación de dicha plataforma. En un primer momento la opción que se presentó como clara candidata fue ATM, ya

que presentaba multiplexación de diferentes clases de servicios con calidades (QoS) dispares sobre un mismo enlace y un mecanismo de transporte con un alto grado de flexibilidad. Además esta tecnología se estaba introduciendo en las redes LAN (Local Area Network) y WLAN (Wireless Local Area Network), mientras que la tecnología IP no estaba lo suficientemente desarrollada para la provisión de servicios en tiempo real. No obstante el rápido desarrollo actual de la tecnología IP y la implementación del sistema GPRS han hecho que la opción de una red troncal exclusivamente basada en IP pase a presentarse como mejor opción. Como se detallará en el apartado 3.4.4 existen dos posibles escenarios para analizar la evolución hacia una red troncal UMTS basada en tecnología IP:

- IP termina en el RNC de UTRAN.
- IP llega a las estaciones de base.

Para UMTS se definieron dos dominios separados para las redes de circuitos (CS: Circuit Switched) y de datos (PS: Packet Switched). Para esta última los nodos de conmutación de paquetes especificados son los mismos del sistema GPRS: SGSN (Serving GPRS Support Node) y GGSN (Gateway GPRS Support Node). En la R99 de UMTS se consideró ATM como protocolo de transporte. No es hasta la Rel-5 que se da todo el protagonismo al protocolo IP.

El futuro de la plataforma de transporte está en la convergencia de los dominios de conmutación de paquetes y de circuitos en una misma arquitectura que se conoce como 'Todo IP' (All IP) [5][6][7]. En esta arquitectura 'Todo IP' desaparecen los elementos tradicionales de la conmutación de circuitos (MSCs, GMSCs) y los elementos de la red troncal pasan a soportar la conmutación de la voz sobre paquetes. El objetivo de la arquitectura 'Todo IP' es permitir a los operadores desplegar la tecnología IP en toda la red, incluido el interfaz de radio, para desarrollar los servicios de 3G. Para realizar esta transformación de la arquitectura se deberían separar los planos de transporte, conmutación y control. El transporte pasaría a una red IP multiservicio, destinada a transportar la información relacionada con la red UMTS y con otras redes. El control se realizaría a través de un conjunto de nodos servidores. Y la conmutación, únicamente de paquetes, sería soportada por los nodos de conmutación de paquetes ya existentes.

Una arquitectura "Todo IP" requiere que el protocolo de transporte (en este caso IP) sea capaz de manejar prioridades, de no ser así el soporte de servicios en tiempo real resulta inabordable. Esta es precisamente una de las carencias de la actual versión 4 del protocolo IP. Tanto por parte de los foros de especificación de 3G como los foros de especificación del mundo de Internet, como es el IETF (Internet Engineering Task Force), se están dedicando grandes esfuerzos para mejorar IP. Como alternativa realizable a corto plazo se considera una combinación de IP con ATM.

3.1.6. Calidad de Servicio (QoS) en UMTS

El sistema UMTS permitirá ofrecer una amplia gama de servicios y aplicaciones con diferentes calidades de servicios, QoS (**Q**uality **o**f **S**ervice). Estos servicios y aplicaciones podrán clasificarse en distintas categorías en función de su QoS. La propuesta inicial comprende cuatro clases de QoS o tipos de tráfico distintos [8]:

- ✓ Conversacional
- ✓ "Streaming" (flujo continuo)
- ✓ Interactiva
- ✓ "Background" (diferido, de fondo, secundario)

El factor percibido por el usuario más diferenciador de estas clases es la sensibilidad al retardo, siendo la clase Conversacional la más sensible, y la "Background" la menos sensible. A continuación se incluye una breve descripción de cada una de estas clases.

Clase Conversacional: orientada a servicios en tiempo real que generan tráfico simétrico, como la voz o la videotelefonía, donde la información es muy sensible a retardos. Las características más importantes son preservar la relación temporal entre las distintas entidades que participan de la comunicación, y mantener un retardo constante y bajo.

Clase "Streaming": está orientada a un flujo ("stream") en tiempo real como puede ser la transferencia de un video o la conexión a un distribuidor para bajar música en el móvil. Las aplicaciones de este tipo son muy asimétricas y menos sensibles al retardo que los servicios conversacionales. Se trata en general de servicios unidireccionales. El usuario recibe una señal de audio o bien una señal visual pero sólo en un sentido. En este caso no es importante el retardo, pero si éste existe, es conveniente que se mantenga constante.

Clase Interactiva: destinada a aplicaciones en las que el usuario final va solicitando datos a lo largo de la conexión, por ejemplo el acceso a páginas web, los juegos en red, la consulta a bases de datos y el acceso a servidores. Una de las principales características es que el usuario que ha realizado la solicitud espera en un cierto plazo de tiempo la respuesta (retardo variable y moderado), y que esta información debe transferirse con tasas de error de bit bajas.

Clase "Background": pensada para el caso en que el usuario final, generalmente una máquina, envía y recibe ficheros de datos en segundo plano, por ejemplo aplicaciones de e-mail, SMS, descargas de bases de datos, etc. En este caso el retardo temporal no es muy importante, sin embargo se debe garantizar la integridad de los datos, por lo que las tasas de error de bit deben ser muy bajas.

Los valores de BER (**B**it **E**rror **R**ate) y retardo máximo de la transferencia para las cuatro clases de QoS se pueden encontrar en el documento 22.105 del 3GPP [9].

3.2. Técnicas de acceso múltiple

En esta sección se describen las diferentes técnicas de acceso múltiple. Estas técnicas surgen de la necesidad de poder permitir a usuarios diferentes compartir un mismo medio físico de transmisión, como es el caso del canal de propagación dentro del ámbito de las comunicaciones móviles. La idea básica radica en la capacidad de separación que debe existir en el extremo receptor entre las señales provenientes de cada uno de los usuarios, para que puedan ser recuperadas de forma independiente y sin verse afectadas por las señales del resto. Dicho de otro modo, para garantizar su capacidad de separación es preciso que las señales transmitidas por los diferentes usuarios que comparten el mismo medio físico sean ortogonales entre sí. Dos señales son ortogonales entre sí si son separables en el receptor. Existen tres formas básicas de realizar esta compartición de recursos:

- ➔ Acceso múltiple por división de frecuencia, FDMA (**F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess).
- ➔ Acceso múltiple por división de tiempo, TDMA (**T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess).
- ➔ Acceso múltiple por división de código, CDMA (**C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess).

3.2.1. Acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA)

La compartición del interfaz aire con esta técnica de acceso múltiple se realiza transmitiendo las señales de los diferentes usuarios en bandas frecuenciales diferentes del espectro radioeléctrico, permitiéndose que los diferentes usuarios transmitan simultáneamente. La Figura 3-2 muestra un esquema del funcionamiento de esta técnica. En recepción, para separar la señal de un usuario de las del resto, basta con sintonizarse con la frecuencia empleada por el transmisor deseado y filtrar la señal recibida teniendo en cuenta su ancho de banda ocupado.

