

CAPÍTULO 2

SISTEMAS OFDM. TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE. CDMA Y MC-CDMA

2.1 SISTEMAS OFDM

2.1.1 CONCEPTOS IMPORTANTES DE UN CANAL WIRELESS

Como es bien sabido, la propagación de señales vía radio no es tan suave como una transmisión con cable. El medio de propagación es el aire y la señal no sólo se ve afectada por ruido, sino además interferida por obstáculos materiales como edificios, coches,... Así, al receptor llega la señal enviada (rayo directo), seguida de múltiples réplicas distorsionadas en amplitud y fase. Esto se conoce como recepción *multipath* (multitrayecto). La figura 2.1 muestra un posible espectro de densidad de potencia de un canal multipath, así como la distribución de energía en cada frecuencia. Si se tratase de canal ideal, dicho espectro sería plano (flat fading), como el de la figura 2.2.

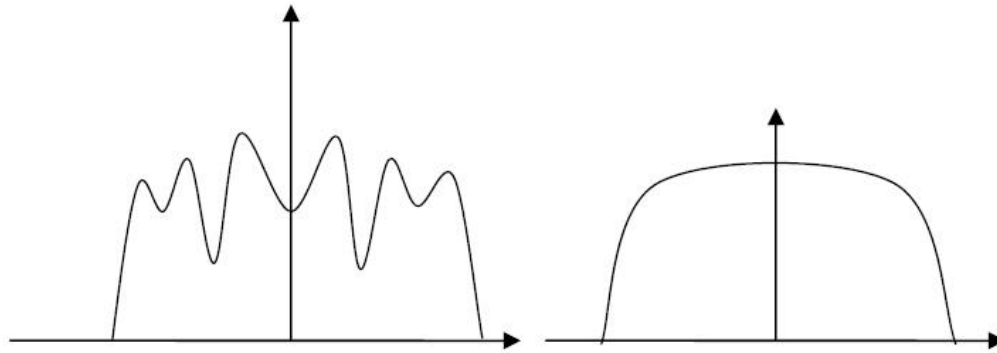


Figura 2.1. Canal selectivo en frecuencia

Figura 2.2. Canal flat fading

Algunos conceptos a tener en cuenta para la comprensión de las transmisiones inalámbricas son los siguientes:

- **Dispersión de retardo. ISI**

La estimación de un canal multipath, se obtiene mediante repetidas mediciones en un entorno de unas pocas longitudes de onda. Así tendremos el **Perfil de Retardo de Potencia** (PDP, *Power Delay Profile*). Es un promedio temporal o espacial de medidas consecutivas de respuestas al impulso recolectadas y promediadas sobre un área local. Los tiempos son dados respecto al rayo directo, cuyo momento de llegada se considera el instante 0.0. Se obtienen la **Dispersión de Retardo** (*Rms Delay Spread*) y el **Ancho de Banda de Coherencia** (*Coherence Bandwidth*).

Matemáticamente el PDP se define como la distribución en el tiempo de potencia recibida desde un cierto d (pulso transmitido a través del canal).

$$P(\tau) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k^2 \delta(t - \tau_k)$$

El *RMS Delay Spread* es una medida de cómo de dispersa resulta la respuesta al impulso del canal. Delay spread (t_{RMS}) caracteriza el retardo debido al canal en términos de momento de segundo orden del Perfil de Retardo de Potencia. Tiene en cuenta tanto la potencia relativa de los pulsos como también sus retardos, haciéndolo el mejor indicador de desempeño del sistema.

Si t_{RMS} es menor que el período de símbolo de la señal, el espectro del canal se mantiene aproximadamente plano en el ancho de banda de la señal. En este caso, no se produce Interferencia Intersímbolo (ISI). Es por tanto necesario evaluar estadísticamente el retardo de propagación para tener una indicación de la máxima velocidad de datos que puede ser utilizada de manera fiable en el canal en cuestión.

Los valores típicos son de microsegundos en comunicaciones al aire libre y del orden de nanosegundos en comunicaciones interiores.

Las Interferencias Intersímbolo (ISI) se producen cuando la señal recibida en un momento dado depende de la señal transmitida en ese instante pero también anterior o posteriormente. El problema es crítico cuando la dispersión de retardo es muy grande en comparación con el período de símbolo T_s ($t_{\text{RMS}} > T_s$). En concreto, en los canales actuales de banda ancha que proveen velocidades de datos muy altas, el período de símbolo deseado es a menudo mucho menor que el *Delay spread* y por tanto la interferencia intersímbolo es severa. El fin de la modulación OFDM será asegurar altas velocidades de datos haciendo que las interferencias intersímbolo afecten lo menos posible a la comunicación, al asegurar $t_{\text{RMS}} < T_s$.

? *Ancho de banda de coherencia*

B_c es una medida del rango de frecuencias sobre el cual el canal puede ser considerado plano, es decir, donde la atenuación del canal y el desplazamiento en fase permanecen aproximadamente constantes. Así, una señal con un ancho de banda (B_s) menor que el ancho de banda de coherencia (B_c) sufrirá una severa distorsión, puesto que el canal es selectivo en frecuencia y cada frecuencia se está viendo afectada por atenuaciones diferentes.

Por esta razón, en la práctica, modelos específicos de canal multitrayectoria de gran exactitud deben ser definidos para utilizarlos en el diseño y simulación de propagaciones inalámbricas.

• *Canal fading*

La potencia de la señal recibida cambia con el tiempo debido a fluctuaciones en la ganancia del canal causadas por efectos multipath. La distorsión en la ganancia puede ocasionar atenuaciones severas del espectro en frecuencia pudiendo llegar a convertirse en nulos en la misma.

Se considera que la transmisión se realiza con **flat fading** (característica deseable del canal) si el ancho de banda del canal es mayor que el ancho de banda de la señal a transmitir ($B_c > B_s$). En este caso la estructura del canal es tal que las características del espectro de la señal transmitida son preservadas en el receptor.

Si el ancho de banda del canal es menor que el ancho de banda de la señal a transmitir ($B_c < B_s$), hay desvanecimiento selectivo en frecuencia. Bajo estas condiciones la respuesta al impulso del canal tiene un *Delay Spread*

mayor que el período de símbolo, produciéndose Interferencia Intersímbolo (ISI).

En OFDM, dividiendo el ancho de banda de la señal en varios anchos de banda más pequeños, con cada subportadora es enviada una parte de la información. De esta forma, si hay pérdidas en una subportadora, es recuperable puesto que corresponde a una pequeña parte del código.

2.1.2. EL CONCEPTO DE TRANSMISIÓN MULTIPORTADORA

Consideremos un esquema de transmisión digital con modulación lineal de portadora [2] (como por ejemplo M -PSK o M -QAM) y una duración de símbolo denotada por T_s . Sea B el ancho de banda ocupado. Típicamente, B es del orden de T_s^{-1} , por ejemplo, $B = (1 + a)T_s^{-1}$ para pulsos de coseno alzado con un factor de rolloff a . Para un canal de transmisión con una dispersión de retardo t_m , una recepción libre de interferencia intersímbolo (ISI) es sólo posible si la condición $t_m \ll T_s$ se cumple. Como consecuencia, el posible régimen binario $R_b = \log_2(M)T_s^{-1}$ para un esquema de modulación con una única portadora está limitado por la dispersión de retardo del canal. La idea sencilla de transmisión multiportadora para vencer esta limitación es dividir el flujo de datos en K "subflujos" de menor tasa de datos y transmitirlos en *subportadoras* adyacentes. Esto se puede considerar como una transmisión en paralelo en el dominio de la frecuencia, y esto no afecta al ancho de banda total que es necesitado. Cada subportadora tiene un ancho de banda B/K , mientras que la duración de símbolo T_s es incrementada por un factor K , lo cual permite una tasa de datos K veces mayor para un retraso de

dispersión dado. El factor K , sin embargo, no puede ser incrementado arbitrariamente, porque duraciones de símbolo demasiado largas hacen a la transmisión demasiado sensible frente al tiempo de incoherencia del canal que es referida a la máxima frecuencia Doppler f_{\max} , teniéndose que cumplir la relación $f_{\max} T_s \ll 1$. Ambas condiciones pueden ser sólo válidas simultáneamente si el factor de coherencia $\beta = f_{\max} t_m$ cumple la condición $\beta \ll 1$. Para un factor β dado suficientemente pequeño, uno debería esperar que existe una duración de símbolo T_s que satisface ambos requisitos al mismo tiempo que nos da las mejores condiciones posibles de transmisión para ese canal. Podemos entonces elegir de una forma adecuada esta duración de símbolo óptima que sea apropiada para el canal y paralelamente el flujo de datos dado.

Cuando se realizan comunicaciones digitales, si el canal es paso banda, la señal de información debe ser generada en banda base y trasladada a continuación a la frecuencia del canal. Por tanto la señal se transmite empleando **una única portadora**. Este tipo de comunicaciones presenta el problema que ya ha sido introducido: las interferencias entre símbolos (ISI).

Al trabajar con un sistema con una única portadora, tendremos un ancho de banda de la señal grande, como muestra la figura 2.3. Si queremos una velocidad de transmisión elevada, implica un período de símbolo de la modulación muy pequeño. Y un período de símbolo pequeño hace que afecten las interferencias entre símbolos dado que se verificará $t_{\text{RMS}} > T_s$ que es la condición para que se produzcan.

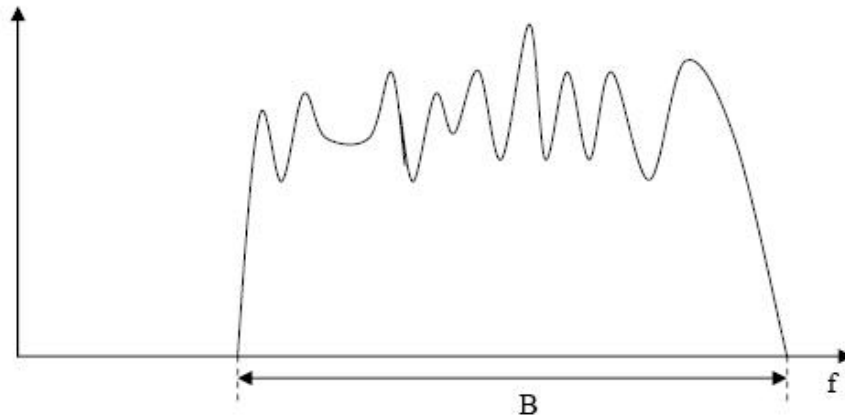


Figura 2.3. Espectro densidad de potencia de un sistema monoportadora.