Con esta técnica un sistema de comunicaciones que disponga de un ancho de banda total de B_T Hz, y en el que el ancho de banda de la señal de cada usuario sea de B_c Hz, puede dar servicio a un total de $K=B_T/B_c$ usuarios que transmiten simultáneamente. Para garantizar la ortogonalidad entre todas las señales transmitidas la separación entre las portadoras o frecuencias centrales de cada banda debe ser como mínimo igual al ancho de banda B_c de cada usuario.

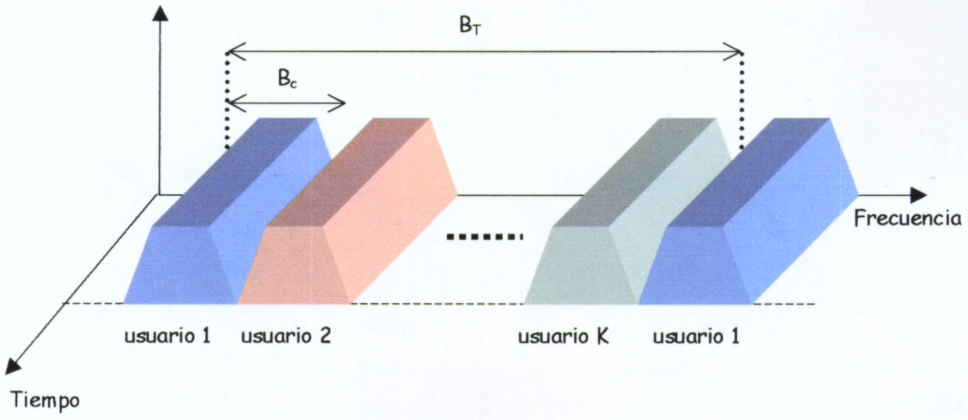

Figura 3-2. Técnica de acceso múltiple FDMA

Esta técnica de acceso ha sido ampliamente utilizada por los diferentes sistemas de radiocomunicaciones y, de hecho, todavía hoy cualquier sistema que emplee el espectro radioeléctrico conserva una cierta componente FDMA como mínimo a través de la asignación de bandas diferentes de dicho espectro para diferentes sistemas. Respecto de su relación con los sistemas de comunicaciones móviles, esta técnica fue la empleada por los sistemas de primera generación, tales como NMT ó AMPS, basados en modulaciones analógicas.

3.2.2. Acceso múltiple por división en tiempo (TDMA)

La técnica de acceso TDMA realiza la compartición del interfaz aire asignando a cada usuario un intervalo temporal para transmitir, conocido como *time slot*. A diferencia de la técnica FDMA, permite a diferentes usuarios usar la misma banda frecuencial y la separación entre señales en el receptor viene propiciada por la no existencia de solapamiento temporal. Para garantizar este no solapamiento deben existir mecanismos de sincronización que indiquen a cada usuario cual es el intervalo en el que puede transmitir, y que eviten que las señales de diferentes usuarios se solapen debido a los diferentes tiempos de propagación de cada uno, como por ejemplo el avance temporal definido en GSM.

En la Figura 3-3 se ilustra la compartición del medio de transmisión según TDMA para diferentes usuarios.

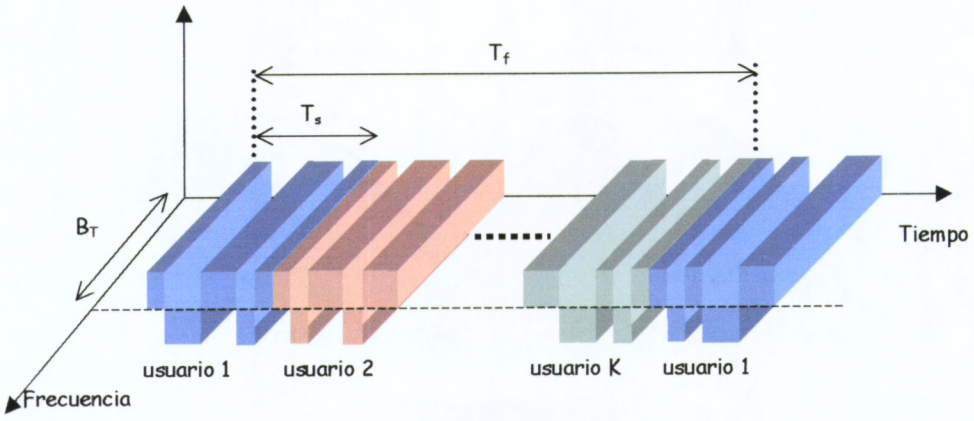

Figura 3-3. Técnica de acceso múltiple TDMA

La asignación de un *time slot* a un usuario se va repitiendo en el tiempo, habitualmente con una cierta periodicidad. La separación entre un *time slot* y el siguiente asignado a un mismo usuario se denomina tiempo de trama, ya que al conjunto de *time slots* asignados a diferentes usuarios que se va repitiendo periódicamente se le denomina trama. Así pues a cada usuario se le permitiría transmitir una vez cada trama. Observando la Figura 3-3, para una trama de duración T_f s subdividida en *time slots* de duración T_s s, el número de usuarios a los que se podrá dar servicio en el sistema es de $K=T_f/T_s$, y cada vez que uno de ellos transmita hará uso de todo el ancho de banda asignado, B_T.

Tradicionalmente, los esquemas de multiplexación digitales basados en TDMA se han empleado para comunicaciones en banda base alámbricas, tales como la estructura de tramas MIC 30 + 2 (**M**odulación por **I**mpulsos **C**odificados) utilizada por ejemplo para el transporte de señales vocales entre centrales de conmutación. También se utiliza este esquema en el sistema de comunicaciones móviles de segunda generación GSM, en combinación con el esquema FDMA. En este caso se emplea un acceso FDMA con la existencia de 125 portadoras con un ancho de banda de 200 kHz cada una y un acceso TDMA con tramas de 4.615 ms subdivididas en 8 *time slots*, lo que permite disponer de hasta 8 comunicaciones en cada portadora.

3.2.3. Acceso múltiple por división en código (CDMA)

Esta tercera técnica de acceso es la más innovadora ya que los diferentes usuarios pueden transmitir simultáneamente usando la misma banda frecuencial. La ortogonalidad en CDMA se consigue con el uso de secuencias código, es decir cada usuario envía su señal multiplicada por un código ortogonal al de los otros usuarios. La Figura 3-4 muestra cómo diferentes usuarios comparten el medio de transmisión según esta técnica. En recepción, basta con conocer la secuencia código de cada usuario para conseguir separar cada una de las señales.

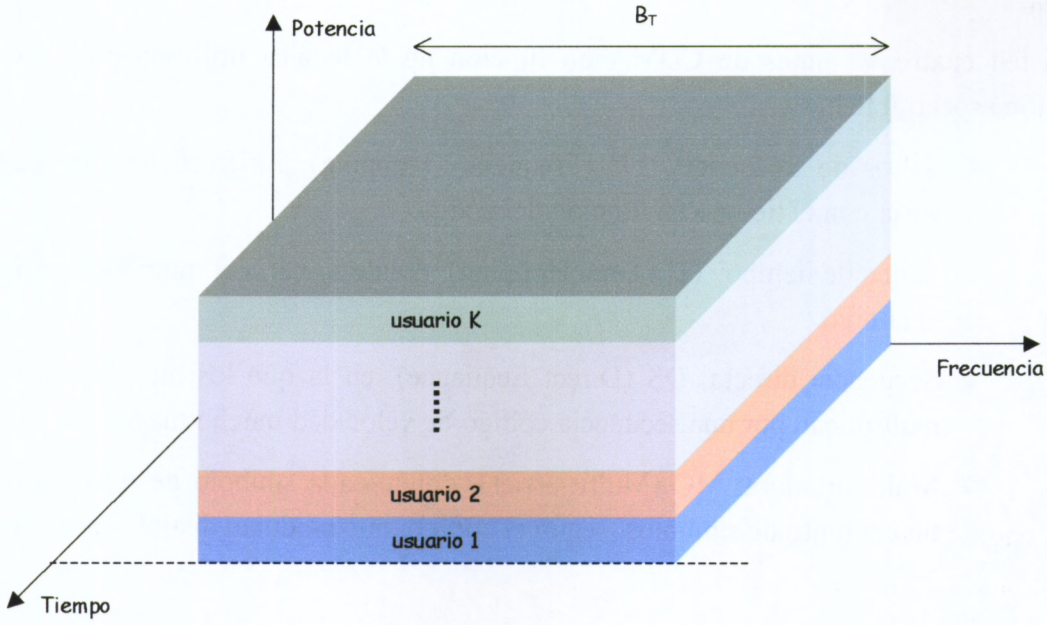

Figura 3-4. Técnica de acceso múltiple CDMA

En la práctica, la búsqueda de secuencias estrictamente ortogonales para ser usadas como códigos de acceso, conduce a un número insuficiente de secuencias como para albergar un sistema de gran capacidad. El interés en los diversos estudios sobre secuencias pseudoaleatorias que se han realizado se ha centrado primordialmente en la búsqueda de conjuntos formados por un gran número de secuencias que presenten un buen comportamiento desde un punto de vista de ortogonalidad, aunque no sean estrictamente ortogonales. Estas secuencias se conocen como secuencias quasi-ortogonales.

Los sistemas de acceso múltiple CDMA son sistemas de espectro ensanchado (SS: **S**pread **S**pectrum), ya que con esta técnica el ancho de banda de la señal transmitida es muy superior a la anchura de banda necesaria para transportar la información. Los bits de información del usuario se ensanchan en toda la banda de espectro disponible simplemente multiplicando la información del usuario por bits quasi-aleatorios (conocidos como chips) que provienen del código CDMA usado.

La operación de ensanchamiento proporciona una importante ventaja que es la mejora de la inmunidad frente a desvanecimientos selectivos en frecuencia: al ser el ancho de banda de coherencia del desvanecimiento mucho menor que el ancho de banda de la señal, el porcentaje de energía de la señal transmitida que se ve afectado por el desvanecimiento es pequeño y tanto menor cuanto mayor es el ensanchamiento. Por tanto, cuanto mayor sea el ensanchamiento,

mayor inmunidad. Esta ventaja aplica también frente a interferencias debidas a señales de banda estrecha.

Existen cuatro variantes de CDMA en función de la técnica utilizada para conseguir la expansión espectral [2]:

- ⇨ Saltos de frecuencia, FH (Frequency Hopping). La frecuencia de la portadora varía con el tiempo en función del código.
- ⇨ Saltos de tiempo, TH (Time Hopping), donde se varía el intervalo temporal según el código.
- ⇨ Secuencia directa, DS (Direct Sequence), en la que los bits de información se multiplican por una secuencia código de velocidad mucho mayor.
- ⇨ Multiportadora, MC (MultiCarrier), donde cada símbolo de información genera un conjunto de símbolos, según el código, que modulan distintas portadoras.

La modalidad de secuencia directa (DS-CDMA) es la más utilizada en sistemas de comunicaciones móviles de espectro ensanchado y constituye la base del interfaz radio del UMTS. En efecto, la técnica WCDMA (**W**ideband **C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess), definida en UMTS para el modo FDD, es una técnica Direct Sequence CDMA (DS-CDMA) que transmite la información en banda ancha. En lo sucesivo se considerará DS-CDMA cuando se mencione CDMA.

La limitación del número máximo de usuarios que pueden tolerarse en un sistema usando CDMA no es tan clara como en los casos TDMA y FDMA para los que existe un número fijo de canales disponibles. En CDMA, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las familias de códigos totalmente ortogonales son bastante reducidas en cuanto a número de códigos. De manera que puede existir una limitación en el número de usuarios motivada por el número total de códigos disponibles.

- Con objeto de disponer de un número de secuencias código mayor, habitualmente se emplean familias de códigos quasi-ortogonales que tengan unas buenas propiedades de correlación. En este caso, las señales de los diferentes usuarios se pueden separar pero se mantiene un cierto nivel de interferencia residual que aumenta cuando aumenta el número de usuarios transmitiendo simultáneamente. Este nivel de interferencia se traduce en una cierta tasa de error en la señal recuperada, por lo que el límite máximo de usuarios que pueden tolerarse dependerá directamente de la tasa de error que cada uno pueda tolerar. Así, no puede hablarse de un límite de capacidad rígido como en los casos TDMA y FDMA sino que existe una capacidad *soft* en tanto que se podrán aceptar más usuarios si sus requerimientos de tasa de error son más relajados.

El origen de la técnica de acceso CDMA se encuentra en las técnicas de espectro ensanchado que fueron desarrolladas en el ámbito militar como estrategia para proporcionar robustez frente a interferencias de banda estrecha y para llevar a cabo comunicaciones secretas gracias a la apariencia de ruido de las señales transmitidas. La técnica de CDMA aparece por primera vez en la década de los 50 en proyectos americanos clasificados. Entre los descubrimientos más significativos, debe citarse la invención del receptor RAKE de 1958 y la necesidad del control de potencia mencionada por Magnuski en 1961 [10]. En los sistemas de comunicaciones móviles, ha sido utilizada ya en algunos sistemas de segunda generación, como IS-95 en Estados Unidos impulsado por la empresa Qualcomm Inc., pero son los sistemas de tercera generación los que harán un uso extensivo de este mecanismo.