Una propuesta alternativa para el diseño de un sistema de comunicación paso-banda eficiente en presencia de distorsión de canal, son los sistemas multiportadora. Se basan en la división del ancho de banda del canal B disponible en N subcanales con un mismo ancho de banda Δf menor, de forma que $B=N\Delta f$ (Ver figura 2.4). Así, el ancho de banda de cada subcanal es suficientemente estrecho para que se produzca flat fading independiente en cada uno de ellos. O lo que es lo mismo, ha aumentado el período de símbolo y se verifica $t_{RMS} < T_s$ que es la condición para que no se produzcan interferencias entre símbolos. Los datos son transmitidos mediante Multiplexión por División en Frecuencia (FDM). Respecto al régimen binario en sistemas multiportadora, éste no cambia puesto que es la suma de los regímenes binarios de cada subcanal.

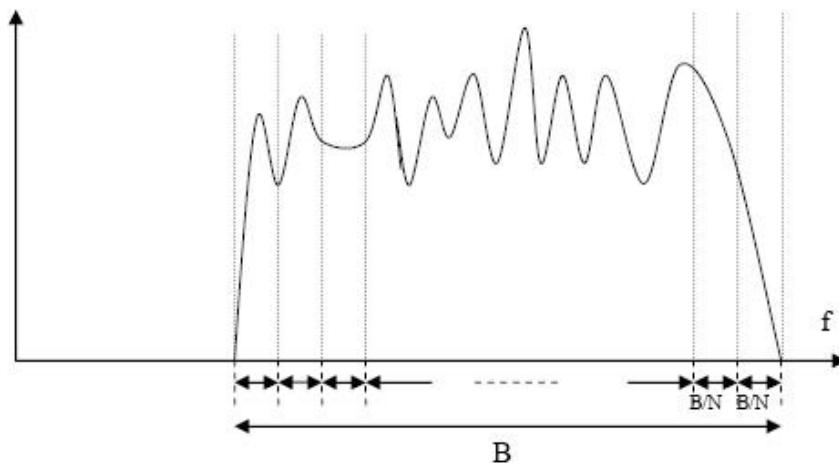


Figura 2.4. Espectro densidad de potencia de un sistema multiportadora.

Comparando las figuras 2.3 y 2.4, se observa la gran ventaja que supone la utilización de un sistema multiportadora. Es mucho más exacto al realizar una posterior ecualización del canal de transmisión, hacerlo para cada subcanal con ancho de banda B/N (que se mantiene aproximadamente constante), que en su totalidad B que incluye grandes atenuaciones debido a la selectividad en frecuencia del mismo.

La modulación OFDM tiene como fin fundamental adecuar los datos que se quieren transmitir a las características del canal empleado. Esta modulación es un sistema de comunicación en paralelo, es decir, los datos son transmitidos en el mismo instante de tiempo por N subportadoras, que se eligen particularmente, para que sean ortogonales entre sí, como veremos en el apartado siguiente.

2.1.3. PRINCIPIOS DE OFDM: SOLUCIÓN AL MULTITRAYECTO

Como ya se ha explicado en apartados anteriores, una de las características fundamentales de las comunicaciones radio en enlaces terrestres es el de la propagación multitrayecto. Este tipo de propagación consiste en que entre el transmisor y receptor existe más de un camino de propagación, ya que la señal radio que se propaga no es un rayo estrecho que va directamente de la antena transmisora a la receptora, sino un frente de onda amplio que se va difractando y reflejando a medida que encuentra obstáculos en su camino, como edificios altos o irregularidades del terreno. El estudio y modelado del fenómeno de la propagación multitrayecto se puede encontrar en múltiples referencias bibliográficas, y se puede resumir diciendo que al receptor llegan varias réplicas de la misma señal, con diferentes retardos entre ellas. Las primeras, tres o cuatro (dependiendo del entorno), pueden contener valores significativos de energía, mientras que las restantes suelen llegar muy atenuadas y se pueden despreciar. Se plantean dos escenarios posibles en función del valor máximo del retardo diferencial entre las réplicas significativas (requiriendo cada escenario un receptor diferente), los cuales tienen lugar cuando:

1. *El retardo diferencial máximo no supera en dos o tres veces el periodo de símbolo de modulación*, que es el caso que se plantea en GSM. Con una velocidad de modulación de 270,83 kbit/s y un periodo de símbolo de 3,7 μ s, el retardo entre los diferentes trayectos no suele ser superior a 10 μ s. Por cada símbolo transmitido, la señal temporal que se obtiene a la salida del demodulador del receptor es un pulso muy distorsionado, que interfiere de forma significativa a los pulsos adyacentes. Para devolver el pulso a su forma original en el receptor se requiere un ecualizador, tanto más complejo cuanto

mayor sea el cociente entre el retardo diferencial máximo y la anchura de símbolo. En GSM el ecualizador es un filtro FIR de siete coeficientes que se suele implementar mediante un algoritmo de Viterbi.

2. *El retardo diferencial es mucho mayor que el periodo de símbolo.* En este caso, a la salida del demodulador lo que se obtiene no es un pulso, sino varios pulsos independientes, cada uno de ellos correspondiente a una réplica. Se puede considerar que la señal transmitida se ha “roto” en varias réplicas iguales, las cuales se encuentran bien separadas entre ellas. Este es el caso que se plantea en UMTS, donde el periodo de chip es $0,26 \mu\text{s}$, y los retardos diferenciales son de varios microsegundos. Para reconstruir la señal lo que se emplea es un receptor conocido como de tipo Rake, que alinea en el tiempo las diferentes réplicas y las suma en fase.

A medida que se aumenta el ancho de banda de transmisión el periodo de símbolo disminuye, y llega un momento en que la complejidad del receptor Rake se vuelve excesiva, siendo más ventajoso desde un punto de vista de implementación utilizar otro sistema de modulación, la multiplexación por división ortogonal en frecuencia, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Este sistema de modulación consiste en enviar la información no sobre una única portadora, sino sobre un múltiplex de muchas portadoras “adecuadamente espaciadas” en frecuencia, repartiendo la información entre todas ellas, de forma que aunque la velocidad de modulación del conjunto sea muy elevada, la de cada portadora individual es pequeña, simplificando el problema de propagación multitrayecto. Lo que diferencia al OFDM de otros procedimientos de multiplexación en frecuencia es la ortogonalidad, pues el “espaciamiento adecuado” entre portadoras es un espaciamiento óptimo. Este espaciamiento consiste en que la separación espectral entre portadoras

consecutivas es siempre la misma e igual al inverso del periodo de símbolo, de forma que la señal OFDM se puede expresar, en notación compleja, como:

$$s(t) = \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_i \cdot \exp\left[j2\pi \left(f_c + \frac{i}{T}\right)t\right]$$

Donde:

- ? f_c es la frecuencia central.
- ? T es el periodo de símbolo.
- ? d_i es el símbolo que lleva la información en su amplitud y fase.
- ? $s(t)$ es la señal OFDM en el tiempo.

Al sistema de modulación se le denomina ortogonal porque en el proceso de demodulación las portadoras no se interfieren entre sí. Este proceso se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\int_0^T s(t) \cdot \exp\left[-j2\pi \left(f_c + \frac{k}{T}\right)t\right] dt = d_k \cdot T$$

En la Figura 2.5 se muestra una representación de tres portadoras ortogonales. Viendo una señal OFDM en el tiempo se aprecia que en el periodo de la portadora más baja caben varios periodos de las otras portadoras, alineadas todas en fase, mientras que en la representación espectral el máximo de cada portadora coincide con un nulo de las demás.

En principio, podría parecer que modular y demodular una señal OFDM requeriría tantas cadenas transmisoras y receptoras como portadoras tuviese el múltiplex. Si esto fuese así, el sistema sería inviable, pues un múltiplex de decenas o centenares de portadoras implicaría equipos terminales con decenas o centenares de cadenas transceptoras. Afortunadamente, sólo se requiere una cadena en cada sentido de transmisión, que modula o demodula todas las

portadoras a la vez. Si se examina la ecuación de $s(t)$, se comprueba que una señal OFDM es la transformada inversa de Fourier de los coeficientes d_i , y, en consecuencia, los coeficientes son la transformada directa de $s(t)$. Por consiguiente, la acción de modular y demodular todas las portadoras a la vez de una señal OFDM consiste básicamente en aplicar los algoritmos de la transformada rápida de Fourier, muy conocidos y fáciles de implementar en los procesadores digitales.

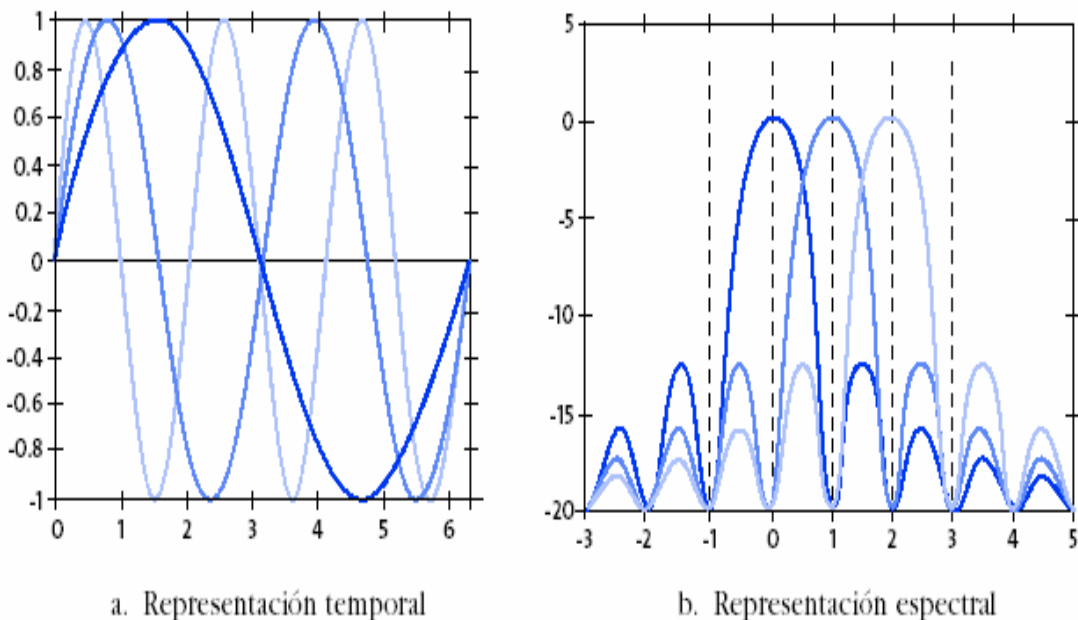


Figura 2.5. Representación temporal y espectral de una señal OFDM.