A continuación se describen las principales características de la técnica CDMA.

3.2.3.1. La mejora de la eficiencia espectral en CDMA

El incremento de la eficiencia espectral es la única forma de reducir el coste de instalación de los nuevos sistemas. El principal interés de CDMA reside en que es más eficiente espectralmente que FDMA o TDMA. En julio de 1993 (en operación desde 1996) apareció un sistema en Estados Unidos, el denominado Qualcomm CDMA (que luego se convertiría en el estándar IS-95) que ofrecía un conjunto de soluciones nuevas e interesantes para mejorar la eficiencia espectral.

Esta mejora de la eficiencia espectral se observa en los aspectos siguientes [10]:

- ⇨ Optimizar la capacidad de los canales: CDMA se aproxima a las condiciones ideales que, según la Teoría de la Información (Teoremas de Shannon), permiten optimizar la capacidad de los canales.
- ⇨ Aprovechar las pausas en la comunicación: el CDMA permite aprovechar las pausas en la comunicación de la voz y los datos ya que reparte potencia en lugar de espectro-tiempo. Limitar la potencia transmitida en estos periodos de pausa permite que esa potencia pueda ser aprovechada por otros usuarios, y de esta forma ganar en eficiencia estadística.
- ⇨ Capacidad: para transmisión telefónica, puede obtenerse un orden de magnitud de la capacidad de un sistema CDMA mediante la siguiente expresión aproximada:

$$N = \frac{\frac{W}{R}}{\frac{Eb}{No}} \frac{GvGaPc}{f} \qquad \textbf{(3-1)}$$

donde:

W: Velocidad en chips/s

R: Tasa binaria de la transmisión
Gv: Ganancia por la actividad de la voz
Ga: Ganancia por sectorización
Pc: Pérdida por error en el control de potencia
f: Factor de reutilización
Eb/No: Relación energía por bit/densidad espectral de ruido más interferencias para una cierta calidad de transmisión

Para el caso concreto del UMTS unos valores típicos son: W=3840 kchip/s, R=12.2kbits/s para voz, Gv=1.7, Ga=2.4, Pc=0.5-0.3, f=1.7 y Eb/No=5.3 dB= 3.38. Con estos valores típicos se obtienen 67 canales de voz por portadora de 5 MHz del sistema UMTS.

De la ecuación anterior se observa que, reduciendo la exigencia de Eb/No del sistema para un determinado nivel de calidad, lo que puede lograrse con un procesado más completo de la señal, se puede aumentar la capacidad. Este efecto es mucho más marcado que en TDMA.

3.2.3.2. Spreading and Despreading

El término inglés *spreading* significa ensanchamiento, y el término *despreading* significa compresión.

En el caso de la técnica DS-CDMA, el ensanchamiento se consigue multiplicando la señal digital en banda base por una secuencia conocida por los extremos en comunicación. Dicha secuencia posee una velocidad mucho mayor que la de banda base. El producto modula a una portadora, con lo que se consigue una señal modulada cuyo ancho de banda es substancialmente mayor que el ancho de la señal original. En recepción se multiplica la señal demodulada por la misma secuencia, lo que permite recuperar la señal de banda base. Esta operación restaura el ancho de banda de la señal útil, pero en cambio ensancha la de cualquier señal interferente de banda estrecha que pudiera recibirse, reduciendo la cantidad de energía de ésta que interfiere con la señal útil, en proporción al ensanchamiento efectuado.

El grado de aumento que experimenta el ancho de banda en un sistema DS-CDMA se expresa mediante el denominado factor de ensanchamiento SF *(Spreading Factor)*, que puede expresarse de dos formas equivalentes (ecuación (3-2)): la relación entre el ancho de banda de la señal resultante de multiplicar por la secuencia de ensanchamiento $BW_{d.c}$, y el ancho de la señal en banda base BW_d, o también como la relación entre la duración de un bit de la señal en banda base T_b y la duración de un chip de la señal ensanchada T_c. Este factor también recibe el nombre de *ganancia de procesado* (G_p) tal como se menciona al final de este apartado.

$$SF = \frac{T_b}{T_c} = \frac{BW_{d.c}}{BW_d} = G_p \qquad \textbf{(3-2)}$$

A continuación se describe el proceso de ensanchamiento y compresión.

La Figura 3-5 muestra un diagrama de bloques simplificado de un transmisor DS-CDMA con modulación BPSK (**B**inary **P**hase **S**hift **K**eying), donde $d(t)$ es la señal de información a transmitir, $c(t)$ es la secuencia código utilizada, propia de la técnica CDMA, y $s(t)$ es la señal ensanchada que se transmite.

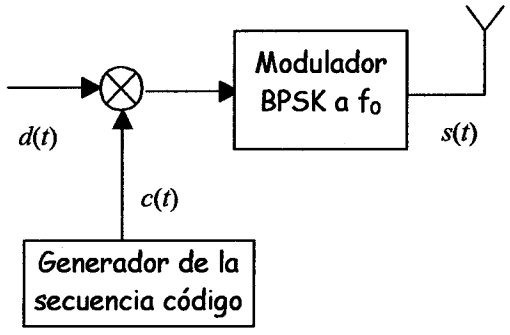

Figura 3-5. Transmisor DS-CDMA

La señal de información a transmitir, $d(t)$, presenta un período de bit de duración T_b, esto es:

$$d(t) = A\sum_k b_k p(t - kT_b) \tag{3-3}$$

donde los bits b_k se suponen codificados según +1, -1, A es la amplitud que determinará la potencia transmitida y $p(t)$ corresponde al pulso conformador.

De este modo, suponiendo la existencia de un pulso conformador rectangular, la densidad espectral de potencia es [11]:

$$S_d(f) = A^2 T_b \frac{\text{sen}^2(\pi T_b f)}{(\pi T_b f)^2} \tag{3-4}$$

que presenta un ancho de banda entre ceros de valor $BW_d=2/T_b$.

La señal $c(t)$ está formada por N valores pseudoaleatorios denominados *chips*, cada uno de ellos de duración T_c, y presenta un ancho de banda entre ceros de valor $BW_c=2/T_c$. Esta secuencia se repite periódicamente cada T_b, de modo que se cumple la relación $N=T_b/T_c$. En consecuencia la expresión temporal de $c(t)$ viene dada por:

$$c(t) = \sum_k \sum_{i=0}^{N-1} c_i p_c(t - iT_c - kT_b) \tag{3-5}$$

donde c_i son los valores +1 ó -1 de los chips y $p_c(t)$ es un pulso conformador rectangular de duración T_c.

Así pues, la señal que finalmente se estará transmitiendo, $s(t)$, viene dada por:

$$s(t) = d(t)c(t)\cos(2\pi f_0 t) = A\sum_k b_k \sum_{i=0}^{N-1} c_i p_c(t - iT_c - kT_b)\cos(2\pi f_0 t) \qquad \textbf{(3-6)}$$

Como puede apreciarse, la variación temporal de $s(t)$ viene fundamentalmente gobernada por el período de chip T_c.

En la Figura 3-6 se muestra, un ejemplo de evolución temporal de las diferentes señales involucradas.

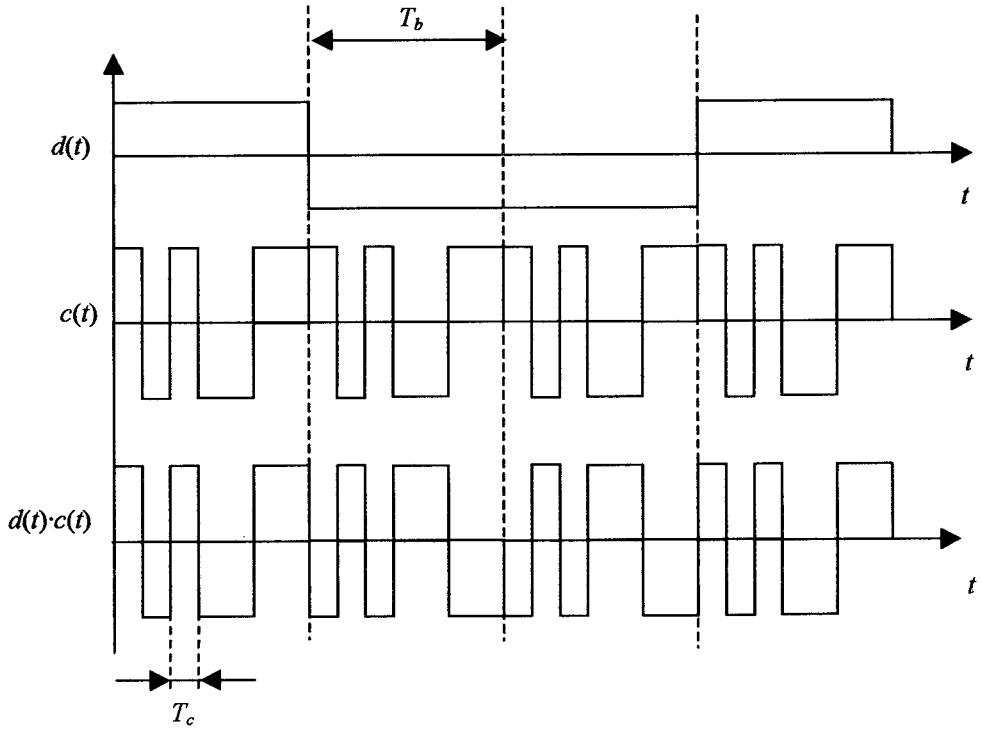

Figura 3-6. Evolución temporal de las señales en el transmisor DS-CDMA

Y la densidad espectral de potencia de la señal paso bajo $d(t)\cdot c(t)$ será:

$$S_{d\cdot c}(f) = A^2 T_c \frac{\text{sen}^2(\pi T_c f)}{(\pi T_c f)^2} = \frac{A^2 T_b}{N} \frac{\text{sen}^2\left(\pi \frac{T_b}{N} f\right)}{\left(\pi \frac{T_b}{N} f\right)^2} \qquad \textbf{(3-7)}$$

que presenta un ancho de banda entre ceros de valor $BW_s=2/T_c=2N/T_b$. Por lo que se observa que la banda ocupada por la señal $s(t)$ se ha ensanchado en un factor $N=T_b/T_c$ respecto de la banda ocupada por la señal de información $d(t)$ a la vez que la densidad espectral de potencia se ha reducido en un factor N, manteniéndose igual la potencia total transmitida, tal y como se representa en la Figura 3-7. El número de chips existentes en cada bit transmitido, N, es uno de los parámetros más importantes de un sistema DS-CDMA y se conoce con los nombres de *ganancia de procesado*, ya que cuanto mayor sea esta relación, mayor es la robustez del sistema frente a la existencia de interferencias; y de *factor de ensanchamiento*, ya que indica cuanto se ensancha la información.

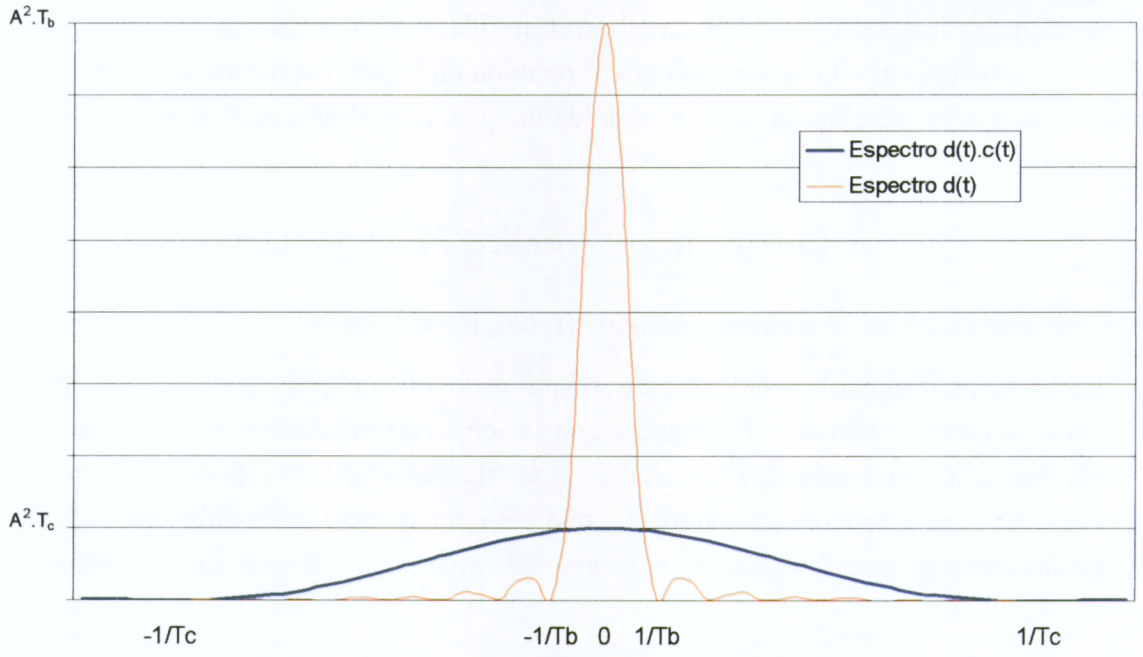

Figura 3-7. Ensanchamiento espectral en DS-CDMA

En la Figura 3-8 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al receptor DS-CDMA que está constituido por un generador local de la secuencia código $c(t)$ que debe ser idéntica a la empleada en transmisión, y por un desmodulador BPSK.