La ortogonalidad también proporciona otra ventaja añadida: un mecanismo para eliminar, o reducir tanto como se quiera, el problema de la interferencia por propagación multitrayecto. Este mecanismo consiste en ampliar la duración correspondiente al periodo símbolo mediante un tiempo de guarda superior al máximo retardo diferencial entre los trayectos significativos. Durante la ampliación temporal se repite, o amplía, parte del

propio símbolo, por lo cual se conoce a la ampliación como extensión cíclica. La justificación de por qué esta extensión elimina el problema de la propagación multitrayecto, junto con las consideraciones adicionales, se puede consultar en determinadas publicaciones específicas de OFDM.

En lo que se refiere a la modulación de las portadoras, el símbolo d_i de la ecuación de $s(t)$, en un múltiplex OFDM cada portadora se modula con una información diferente, aunque, por facilidad de implementación, el sistema de modulación suele ser el mismo para todas ellas, como QPSK o n2-QAM. Además, se suelen reservar algunas portadoras para transmitir información de sincronismo y ecualización espectral, o bien para establecer canales de servicio. Tal es el caso, por ejemplo, del estándar de distribución de vídeo digital DVB, modo 8k, donde el número de portadoras es 6.817, el periodo de símbolo 896 ms y el tiempo de guarda es ajustable entre 28 y 224 μ s, mientras que la modulación de las portadoras puede ser 16-QAM o 64-QAM. En el estándar WLAN IEEE 802.11a hay 48 portadoras de datos y cuatro de servicio, los periodos de símbolo y guarda son 4 y 0,8 μ s, respectivamente, y la modulación puede ser BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM.

Para concluir, conviene mencionar que OFDM se utiliza también en aplicaciones diferentes de las comunicaciones radio. En ADSL, por ejemplo, se le conoce como DMT (*Discrete Multitone*). Como se ha mencionado anteriormente, se emplea ya en los sistemas de distribución de vídeo digital y en las redes WLAN inalámbricas, y es el principal candidato para ser el sistema de multiplexación en las propuestas de sistemas futuros de comunicaciones móviles, en combinación con algún mecanismo de multiplexación de código.

2.1.4. MODELO DE SISTEMAS OFDM

Consideraremos el modelo genérico de sistemas OFDM de manera discreta en el tiempo. El esquema que se muestra a continuación en la figura 2.6, realiza la transmisión de símbolos provenientes de una fuente aleatoria.

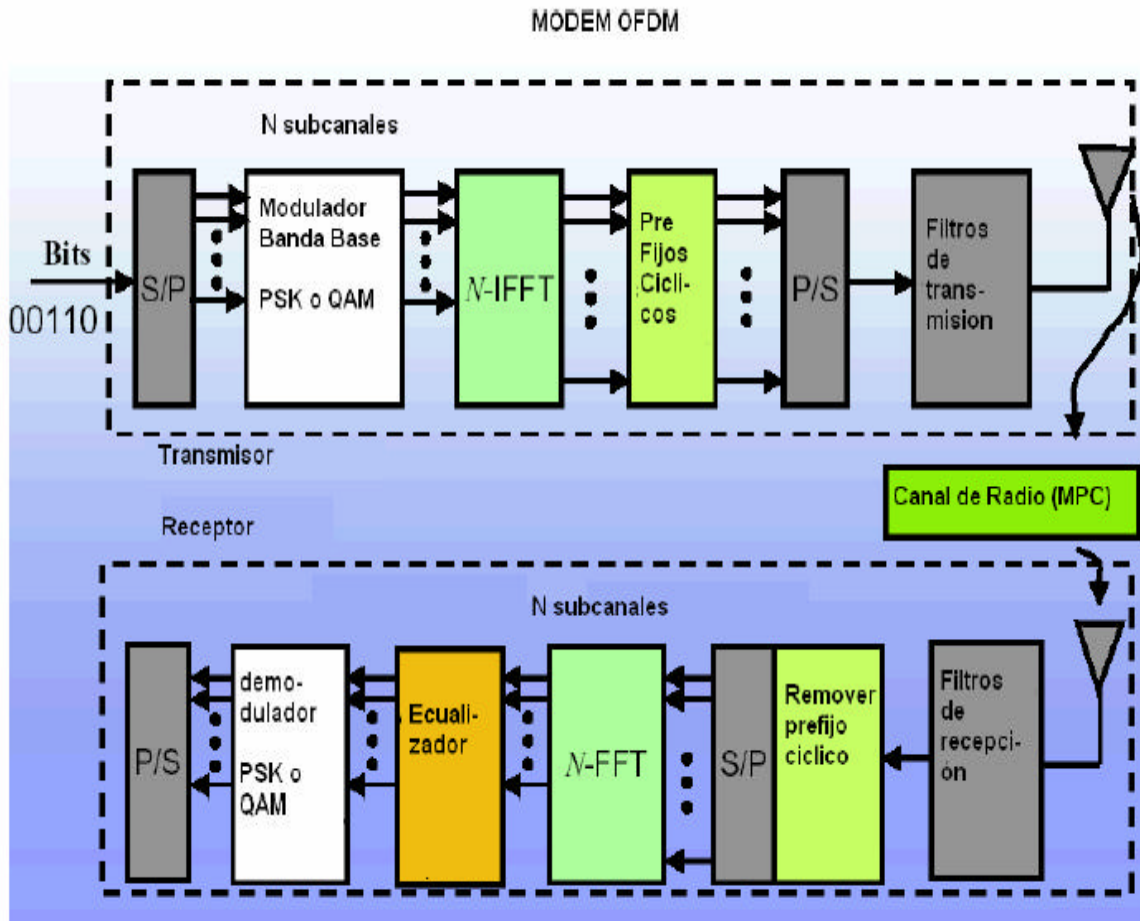


Figura 2.6. Modelo genérico de un sistema OFDM.

En la figura 2.6, se propone el esquema de transmisión OFDM. Cada símbolo OFDM estará formado por N símbolos procedentes del mapeo si se

realiza la transformada N-IFFT, es decir, trabajamos con N subportadoras y un Prefijo Cíclico de longitud L_{cp} .

Los símbolos de datos son organizados en el codificador de forma paralela en N subtramas distintas. Cada subtrama será mapeada (M-PSK o M-QAM) teniendo a la salida N números complejos pertenecientes a una constelación M-aria. Cada señal modulará una subportadora de entre las N posibles en el bloque de modulación IFFT, que será realmente el símbolo OFDM. Así se genera una señal mapeada en una constelación m-aria, modulada empleando la transformada IFFT y con un Prefijo Cíclico añadido.

Una de las mayores ventajas de OFDM es su eficiencia atajando los efectos de retardos del canal multitrayectoria. En la mayoría de aplicaciones de OFDM, se inserta un intervalo de guarda entre los símbolos OFDM para prevenir las interferencias intersímbolo (ISI). Este intervalo de guarda se elige con duración mayor que el máximo retardo de entre todas las subportadoras de forma que las componentes debidas al retardo de un símbolo no interfieran en el siguiente. Consiste normalmente en una ristra de ceros.

Sin embargo, en ese caso, mientras que ISI no afecta, la interferencia interportadora (ICI) puede causar la pérdida de ortogonalidad entre subportadoras. Para anticiparnos al problema ICI, normalmente el símbolo OFDM se extiende cíclicamente en el intervalo de guarda. Así, cualquier réplica directa o retrasada de la señal continuará teniendo un número entero de ciclos. Esto asegura la ortogonalidad de los distintos subcanales siempre que el retardo sea menor al intervalo de guarda elegido.

La extensión cíclica (CE) se implementa como un prefijo cíclico (CP) como se muestra en la figura 2.7 del símbolo OFDM extendido.

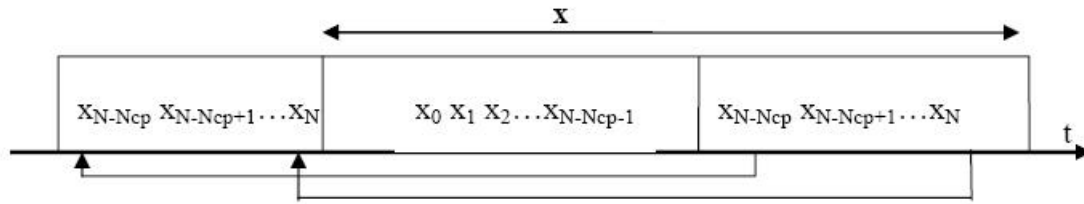


Figura 2.7. Símbolo OFDM tras la introducción del Prefijo Cíclico.

Se define la duración del CP (en número de muestras) por el entero N_{cp} , que debe ser mayor que la longitud de la respuesta al impulso del canal para evitar efectivamente ISI e ICI. Se copian y pegan al principio los N_{cp} últimos bits del símbolo: $x(-1)=x(N-1)$; $x(-2)=x(N-2)$; $x(-N_{cp})=x(N-N_{cp})$.

Cualquier tipo de transmisión empleando un canal no ideal (como un canal radio multipath), hará que se expanda el símbolo OFDM pudiendo solaparse unos bloques de datos con otros. El Prefijo Cíclico (CP) se inserta para evitar interferencias ISI (entre símbolos), ICI (entre portadoras) y preservar la ortogonalidad entre los tonos.

A los efectos de mantener esta ortogonalidad aún en los casos en que la señal pasa a través de canales dispersivos en el tiempo se agrega este prefijo cíclico (CP). Si bien hay sistemas OFDM que no usan este prefijo cíclico, dada la gran mejoría que introduce su uso (evita interferencia intersimbólica (ISI) e interferencia interportadora (ICI)), nos concentraremos en sistemas que usan este prefijo cíclico. El CP no es otra cosa que la última parte del símbolo OFDM “prepegado” antes de este, es decir que una copia de la última parte del símbolo OFDM se estaría transmitiendo antes de la transmisión del símbolo. Esto hace a la señal “periódica” lo cual juega un papel decisivo para evitar la ISI y la ICI. Lo que sucede es que el CP al jugar un papel de espacio de guarda evita la ISI y al mantener la ortogonalidad entre las subportadoras evita la ICI. Dado que en el receptor el prefijo cíclico es suprimido y que este

contiene toda la ISI del símbolo previo, la muestra de salida del banco de filtros del receptor no contendrá ISI. Cabe mencionar que el CP introduce una pérdida en la relación señal a ruido (SNR), pero esto es un precio aceptable a pagar para mitigar las interferencias ISI e ICI.