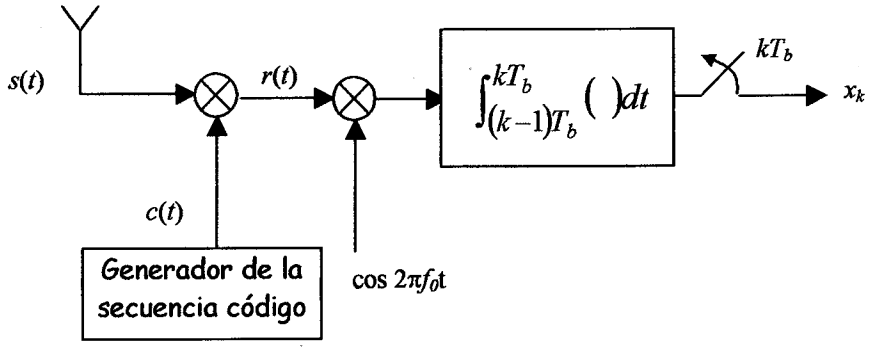

Figura 3-8. Receptor DS/CDMA

Si se recibiera una señal $s(t)$ idéntica a la transmitida, y si la secuencia código $c(t)$ generada localmente en recepción y la secuencia código recibida en la señal $s(t)$ estuvieran perfectamente sincronizadas a nivel de chip, la señal a la salida del primer multiplicador, $r(t)$, vendrá dada por la expresión:

$$r(t) = s(t)\cdot c(t) = d(t)c(t)c(t)\cos(2\pi f_0 t) = d(t)\cos(2\pi f_0 t) \qquad \textbf{(3-8)}$$

puesto que el producto de la secuencia código $c(t)$ consigo misma es 1.

El hecho de multiplicar la señal recibida $s(t)$ por $c(t)$ realiza el proceso inverso al ensanchado que se llevó a cabo en emisión. De manera que la señal $r(t)$ presentará una densidad espectral con ancho de banda entre ceros $2/T_b$ igual al de la señal original $d(t)$. Así pues integrando la señal en períodos de T_b se obtendrán los valores x_k, que permiten recuperar los diferentes bits enviados b_k ya que únicamente los diferencia una constante tal como puede verse en la siguiente ecuación:

$$x_k = \frac{A}{2} T_b \cdot b_k \qquad \textbf{(3-9)}$$

3.2.3.3. Protección frente a interferencias

Continuando con el análisis del receptor DS-CDMA, en este apartado se estudia qué ocurre con las interferencias. Existen básicamente dos tipos de interferencias:

a) Interferencias de banda ancha

Las interferencias de banda ancha aparecen cuando conjuntamente con la señal de usuario deseada $s_1(t)$, se recibe la señal interferente de otro usuario $s_2(t)$ codificada con otra secuencia $c_i(t)$ y con igual potencia que la del usuario útil. Se observan dos casos:

1. Los códigos empleados son perfectamente ortogonales. En este caso el producto escalar entre estas dos señales $s_1(t)$ y $s_2(t)$, provinentes de dos usuarios diferentes es nulo.

$$\int s_1(t)\, s_2(t)\, dt = 0 \tag{3-10}$$

2. Los códigos no son ortogonales sino que simplemente presentan una baja correlación cruzada. En este caso, el más habitual, el producto escalar no es 0 sino que da lugar a una señal de espectro ensanchado que presenta una densidad espectral por debajo de la de la señal útil en un factor del orden de la ganancia de procesado. Así, igualmente se recuperan los bits del usuario útil pero con una cierta probabilidad de error tanto menor como mayor sea la ganancia de procesado empleada.

b) Interferencias de banda estrecha

Las interferencias de banda estrecha aparecen cuando conjuntamente con la señal del usuario deseada se recibe una cierta señal interferente *i(t)* de banda estrecha y de potencia P_I, con una fase aleatoria φ_i uniformemente distribuida entre 0 y 2π:

$$i(t) = \sqrt{2P_I}\cos(2\pi f_0 t + \varphi_i) \tag{3-11}$$

En el receptor al multiplicar la señal interferente *i(t)* por la secuencia código y por la portadora local se obtiene, prescindiendo del término a frecuencia $2f_0$, que será filtrado por el integrador, la señal de espectro ensanchado *i'(t)*, que puede expresarse como:

$$i'(t) = i(t)\cdot c(t)\cos(2\pi f_0 t) = \sqrt{\frac{P_I}{2}}\cos\varphi_i \sum_k \sum_{i=0}^{N-1} c_i\, p_c(t - iT_c - kT_b) \tag{3-12}$$

Es fácil demostrar que, tras el proceso de integración en un período T_b, la señal interferente resultante presenta una potencia igual a:

$$P_{\text{int}} = \frac{P_I T_c T_b}{4} \tag{3-13}$$

De donde la relación (E_b/N_0) (energía de bit respecto a densidad espectral de la señal interferente) a la salida del demodulador se relacionará con la relación señal a interferente a la entrada del receptor $(C/I)_i$ a través de:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)=\frac{\frac{A^2}{2}T_b}{P_I T_c}=\left(\frac{C}{I}\right)_i N \qquad \textbf{(3-14)}$$

Por lo tanto, por el hecho de haber ensanchado la interferencia de banda estrecha en el receptor, se ha logrado una mejora a la salida en un factor igual a la ganancia de procesado N respecto de la relación señal a interferente a la entrada, lo que pone de manifiesto la importancia de este parámetro como medida de la robustez frente a interferencias del esquema DS-CDMA.

De lo anterior se concluye que la técnica CDMA presenta una buena protección frente a cualquier tipo de interferencias.

3.2.3.4. Los códigos de ensanchamiento

Las secuencias empleadas para ensanchar disponen de unas propiedades de correlación especialmente buenas. De manera que el producto de una secuencia consigo misma produce un valor mucho mayor que el producto de esa misma secuencia con una réplica de sí misma desplazada en el tiempo en uno o más chips o con otra secuencia diferente. Esta diferencia en los productos resulta determinante en recepción, donde, gracias a ella, la señal resultante de multiplicar por la secuencia de recepción una señal interferente -afectada por una secuencia ajena- se ve disminuida frente a la señal útil permitiendo desacoplar unas transmisiones de otras.

Existen básicamente dos grandes grupos de secuencias: ortogonales y no ortogonales.

Secuencias ortogonales: en ellas la ortogonalidad únicamente se garantiza si las secuencias están perfectamente alineadas a nivel de chip, el más pequeño desplazamiento puede degradar las prestaciones enormemente. Además las familias de secuencias ortogonales están formadas por un número reducido de secuencias. Las familias más usadas habitualmente son [12]:

- ⇨ Secuencias de Walsh basadas en matrices de Hadamard. Usadas en IS-95.
- ⇨ Códigos OVSF que permiten generar secuencias ortogonales de factor de ensanchamiento variable. Seleccionados para UMTS.

Secuencias no ortogonales: dentro de este grupo las secuencias más relevantes son las pseudoaleatorias que intentan imitar secuencias aleatorias. A diferencia de las secuencias aleatorias estas secuencias tienen un periodo finito de repetición y se pueden generar. Así mismo, aunque puedan exhibir buenas propiedades de correlación, el producto de dos de ellas que sean diferentes entre sí es cero. Ahora bien, esta propiedad subsiste sólomientras las secuencias mantengan una sincronización mutua, de manera que se deteriora substancialmente -y en ocasiones se pierde- cuando tiene lugar deslizamientos temporales entre ellas. Este efecto

tiene que ser considerado especialmente en la transmisión radio, donde, por efecto del multicamino, puede recibirse una señal junto con versiones de la misma afectadas de diferentes retardos y factores de atenuación. Las más destacadas son:

- ⇨ Secuencias de Gold, que presentan buenas propiedades de correlación cruzada y autocorrelación para correlaciones periódicas. Se entiende por correlación periódica que el periodo de la secuencia y el factor de ensanchamiento coincidan, y que, para la correlación cruzada, los dos símbolos sean iguales. En UMTS se utilizan en los canales pilotos transmitidos por estaciones base diferentes.
- ⇨ Familia S(2) con secuencias similares a las de Gold pero de duración más corta. En UMTS se usan en el enlace ascendente.
- ⇨ Secuencias de Golay generalizadas, que tienen buenas propiedades de autocorrelación aperiódicas. Se utilizan para la sincronización en UMTS.

3.2.3.5. Canal radio multicamino y receptor Rake

Los canales de propagación que se usan en los sistemas de comunicaciones móviles presentan el fenómeno del multicamino, que consiste en la recepción de diferentes réplicas de una misma señal en el terminal receptor, afectadas por atenuaciones y retardos distintos. La combinación de estos ecos puede causar desvanecimientos muy profundos e interferencia entre símbolos a no ser que se separen las diferentes componentes recibidas para utilizar el multicamino como forma natural de diversidad. La filosofía de las técnicas de espectro ensanchado y por tanto del CDMA es especialmente útil para aprovechar la información provinente de los diferentes trayectos.

En efecto, en los sistemas CDMA la recuperación de la señal en banda base se realiza multiplicando la señal digital demodulada por la secuencia código empleada en la transmisión, una vez alineada en tiempo con la señal recibida. De la misma manera cada trayecto puede verse como una transmisión basada en la misma secuencia código, pero desplazada en el tiempo con respecto a las de los otros trayectos. Así pues, correlando la señal recibida con respecto a las versiones desplazadas se puede obtener la parte de señal transportada por los diferentes trayectos. Alineando las diferentes contribuciones y combinándolas de forma coherente se consigue recuperar la porción de energía de señal contenida en cada trayecto. Para poder procesar los diferentes ecos es necesario que estén separados como mínimo un período de chip T_c, es decir, la resolución temporal viene limitada por el ancho de banda de la señal.

El receptor conocido como RAKE, inventado por Price y Green en 1958 para el caso de transmisiones binarias, lleva a cabo esta tarea. La estructura general de este tipo de receptor se

ilustra en la Figura 3-9. El receptor RAKE dispone de tantas ramas como caminos de propagación, por lo que la complejidad y el coste del receptor aumentan conforme se aumenta el número de trayectos a recuperar. Por ello, es preciso limitar dicho número a una cantidad que permita obtener un porcentaje elevado de la energía de la señal, mas allá del cual la adición de nuevos trayectos suponga un incremento pequeño. Habitualmente esto se consigue con 6 u 8 trayectos. En cada una de las ramas se multiplica la señal por una réplica local de la forma de onda ensanchada, con el correspondiente retardo. Posteriormente se integran y combinan todas estas señales como si se tratase de un sistema convencional de diversidad basado en la técnica MRC (**M**aximal **R**atio **C**ombining) [11].

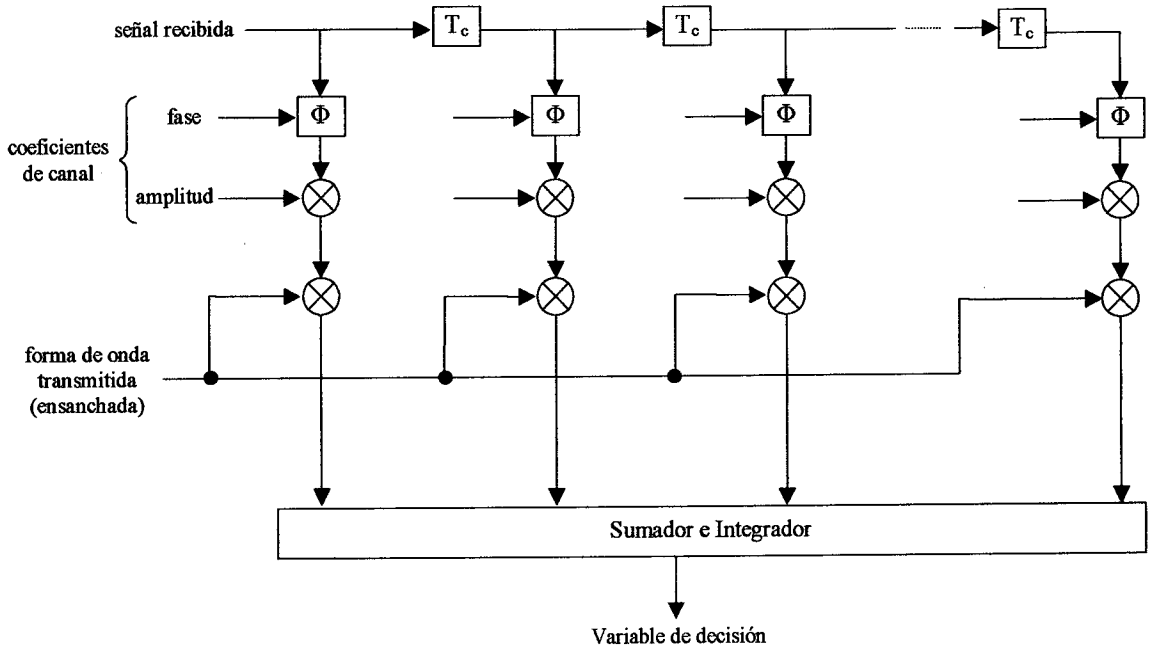

Figura 3-9. Estructura general de un receptor RAKE

3.2.3.6. Control de potencia

El control de potencia es posiblemente el aspecto más importante de la técnica CDMA, en particular en el enlace ascendente. Sin dicho control, un usuario que transmitiera con exceso de potencia podría bloquear todas las comunicaciones de una célula, pues se trata de una técnica de acceso limitada por interferencias.