La energía que se debe transmitir incrementa con la longitud del prefijo cíclico. La pérdida en SNR debida a la inserción del CP es:

$$SNR_{loss} = -10 \log_{10} \left(1 - \frac{N_{cp}}{N_T} \right)$$

donde N_{cp} es la longitud del prefijo cíclico y $N_T = N_{cp} + N$, siendo N la longitud de un símbolo OFDM.

Los símbolos OFDM con el Prefijo Cíclico ya añadido serán transmitidos por un canal radio digital que consideraremos LTI (sistema lineal invariante en el tiempo).

En el receptor, se realiza el proceso inverso: los datos son convertidos en serie de nuevo y se descarta el Prefijo Cíclico. Se utiliza un ecualizador en frecuencia para dar mayor fiabilidad a la estimación de los símbolos. El resultado es una estimación óptima de la información transmitida.

Esta aplicación da como resultado el denominado sistema CP-OFDM, y se basa en la relación entre la convolución lineal y circular empleando un prefijo cíclico así como en las propiedades de la DFT de una convolución circular.

2.1.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE UN SISTEMA OFDM.

Se ha visto que CP-OFDM es un sistema de transmisión multiportadora con una estructura muy simple gracias al uso de las matrices IFFT y FFT. Además los símbolos se reciben libres de IBI y de ICI gracias al empleo de un prefijo cíclico. Sin embargo, no todo es ideal en este sistema, y existen ciertos inconvenientes que debemos considerar [3].

? **Ventajas:**

- Elevada **eficiencia espectral** al utilizar múltiples portadoras que pueden ser ubicadas en un ancho de banda muy reducido permitiendo así transmitir elevadas tasas de información por segundo y por ancho de banda.
- **Resistencia ante interferencias multitrayecto:** si un determinado rango de frecuencias sufre interferencias severas, dicho rango puede ser deshabilitado para la transmisión.
- Así mismo, las **velocidades** superior e inferior **pueden variar** según el empleo de más o menos portadoras en función del propósito de la comunicación.
- **Eliminación** de Interferencias Interportadora (**ICI**) e Intersímbolo (**ISI**) al introducir el Prefijo Cíclico (CP).
- Al emplear una **estructura** IDFT / DFT, hace que ésta sea muy **repetitiva**. Es decir, se prefiere a la complejidad requerida por los filtros cuando se trabaja con sistemas de portadora única.

? **Inconvenientes:**

- La **necesidad de establecer intervalos de guarda** para garantizar la ortogonalidad de las portadoras da lugar a un coste de energía añadido, empeorando así el rendimiento. En los sistemas OFDM, el uso de un periodo de guarda supone una reducción de la tasa de símbolos efectiva. En el caso concreto de CP-OFDM, durante el periodo de guarda se transmiten los símbolos de prefijo cíclico. Esos símbolos se descartan en el receptor para eliminar la IBI y por tanto, además de suponer una reducción de la tasa de símbolos efectiva, suponen un gasto de potencia de transmisión. La reducción en la relación señal a ruido será tanto mayor cuanto más largo sea el prefijo cíclico:

$$SNR_{loss} = 10 \log_{10} \left(\frac{N}{N+L} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{N}{M} \right).$$

En general, la longitud relativa L/N del prefijo no es demasiado grande, y las ventajas de una transmisión libre de IBI e ICI son superiores a una reducción en la relación señal a ruido (SNR) limitada.

- **La existencia de nulos en la respuesta en frecuencia del canal** es uno de los principales inconvenientes del uso del prefijo cíclico. Si la respuesta en frecuencia del canal

$$\tilde{\mathbf{h}} = [H(0) \ H(2\pi/M) \ \cdots \ H(2\pi(M-1)/M)]^T = \sqrt{N} \mathbf{D}_N [h(0) \ \cdots \ h(L) \ 0 \ \cdots \ 0]^T$$

tiene un cero en uno de sus elementos $H(2pk/M)$, los símbolos

transmitidos por el correspondiente subcanal k no podrán ser recuperados.

- **Efectos no lineales en los amplificadores de potencia.** Uno de los principales problemas de los sistemas multiportadora es que la señal transmitida no tiene una amplitud constante. En efecto, en un sistema OFDM, la razón entre el valor máximo y el valor medio de la potencia de los símbolos transmitidos puede ser bastante grande. Esta razón, que recibe el nombre de PAR (*peak to average ratio*), es una medida del rango dinámico que tiene la señal a transmitir y determina si el amplificador de potencia puede funcionar o no en su región lineal. Si la PAR es muy elevada, es difícil que la zona lineal del amplificador sea lo suficientemente grande como para cubrir todo el rango dinámico de la señal, de manera que se puede producir distorsión lineal.

- **Problemas de sincronización.** Uno de los argumentos en contra de los sistemas OFDM es su alta sensibilidad a los errores de sincronización. Estos errores pueden deberse a problemas de sincronización de símbolo y de sincronización de la frecuencia de portadora.

Respecto a la sincronización de los símbolos, las secuencias de bits de entrada son agrupadas en símbolos. A continuación convertidas en formas de onda y enviadas a través del canal físico. Estas señales transmitidas llevan asociados parámetros de referencia temporal, en frecuencia y en fase para detectar símbolo a símbolo la señal transmitida. Para una recepción correcta en el detector, se requieren dichos parámetros. En el receptor, se procesa la forma de onda

recibida y se identifican los límites de cada símbolo OFDM. Si no es así, se produce interferencia entre símbolos. Existen principalmente dos métodos para la sincronización temporal, los basados en señales piloto y los basados en el prefijo cíclico.

Respecto a la sincronización de la frecuencia de la portadora, las posibles desviaciones se pueden deber a las diferencias entre los osciladores del transmisor y receptor, a efectos Doppler o a ruido de fase introducido por canales no lineales. El offset en frecuencia es un factor crítico en el diseño de un sistema OFDM. Puede verse como errores en los instantes en que es muestreada en frecuencia la señal durante la demodulación en el bloque DFT. Tiene dos consecuencias fundamentales que se muestran en la figura 2.8, en la cual se aprecia cómo la amplitud de la subportadora se reduce (dado que las senoides no se muestrean en su máximo) y aparecen interferencias ICI con las subportadoras adyacentes debido a la pérdida de ortogonalidad.

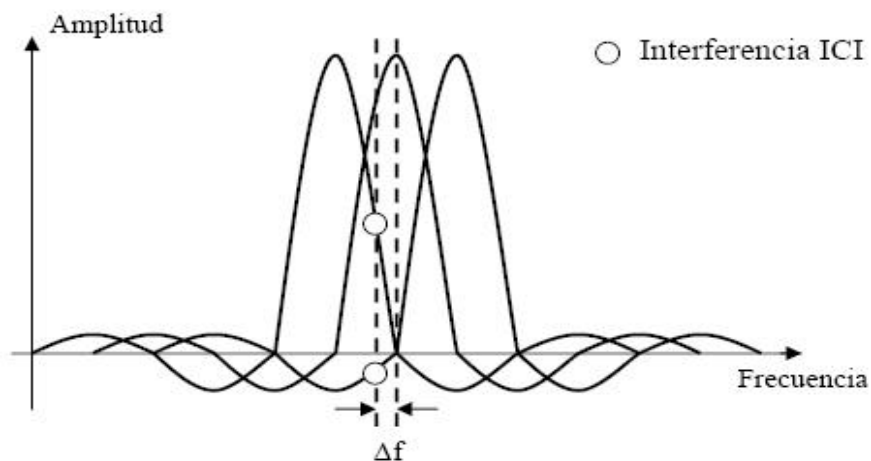


Figura 2.8. Espectro en frecuencia de tres subportadoras individuales donde se muestra el efecto de offset en frecuencia.

Es interesante resaltar la relación entre la sincronización temporal y en frecuencia. La sincronización frecuencial puede simplificarse disminuyendo el número de subcanales que se utilizan en el sistema OFDM, aumentando el espacio entre ellos. Esto dificulta la sincronización temporal dado que al disminuir N , disminuye también la longitud de los símbolos, como ya se explicó en el apartado 2.1.2.

2.2 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE. CDMA Y MC-CDMA.

2.2.1 INTRODUCCIÓN

La idea de usar un canal de comunicación que permita el envío de información simultánea por parte de varios transmisores procede del *dúplex*, revolucionario sistema que inventó Thomas A. Edison en 1873. Tal sistema permitió en aquella época la transmisión simultánea de dos mensajes telegráficos en la misma dirección a través del mismo cable. Hoy en día existen numerosos ejemplos de comunicaciones en las que se utiliza el acceso múltiple, es decir, en las que varios transmisores comparten un canal común. Como ejemplo podemos citar entre algunos de ellos: teléfonos móviles transmitiendo hacia una estación base, estaciones terrenas comunicándose con un satélite, un bus con múltiples conexiones, redes de área local, redes *wireless*, redes de televisión por cable interactivas, etc.

Las técnicas de multiacceso son necesarias en comunicaciones móviles para que los escasos y onerosos recursos radioeléctricos de la interfaz radio puedan ser compartidos por parte de un conjunto de usuarios. Se denomina *canal físico* a la facilidad concedida a un usuario mediante la cual dicho

usuario puede acceder al sistema. Dicho esto, podemos afirmar que las técnicas de acceso múltiple son procedimientos de asignación de canales físicos a las estaciones.

En general, las técnicas de multiacceso están asociadas con los métodos de modulación utilizados y con la naturaleza analógica o digital de la información a transmitir.

Hay tres métodos básicos de multiacceso:

- ? FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), acceso múltiple por división de frecuencia.
- ? TDMA (*Time Division Multiple Access*), acceso múltiple por división de tiempo.
- ? CDMA (*Code Division Multiple Access*), acceso múltiple por división de código.

Además, cabe destacar la existencia de métodos híbridos, como por ejemplo TDMA / FDMA, que se suelen emplear en los sistemas móviles.

En los siguientes apartados del capítulo desarrollaremos cada una de las técnicas de multiacceso. Además, desarrollaremos de forma especial todo lo relacionado con CDMA, citando sus orígenes, aplicaciones, ventajas, inconvenientes, ...

2.2.2 ACCESO MÚLTIPLE FDMA.

El método FDMA se basa en la separación en frecuencias del volumen espectral. La anchura de banda disponible se divide en radiocanales, de conformidad con un paso de canalización Δf . Cada radiocanal se asigna a un usuario en la interfaz radio. Las asignaciones son de banda estrecha del tipo un solo canal por portadora (SCPC, *single channel per carrier*). Los usuarios,

cada uno en su radiocanal, pueden efectuar transmisiones simultáneas e ininterrumpidas en las diferentes frecuencias. Cada receptor o grupo de receptores selecciona, mediante un filtro sintonizable, el radiocanal deseado.

En la Figura 2.9, hemos representado un ejemplo con un sistema FDMA con tres radiocanales en el que se realiza una recepción en el radiocanal 2.

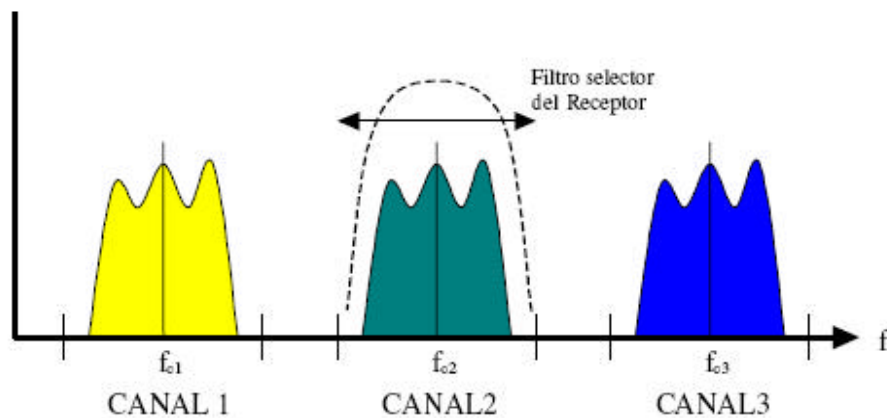


Figura 2.9. Sistema FDMA con tres radiocanales

El multiacceso FDMA utiliza habitualmente la modulación de frecuencia analógica para señales analógicas y variantes de modulación de frecuencia digital para señales digitales.

Podemos resumir las características básicas de esta modalidad de acceso múltiple:

? Características positivas:

1. Es compatible con modulaciones y señales analógicas y digitales.
2. La tecnología es madura y experimentada.
3. Ofrece sencillez en la realización de equipos y en la explotación.
4. Posee resistencia a las perturbaciones en su variante de banda estrecha.

5. Es la modalidad adecuada para sistemas de baja y mediana capacidad de tráfico.

? Características negativas:

1. La complejidad de las estaciones base multicanales en las que son necesarias un equipo transceptor por cada radiocanal, más elementos adicionales como combinadores, multiacopladores de antena, etc.
2. La escasa versatilidad que ofrece para acomodar distintas aplicaciones o flujos de tráfico.
3. La existencia de dificultades para la inserción de la señalización asociada a la llamada.
4. Las limitaciones que encuentran para mejorar la calidad de la voz.

Teniendo en cuenta todo esto, es lógico que la tendencia actual en las comunicaciones móviles sea hacia el abandono del multiacceso FDMA analógico.

2.2.3 ACCESO MÚLTIPLE TDMA.

En la técnica TDMA se asigna a los usuarios una misma frecuencia durante breves intervalos de tiempo, de forma periódica, de manera que dichos usuarios efectúan transmisiones simultáneas pero discontinuas en esa frecuencia de portadora mediante ráfagas o paquetes de información.

Por otro lado, el sistema dispone de mecanismos de direccionamiento y sincronización de forma que cada receptor extrae del flujo de señal únicamente las ráfagas destinadas al mismo e ignora las demás.

En TDMA la transmisión se organiza en tramas de duración T_t . Una trama es una sucesión de N_s intervalos, cada uno de los cuales se asigna a un terminal. La duración de un intervalo es, por tanto, $IT = T_t / N_s$, tiempo en el cual el terminal efectúa su acceso y en el que dispone de todo el recurso de ancho de banda del sistema radioeléctrico. Todo terminal transmite en el tiempo IT la información de tráfico recopilada durante una trama más otras señales auxiliares, en un proceso de almacenamiento y envío. La información se transmite en forma de un tren de bits llamado *ráfaga (burst)*. Debido a su propia naturaleza, el uso de TDMA únicamente es posible con señales digitales en su origen o con señales analógicas que previamente hayan sufrido un proceso de digitalización.

En la Figura 2.10, se ilustran los conceptos asociados a este tipo de acceso múltiple. En el enlace ascendente llegan a la estación base BS (*Base Station*) las ráfagas 1, 2, 3, ... procedentes de los terminales o estaciones móviles MS (*Mobile Station*), en tramas sucesivas. Las ráfagas no suelen ser estrictamente contiguas aunque se hayan emitido con sincronización pues proceden de terminales situados a diferentes distancias de la estación base BS. Entre ellas puede haber pequeños intervalos o ligeros solapes. Este tipo de llegadas individuales constituye el TDMA básico, característico del enlace ascendente, y en el cual, cada terminal realiza su emisión modulando digitalmente una portadora con los bits de la ráfaga.

En el enlace descendente, la información que transmite la estación base BS se organiza también en una trama pero con intervalos consecutivos en forma de *múltiple temporal TDM (Time Division Multiplex)* con sus ráfagas de bits. Esta señal TDM modula la portadora del enlace descendente y se radia

en difusión a todos los terminales. A continuación, cada terminal extraerá la información del intervalo que tenga asignado, una vez por ráfaga.

Como podemos observar, en el enlace ascendente se produce un proceso de concentración de intervalos hacia la estación base BS, mientras que en el enlace descendente se produce un fenómeno de difusión hacia las estaciones móviles MS.

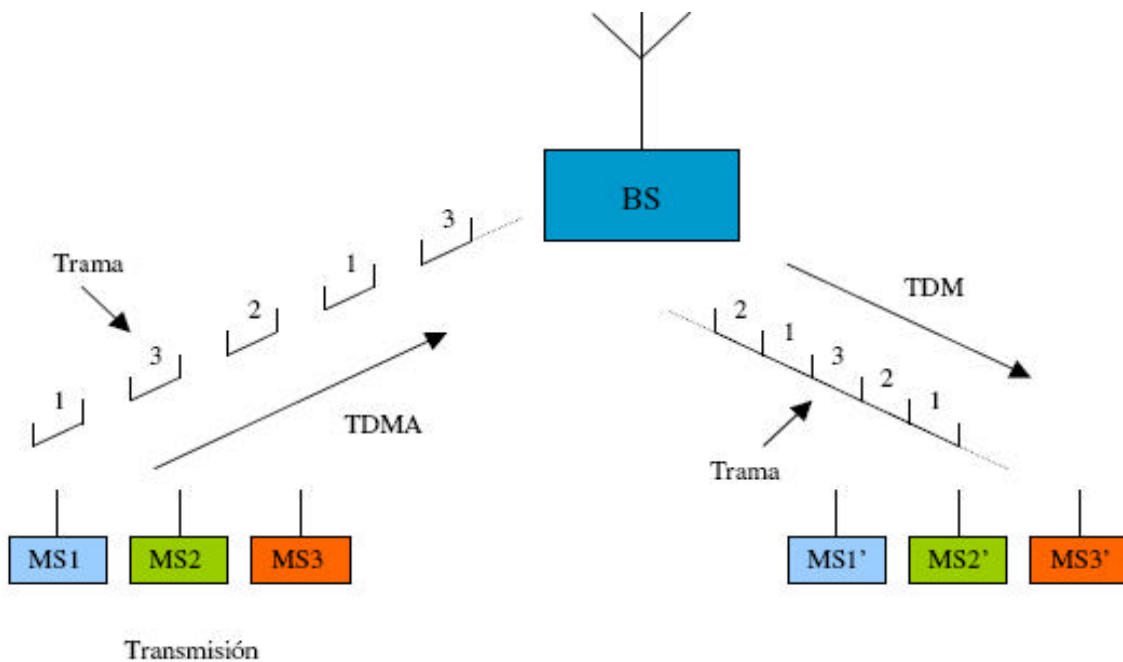


Figura 2.10. Ejemplo de sistema TDMA.

En TDMA conviene definir una serie de conceptos básicos que se detallan a continuación :

- ? Trama (*Frame*): Ciclo de acceso de los N_s usuarios a los recursos compartidos.
- ? Periodo de trama (T_t): Duración temporal de la trama.
- ? Intervalo de tiempo (*Slot o IT*): Duración de la ventana de acceso de cada usuario al sistema.

- ? Ráfaga (*Burst*): Secuencia de bits transmitida o recibida en un intervalo de tiempo.
- ? Velocidad media o de escritura: Número de bits por usuario en el periodo de trama dividido por el valor del periodo.
- ? Velocidad instantánea o de lectura: Velocidad de transmisión de la información en un periodo de tiempo.

En la Figura 2.11 hemos representado una trama y una ráfaga que nos van a ayudar a definir una serie de parámetros típicos de TDMA:

- a) Periodo de trama: T_t .
- b) Número de intervalos por trama: N_s .
- c) Número de bits de información por intervalo: B_i

$$B_i = V_c \cdot T_t. \quad (2.2.1)$$

siendo V_c la velocidad del codificador de fuente (bits).

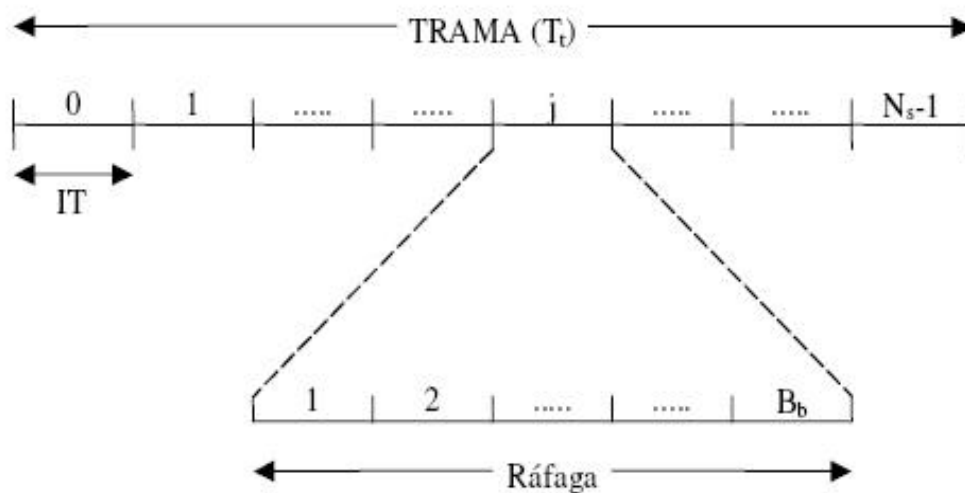


Figura 2.11. Estructura de una trama TDMA.

d) Número de bits de *tara* (*overhead*) por intervalo: B_o . Este valor se descompone de la siguiente forma:

$$B_o = B_{fa} + B_{co} + B_g \quad (2.2.2)$$

B_{fa} : Bits de formato de acceso para TDMA.

B_{co} : Bits de codificación de canal.