En la técnica CDMA el desacoplo entre comunicaciones no es perfectamente ortogonal, de manera que persiste un residuo de interferencia procedente de las comunicaciones ajenas que coexisten simultáneamente en la misma banda frecuencial. Así pues, cada transmisión presente en un momento dado aporta una contribución de interferencia, muy similar al ruido blanco, provocando que la relación señal útil y señal interferente descienda a medida que aumenta el

número de transmisiones simultáneas. Este comportamiento genera un efecto conocido como "respiración celular" (*cell breathing*), ya que la cobertura de una célula en un sistema CDMA se reduce a medida que aumenta su carga de tráfico, y aumenta a medida que esta carga disminuye.

La interferencia del resto de usuarios es especialmente crítica en el enlace ascendente. Un usuario cerca de la estación base puede degradar enormemente las prestaciones del sistema enmascarando la transmisión de otro usuario ubicado en el limite de la célula tal como muestra la Figura 3-10. Este es el conocido como efecto cerca-lejos, del inglés *near-far effect*.

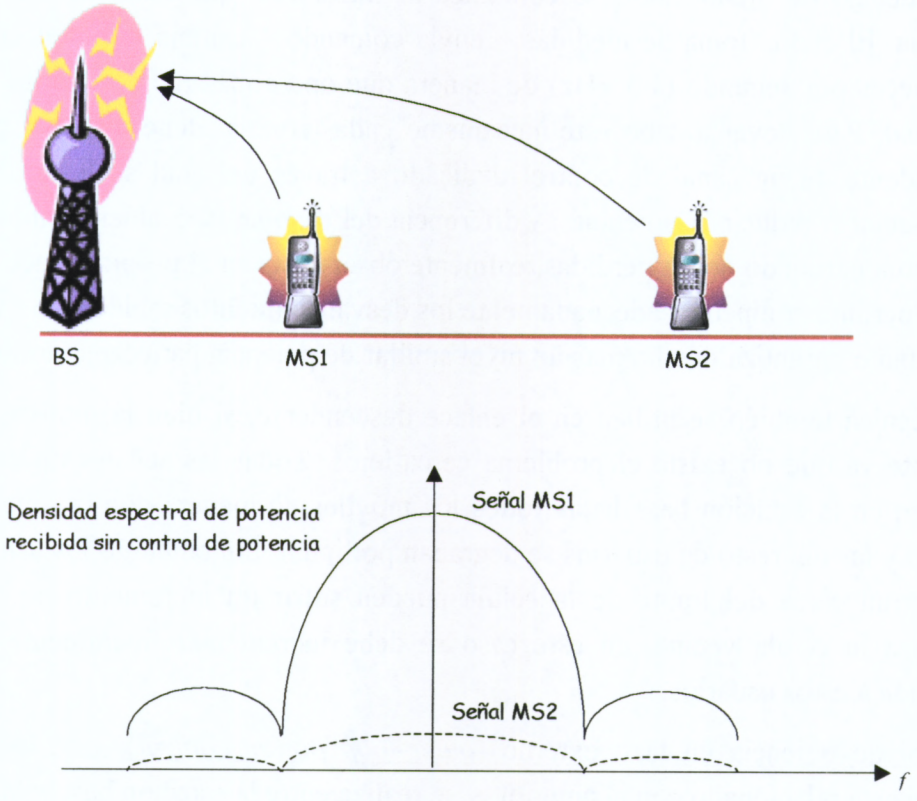

Figura 3-10. Efecto Cerca-Lejos ("Near-Far")

Para combatir este efecto los sistemas CDMA controlan la potencia que se transmite para garantizar que la potencia recibida de los distintos usuarios sea aproximadamente igual. Existen tres mecanismos para realizar el control de potencia [13]:

1. Control de potencia en lazo abierto (*open-loop power control*): los terminales estiman las pérdidas de propagación en el enlace ascendente midiendo la potencia recibida por una señal piloto enviada por la estación base con una potencia conocida. Este procedimiento resulta inexacto cuando se emplean diferentes frecuencias para uno y otro sentido, como en UTRA FDD, ya que las pérdidas de propagación no son iguales debido a la variación

rápida del canal originada por la propagación multicamino. La ventaja de esta técnica es que no es necesario que cada terminal disponga de un canal dedicado en el enlace descendente, sino que basta con un único canal común que transmita la señal piloto. Esta técnica únicamente permite compensar las variaciones lentas del canal, y se utiliza en UMTS para establecer el nivel de potencia cuando un terminal empieza una conexión.

2. Control de potencia en lazo cerrado (*fast closed-loop power control*): la estación base mide continuamente la relación Eb/No recibida en el enlace ascendente, la compara con el valor esperado (el objetivo o *target*) y, dependiendo de si el resultado está por encima o por debajo de dicho valor, se comunica al transmisor que disminuya o aumente la potencia. El ciclo "toma de medidas – envía comando – cambia la potencia" se realiza 1500 veces por segundo (1.5 kHz) de manera que opera más rápido que las variaciones del canal. Para llevar a cabo este mecanismo cada terminal debe disponer en el enlace descendente de un canal de control dedicado a través del cual se le notifica si debe incrementar o reducir la potencia. A diferencia del caso en lazo abierto, ahora el control se efectúa partiendo de las pérdidas realmente observadas en el propio enlace ascendente, lo que permite compensar adecuadamente los desvanecimientos rápidos del canal móvil y por lo tanto garantiza mucho más un nivel similar de potencia para cada terminal.

   Esta técnica también se utiliza en el enlace descendente, si bien la motivación aquí es diferente ya que no existe el problema cerca-lejos. Todas las señales de una célula se originan en la estación base hacia todos los móviles de manera que la señal del propio usuario y las del resto de usuarios se degradan por igual. Sin embargo los usuarios que se encuentran cerca del limite de la célula pueden sufrir un incremento de interferencia debido a la célula vecina, en este caso se debe incrementar ligeramente la potencia destinada a estos usuarios.

3. Control de potencia en lazo externo (*outer-loop power control*): este mecanismo de control está relacionado con el anterior, y se realiza entre la estación base y la entidad que la controla, el Radio Network Controller (RNC). Cuando la calidad del enlace radio empeora o mejora el RNC envía una orden a la estación base para cambiar la Eb/No *target*. Estos cambios en la calidad se deben a cambios de las condiciones de propagación por ejemplo que el móvil aumente su velocidad, y al aumento o decremento del número de usuarios.

La coexistencia de usuarios que trabajen con control de potencia en lazo abierto, esto es, los que acceden inicialmente, con otros usuarios que apliquen un control en lazo cerrado, que serán los que ya hayan logrado con anterioridad el acceso satisfactoriamente, será habitual en un sistema CDMA.