B_g : Bits de guarda.

e) Número de bits por intervalo: B_b .

$$B_b = B_i + B_o \quad (2.2.3)$$

f) Rendimiento de la trama: η .

$$\eta (\%) = 100 (B_i / B_b) \quad (2.2.4)$$

g) Velocidad media: V_m .

$$V_m = (B_b / T_t) \text{ (bits/s)} \quad (2.2.5)$$

h) Velocidad instantánea: V_i .

$$V_i = B_b \cdot N_s / T_t = V_m \cdot N_s = (V_c + B_o / T_t) \cdot N_s \quad (2.2.6)$$

i) Factor de compresión temporal: F_{ct} .

$$F_{ct} = V_i / V_m = N_s \quad (2.2.7)$$

De (2.2.6) se desprende que todo aumento de capacidad de TDMA (es decir, un número de usuarios mayor) supone un incremento proporcional de la velocidad instantánea y, por lo tanto, de la anchura de banda necesaria para la transmisión de la portadora TDMA. Como con receptores convencionales las perturbaciones de los canales de propagación de banda ancha son de una

costosa compensación, suele existir un límite para el número de canales o intervalos N_s que puede sustentar una portadora TDMA. Un valor límite suele ser $N_s = 10$. Para sistemas de mayor capacidad se utilizan varias portadoras TDMA distintas constituyéndose de este modo un sistema de multiacceso mixto TDMA / FDMA, en el que cada radiocanal proporciona N_s canales.

Si se dispone de R radiocanales, la capacidad potencial será $R \cdot N_s$ canales. En este caso, cada canal físico asignado a un terminal consiste en un radiocanal y un intervalo de tiempo.

El empleo de frecuencias diferentes para los enlaces ascendente y descendente asegura que los terminales funcionen en dúplex. Hay una variante de TDMA, denominada dúplex por división de tiempo TDD (*Time Division Duplex*) que permite el funcionamiento dúplex con una sola frecuencia portadora. Para ello basta que no coincidan en el tiempo los intervalos de transmisión y de recepción de un terminal. Esto se consigue organizando convenientemente la trama. Para ello se divide la trama en $2N$ intervalos $1, 2, \dots, N$ y $1', 2', \dots, N'$ y se asigna un par de intervalos a cada terminal, por ejemplo el I para transmisión y el I' para recepción.

El mecanismo de acceso múltiple TDMA se utiliza asociado con modulaciones digitales de frecuencia y fase.

Vamos a detallar las características que presenta el multiacceso TDMA diferenciándolas para su mejor comprensión en dos bloques :

? Características positivas:

1. Simplificación de las estaciones base multicanales. Un único transceptor proporciona N_s canales.
2. Elevada versatilidad. Pueden acomodarse los intervalos a las necesidades de los usuarios asignando por ejemplo más de un

intervalo a terminales que deban transmitir más información o a mayor velocidad.

3. Facilidad de la señalización asociada a una comunicación, pues puede insertarse en campos de bits dentro de la ráfaga o en intervalos específicos dentro de la trama sin alterar la estructura de TDMA.
4. Idoneidad para media /alta capacidad de tráfico derivada de su buen rendimiento espectral.
5. Posibilidad de transmisión dúplex con una sola frecuencia (dúplex temporal).

? Características negativas:

1. Complejidad del acceso. Requiere estricta sincronización temporal para evitar colisiones de ráfagas en el enlace ascendente y para que en el descendente cada terminal extraiga de la trama correctamente la información.
2. Limitación del tamaño de la trama. Si la trama es muy larga, un terminal recopila mucha información que debe transmitir en un breve tiempo lo que conduce a velocidades elevadas de transmisión que pueden no ser convenientes.
3. Retardo de la comunicación. Como la transmisión es discontinua, la información debe acumularse en una memoria (*buffer*) para su posterior lectura y presentación de forma continua, lo que implica un cierto retardo.
4. Necesidad de digitalización de la información. La utilización de TDMA para señales analógicas de origen requiere la previa conversión analógico/digital de dichas señales y en recepción

su restitución mediante la conversión contraria digital/analógica. Estos procesos entrañan un ruido inevitable que acompañará a la señal reconstruida.

5. Necesidad de contrarrestar las perturbaciones generadas en el medio radioeléctrico en las transmisiones de banda ancha.

2.2.4. LA FÓRMULA DE SHANNON Y SUS CONSECUENCIAS.

Antes de introducirnos en la modalidad de acceso múltiple CDMA conviene conocer dónde se encuentra el origen de dicha modalidad. Para ello vamos a analizar la clásica fórmula de Shannon :

$$C_0 = B_T \log_2 \left(1 + \frac{P_w}{N_0 B_T} \right)$$

En dicha fórmula se expresa la capacidad C_0 (bit/s) de un canal de transmisión cuyo efecto sobre la señal de información es la superposición de un ruido Gaussiano blanco con densidad espectral de potencia $N_0/2$. Se supone que la señal de información (que también es Gaussiana) tiene una potencia media P_w y una limitación de banda B_T .

Recurriendo al segundo teorema de Shannon, se puede afirmar que esta capacidad definida en la anterior ecuación representa el máximo valor de tasa binaria al que se puede transmitir manteniendo la probabilidad de error en un valor arbitrariamente bajo.

Las conclusiones fundamentales que se pueden extraer de la fórmula de Shannon se centran en que podemos aumentar la capacidad del canal procediendo de dos formas:

1. Aumentando la relación señal/ruido, es decir, aumentando el cociente P_w/N_0 .
2. Aumentando el ancho de banda utilizado, B_T . Si optamos por esta opción, la capacidad crece asintóticamente hacia el valor $P_w/N_0 \ln 2$.

Mirándolo de otra forma, si se reduce la relación señal/ruido la capacidad puede mantenerse aumentando el ancho de banda. Esta es la idea básica de las técnicas de espectro ensanchado, que se introducirán en el siguiente apartado, en las que se trabaja con relaciones señal/ruido muy bajas a costa de una gran ocupación espectral.

Las técnicas de espectro ensanchado utilizan modulaciones convencionales, habitualmente de fase o de frecuencia, cuyas prestaciones dependen de la relación energía por bit/densidad espectral de ruido E_b/N_0 . La relación E_b/N_0 necesaria se consigue en estos sistemas de espectro ensanchado gracias a la ganancia de procesamiento obtenida en el proceso de desensanchamiento en recepción.

2.2.5. TÉCNICAS DE ESPECTRO ENSANCHADO.

Se conocen como sistemas de espectro ensanchado SS (*Spread Spectrum*) aquellos en los que el ancho de banda de las señales transmitidas es

mucho mayor que el mínimo necesario para transportar la información y sus densidades espectrales de potencia son muy reducidas. Las señales transmitidas se asemejan a un ruido blanco. En este proceso de ensanchamiento interviene una secuencia llamada código, secuencia de ensanchamiento o firma (*signature*), que es independiente de la señal de información. Para recuperar la señal de información en el receptor es necesario conocer la secuencia de código utilizada.

El interés de los sistemas de espectro ensanchado reside en que a cambio de esa mayor ocupación espectral se consiguen importantes ventajas respecto a los sistemas convencionales.

Las técnicas de espectro ensanchado son también muy resistentes a los efectos de las interferencias, lo que las hace especialmente atractiva en los entornos limitados por interferencia como son los sistemas celulares. En virtud de esta característica, es posible la reutilización de las frecuencias en celdas vecinas, es decir, la formación de agrupaciones celulares de tamaño 1, que es el mínimo posible, con lo cual resulta innecesaria la planificación de frecuencias y aumenta la eficiencia de utilización del espectro. Otra ventaja que tiene el uso de espectro ensanchado es la convivencia con los sistemas móviles de banda estrecha ya existentes sin afectarlos sensiblemente.

El acceso múltiple por división de código CDMA, se basa en la utilización de técnicas de espectro ensanchado. Las señales se transmiten simultáneamente en la misma frecuencia de portadora, y pueden separarse en el receptor gracias a las propiedades derivadas del ensanchamiento espectral.

Las ventajas del acceso múltiple CDMA en sistemas móviles celulares respecto a las técnicas clásicas FDMA o TDMA se derivan de la mejor adaptación de las señales de espectro ensanchado a este tipo de entornos.

Existen varios tipos de técnicas de espectro ensanchado, que dan lugar a otras tantas variantes de CDMA:

1. Técnicas de saltos de frecuencia FH, (*Frequency Hopping*), en las que la frecuencia de la portadora cambia con el tiempo según un patrón establecido.
2. Técnicas de saltos de tiempo TH, (*Time Hopping*), en las que se varía el intervalo de transmisión dentro de una estructura de trama temporal.
3. Técnicas de secuencia directa DS, (*Direct Sequence*), basadas en la multiplicación de la secuencia de bits original por una secuencia digital (*chips*) de velocidad mucho mayor.
4. Técnicas multiportadora MC, (*Multicarrier*), en las que a partir de cada símbolo se genera un conjunto de chips, cada uno de los cuales modula una subportadora de frecuencia diferente.

La modalidad de secuencia directa es la más utilizada en sistemas de comunicaciones móviles CDMA, y constituye la base de los métodos de acceso WCDMA.

2.2.5.1 Ventajas de las técnicas de espectro ensanchado.

Como consecuencia del escaso espectro radioeléctrico existente, cabe pensar que el ensanchamiento del espectro de las señales transmitidas por encima del estrictamente necesario para enviarlas es un fenómeno poco deseable.

Sin embargo, el interés de este tipo de sistemas se basa en que a cambio de esa mayor ocupación espectral se consiguen una serie importante de ventajas respecto a los sistemas convencionales:

- ? **Reducción de la densidad espectral de potencia.** Tras el proceso de ensanchamiento espectral, la potencia de la señal queda distribuida en una banda mucho mayor que la que ocupaba la señal original, lo que se traduce en una disminución de la densidad espectral de potencia. Este fenómeno se puede observar en la Figura 2.12, donde se han denotado las densidades espectrales de la señal original y de la señal ensanchada por $S_d(f)$ y $S_s(f)$, respectivamente.
- ? **Privacidad.** Como consecuencia de la reducción de densidad espectral de potencia, un receptor no autorizado tendrá muchas dificultades para detectar la presencia de la señal que quedará enmascarada por el ruido de fondo. De este modo, mientras que una señal de banda estrecha se observa en un analizador de espectro como un pico a la frecuencia correspondiente, la señal de espectro ensanchado es mucho más difícil de detectar. Sin embargo, el destinatario de la señal de información sí puede recuperarla pues tiene el conocimiento de la secuencia de código. Esta propiedad de baja probabilidad de detección, LPI (*Low Probability of Intercept*), de las señales de espectro ensanchado confiere a este tipo de sistemas un elevado nivel de seguridad y privacidad, dificultando las escuchas no intencionadas.

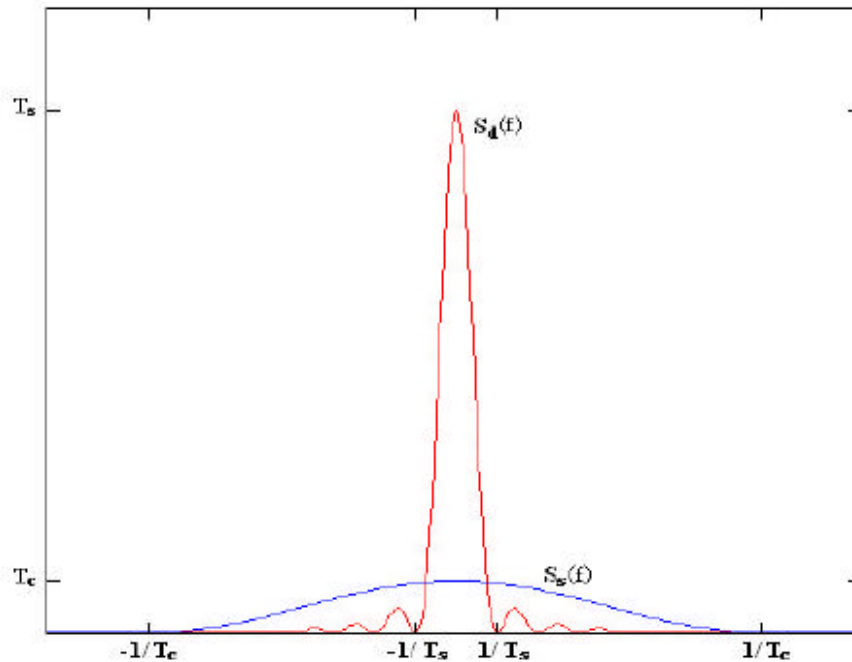


Figura 2.12. Densidades espectrales con y sin ensanchamiento

? **Protección frente a interferencias.**

a) Interferencias de banda estrecha. Consideremos un receptor de un sistema de comunicaciones de espectro ensanchado en el que se ha recibido la señal transmitida $s(t)=b(t)c(t)$ acompañada de una señal interferente de banda estrecha $i(t)$, donde $b(t)$ (con tasa de símbolo igual a $1/T_s$) es la señal de información, $c(t)$ es la forma de onda del código de ensanchamiento (con tasa de chip igual a $1/T_c$) y $s(t)$ es la señal ensanchada y modulada (equivalente paso-bajo). En cada periodo de símbolo, el receptor con filtro adaptado multiplica la señal recibida por la forma de onda o patrón esperado $c(t)$, integra dicho producto durante el periodo de símbolo considerado y toma la parte real (componente en fase) del resultado, obteniendo la variable de decisión.

La operación de multiplicación por $c(t)$ en el receptor produce el desensanchamiento de la señal de información deseada. Por el contrario,

esta misma operación aplicada sobre la interferencia produce su ensanchamiento, de forma que como resultado final se obtiene la señal deseada desensanchada y la interferencia ensanchada.

En la Figura 2.13 y en la Figura 2.14 podemos observar los espectros de potencia de las señales antes y después de la multiplicación por $c(t)$. A continuación, la señal total es procesada por un filtro adaptado a la señal deseada desensanchada, cuyo efecto es rechazar la mayor parte de la interferencia, pues va a actuar para ésta como un filtro paso bajo (o un filtro paso banda si el filtrado se hace en frecuencia intermedia). Se obtiene de este modo un grado de rechazo frente a la interferencia aproximadamente igual a la relación entre los anchos de banda antes y después de desensanchar. A esta relación se la conoce como factor de ensanchamiento SF (*Spreading Factor*).

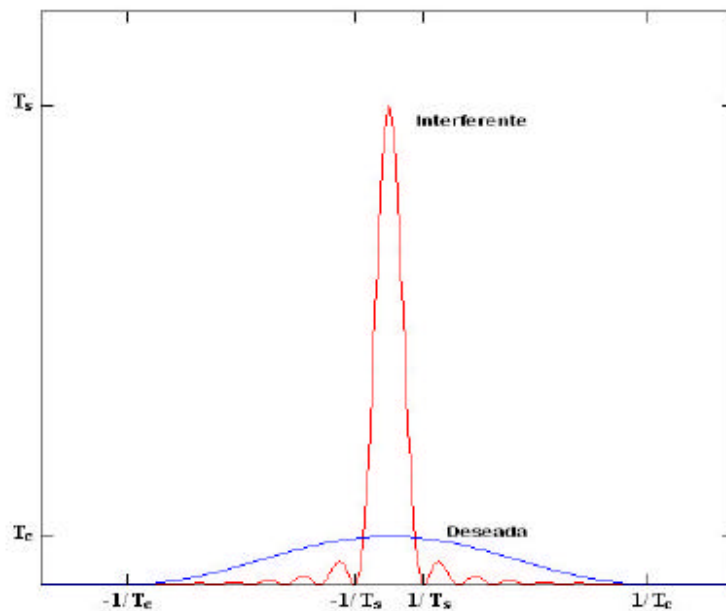


Figura 2.13. Señal deseada e interferente a la entrada del receptor.

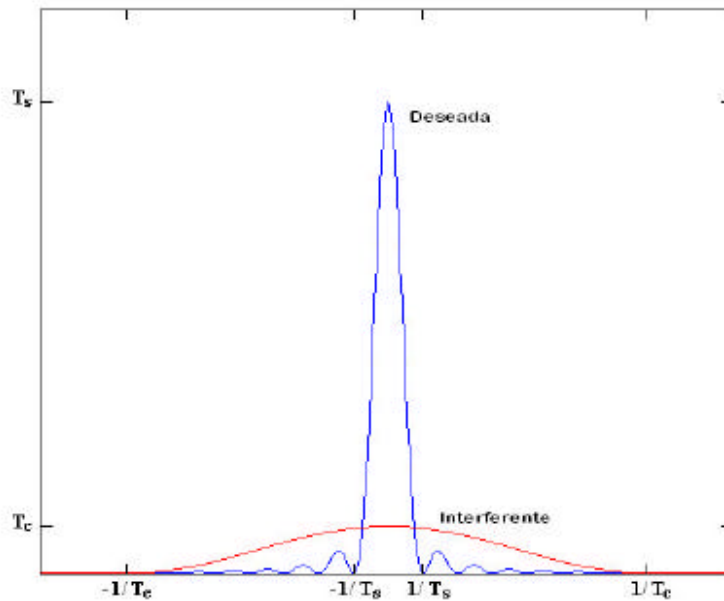


Figura 2.14. Señal deseada e interferente tras desenganchar.

Fijándonos en las Figuras 2.13 y 2.14, podemos deducir que el factor de ensanchamiento tiene un valor que responde a la siguiente fórmula que exponemos a continuación:

$$SF \approx T_s / T_c$$

donde T_c es el periodo de chip y T_s es el periodo de símbolo (o periodo de bit en una modulación binaria, T_b).

Realmente, el grado de rechazo depende de la secuencia de código utilizada. El análisis que hemos realizado es sólo un análisis aproximado que se basa en el hecho de que la señal ensanchada tiene un ancho de banda mucho mayor que antes del ensanchamiento.

Las interferencias captadas por el sistema pueden ser accidentales o intencionadas. Gracias a la protección frente a interferencias propia de las señales de espectro ensanchado, estos sistemas son muy difíciles de perturbar, y por tanto muy seguros. Todas las características vistas hasta ahora

(protección frente a interferencias, privacidad y baja probabilidad de detección) provocaron que este tipo de sistemas tuvieran sus primeras aplicaciones en el campo de las comunicaciones militares.

b) *Interferencias de banda ancha*. En general, cuando las señales que interfieren son de banda ancha, la reducción de interferencia puede ser diferente que la que se tiene frente a señales no deseadas de banda estrecha. Se distinguen entonces dos casos particulares que ofrecen una visión aproximada de lo que puede suceder:

b.1) Cuando las señales interferentes tengan un ancho de banda similar al de la señal ensanchada, $1/T_c$, la señal interferente se mantiene ensanchada al multiplicar por $c(t)$ en el receptor, y en consecuencia es filtrada en el mismo, reduciéndose su efecto sobre la señal deseada. El resultado, en este caso, es similar al que se obtiene con señales interferentes de banda estrecha. Además, y al igual que sucedía en ese caso, pueden tenerse diferentes valores de interferencia en función de las formas de onda. Sin embargo, ahora influye en el grado de rechazo de la interferencia no sólo la forma de $c(t)$ sino también la forma de la señal interferente $i(t)$. Para describir la dependencia entre estas dos formas de onda se usa la función de correlación cruzada entre las mismas. De esta forma, si varios usuarios transmiten simultáneamente señales de espectro ensanchado, el receptor podrá distinguir entre ellos si cada uno utiliza un código diferente del de los demás. Si las correlaciones cruzadas entre el código de cada usuario y los códigos de los demás son suficientemente pequeñas, el receptor podrá realizar el proceso de desensanchamiento. Para ello calculará la correlación de la señal recibida con la señal código del usuario deseado, de manera que la

señal de banda ancha de éste volverá a ser la señal portadora de información de banda estrecha, mientras que las señales de los demás usuarios seguirán ocupando todo el ancho de banda de transmisión. Así, dentro del ancho de banda de información, la potencia del usuario deseado será mayor que la potencia de interferencia de las demás señales (siempre a condición de que no haya demasiados usuarios interferentes).

b.2) Si la señal no deseada (interferente) tiene un ancho de banda mucho mayor que el de la señal ensanchada, se puede considerar equivalente a un ruido blanco. En este caso, la multiplicación por $c(t)$ no implica ninguna protección, ya que las características espectrales de dicho ruido no se ven modificadas en este proceso.

? **Resolución temporal y protección frente al multitrayecto.** En los entornos de propagación encontrados en los sistemas de comunicaciones móviles aparece siempre el fenómeno del multitrayecto, según el cual, la señal recibida es una superposición de réplicas de la señal transmitida con diferentes fases, amplitudes, retardos y desplazamientos Doppler. Estas réplicas de la señal transmitida pueden combinarse de forma destructiva causando desvanecimientos muy profundos e interferencia entre símbolos. Sin embargo, si se utilizan señales con una resolución temporal suficientemente fina, las componentes debidas al multitrayecto pueden separarse y combinarse coherentemente, evitando los problemas de desvanecimiento. Dicho todo esto, conviene afirmar que las señales de espectro ensanchado resultan especialmente indicadas para este fin.

Consideremos un receptor al que llega una señal transmitida $s(t)$ acompañada de una réplica retardada de la misma, $Bs(t-?)$. Podemos

considerar esta réplica como una interferencia de banda ancha, $i(t) = Bs(t - \tau)$, que, como vimos anteriormente, será filtrada en el receptor. El grado de rechazo va a depender de la autocorrelación de la señal $s(t)$ para el retardo τ . Esta dependencia pone un límite a la protección frente al multitrayecto, ya que si las réplicas se reciben muy próximas, con τ del orden del periodo de chip T_c o menor, la función de autocorrelación toma valores elevados y la interferencia es importante. Para que la autocorrelación entre la señal transmitida y su réplica sea pequeña, éstas deben estar suficientemente espaciadas en el tiempo. De este modo, la resolución temporal, o capacidad de aislar componentes de multitrayecto retardadas, estará determinada por T_c , es decir, por el ancho de banda de la señal. En resumen, para que τ sea suficientemente mayor que T_c buscaremos que éste sea lo más pequeño posible, es decir, que el ancho de banda de la señal transmitida sea lo mayor posible.

La separación de las réplicas provocadas por el fenómeno del multitrayecto (con una resolución del orden de T_c) permite mejorar las prestaciones del sistema. Esto es así debido a que al separar las réplicas de la señal, no sólo se evita que interfieran, sino que además pueden combinarse y lograr así una forma de diversidad que mejorará la calidad de la recepción.

2.2.5.2 Inconvenientes de las técnicas de espectro ensanchado.

Aunque hasta este momento sólo hemos mencionado las cosas buenas de las técnicas de espectro ensanchado, conviene citar cuáles son sus

inconvenientes, principalmente para saber dónde están los límites de una modalidad de acceso múltiple tan poderosa como es CDMA

- ? **Sincronización.** Para una correcta recepción es necesario adquirir y mantener la sincronización entre la señal código generada localmente y la señal recibida, manteniendo además la probabilidad de error por debajo del periodo de chip. Todo esto es complejo de llevar a cabo en la práctica.
- ? **Problema cerca-lejos.** La potencia recibida desde usuarios cercanos a la estación base es mucho más grande que la potencia recibida desde usuarios lejanos. Como cada usuario transmite en todo el ancho de banda, un usuario cercano a la estación base creará una gran cantidad de interferencia perjudicando a los usuarios lejanos, haciendo la recepción de estos imposible. Este problema conocido como efecto cerca-lejos se puede solucionar aplicando un algoritmo de control de potencia de transmisión de los usuarios en el enlace ascendente. De este modo, todos los usuarios (idealmente) serán recibidos por la estación base con la misma potencia media. Además, en un entorno celular el mecanismo de control debe ser dinámico para adaptarse a las condiciones cambiantes de propagación (desvanecimientos) y carga del sistema (entradas y salidas de usuarios).

2.2.6. ACCESO MÚLTIPLE CDMA.

2.2.6.1 Introducción

Los sistemas radio transmiten y reciben utilizando un recurso común que es la fracción del espectro electromagnético asignada al propio sistema por los organismos reguladores. La utilización de un recurso común por parte de varios usuarios del sistema produce, en general, situaciones de conflicto si dos o más usuarios transmiten sin ninguna clase de precaución en la misma frecuencia y en el mismo instante. Para resolver las posibles interferencias entre usuarios y ampliar al máximo la capacidad del sistema, es decir, el número de usuarios a los que el sistema puede atender con una calidad de servicio preestablecida, se han introducido las técnicas de acceso múltiple.

Hasta ahora hemos tratado dos de las tres técnicas básicas de acceso múltiple (FDMA y TDMA). Pasamos ahora a describir la tercera (CDMA). Para hacer más comprensivos los conceptos que vamos a introducir, conviene antes clarificar la situación por medio de un ejemplo. Supongamos que en una habitación hay muchas parejas de personas conversando. La técnica de acceso múltiple FDMA consistiría en que las parejas se colocan en la habitación separadas unas de otras y cada pareja mantiene su conversación al mismo tiempo que las demás parejas pero independientemente de ellas. La técnica TDMA equivaldría a que, estando cada componente de una pareja en un lado diferente de la habitación, cada pareja hablaría por turnos, es decir, una pareja tras otra respetando un orden temporal preestablecido. La técnica CDMA consistiría en que, estando los miembros de cada pareja mezclados en la habitación, todas las parejas estarían hablando a la vez pero cada una en un idioma diferente. De esta forma, una persona que hablara en español sólo

entendería a su respectivo compañero, rechazando el resto de las conversaciones en cualquier otro idioma como si se tratase de un ruido de fondo.

La técnica de acceso múltiple CDMA se basa en la utilización de señales de espectro ensanchado. Se diferencia de las anteriores porque permite que los usuarios transmitan en la misma frecuencia y al mismo tiempo. La separación entre los distintos usuarios se obtiene asignando a cada uno un código o secuencia distinto. Las secuencias se utilizan para codificar de manera unívoca la información del usuario a transmitir, para poderla distinguir de la de los demás usuarios. Esta operación se denomina ensanchamiento (spreading). El recurso elemental es la secuencia asociada a cada señal de usuario. La operación de ensanchamiento prevee que a cada señal a transmitir en el canal radio vaya asociada, por medio de una multiplicación, una secuencia numérica o código con velocidad de transmisión (denominada tasa de chip) mucho mayor que la velocidad de la información a transmitir. Las secuencias de código asignadas a los usuarios que comparten el mismo canal son distintas entre ellas y se escogen de manera que exista poca correlación entre las mismas, es decir, que sean ortogonales o casi ortogonales. Esto permite que, en condiciones ideales, la operación dual en el receptor (desensanchamiento) anule el efecto de las interferencias mutuas y permita extraer la señal deseada.

En condiciones de propagación reales, las distorsiones y las interferencias que sufren las señales a lo largo del canal de comunicación degradan las condiciones de ortogonalidad por lo que el número de señales que se pueden superponer en el canal es limitado. Por esta razón, el límite de la capacidad del sistema viene dado por el nivel de interferencia residual que

se obtiene en el receptor tras la operación de desensanchamiento y será fundamental reducir al mínimo este nivel de interferencia.

Evidentemente, la banda ocupada por la señal transmitida es mayor que la que sería estrictamente necesaria para transmitir la información. La aparente pérdida de eficiencia espectral queda en realidad compensada por la posibilidad de superponer más señales en el mismo canal radio. Cuanto mayor es la relación entre la velocidad de transmisión en el medio y la velocidad de transferencia de la información de usuario, más fuerte es la robustez frente a la interferencia y, por lo tanto, mayor el número de usuarios que pueden transmitir simultáneamente en el mismo canal. La robustez frente a la interferencia es tan elevada que se puede utilizar la misma frecuencia de portadora en todas las celdas de una red de telefonía móvil, como se puede observar en la Figura 2.15.

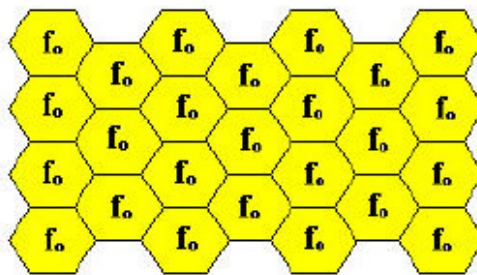


Figura 2.15. Planificación de frecuencias con CDMA.

Anteriormente, en el apartado dedicado a las técnicas de espectro ensanchado, y en relación con las mismas, introdujimos las diferentes variantes de CDMA que existían, y que volvemos a recordar: saltos de frecuencia (FH), saltos de tiempo (TH), multiportadora (MC) y secuencia directa (DS). El acceso múltiple CDMA en su variante de secuencia directa se

viene aplicando desde principios de los años 90 a sistemas de comunicaciones móviles comerciales. Sus características de limitación por interferencia y su buen comportamiento frente al multirrayecto hacen de esta variante un método de acceso muy bien adaptado a este tipo de entornos con importantes ventajas frente a los métodos clásicos FDMA o TDMA en cuanto a capacidad y calidad. Por estas razones, en los siguientes apartados de este punto, vamos a desarrollar de una forma más exhaustiva la técnica de acceso múltiple CDMA de secuencia directa, la cual nos servirá como introducción para la mejor comprensión de la variante multiportadora MC-CDMA, que será la técnica que empleemos en el desarrollo de nuestras simulaciones.

2.2.6.2 Expansión espectral por secuencia directa.

En CDMA la expansión espectral se realiza mediante la multiplicación directa de la señal de información y el código de expansión. En la figura 2.16 se representa un diagrama de bloques simplificado de un transmisor. Las señales de información y de código se representan por $d(t)$ y $c(t)$ respectivamente. El código $c(t)$ es una señal con una velocidad muy superior a la de $d(t)$ para realizar su expansión. A los símbolos de $c(t)$ se les llama chips para distinguirlos de los símbolos de $d(t)$.

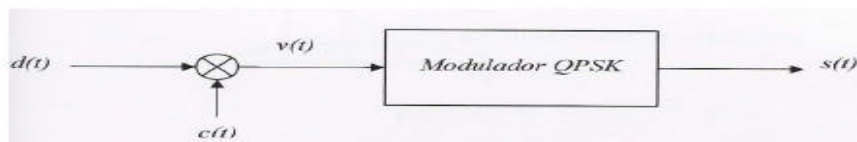


Figura 2.16. Transmisor CDMA simplificado.

La señal banda base resultante de la multiplicación $v(t)$, se aplica a un modulador QPSK (que será la modulación utilizada en las simulaciones), a cuya salida se tiene la señal RF $s(t)$. La secuencia de datos, $D[n]$, tiene una

velocidad $v_b=1/T_b$ mientras que la secuencia de chips de código, $C[n]$, tiene una velocidad de $v_c=Nv_b$ por lo que resulta $T_c=T_b/N$. El coeficiente N se denomina factor de expansión o factor de ensanchado. La señal banda base $v(t)$, tendrá por tanto un pulso base de duración $T_c=T_b/N$.

La secuencia de chips de código, en la mayoría de los casos, es de tipo pseudoaleatorio o pseudoruido, PN (pseudonoise), o una superposición de secuencias deterministas.

En la *figura 2.17*, se puede ver el efecto que produce sobre la señal de datos el código de *spreading*. En primer lugar se observa la señal de datos $d(t)$, a continuación el código de expansión $c(t)$, y por último se representa la señal ensanchada *DS-CDMA*, $v(t)$, producto de las dos anteriores.

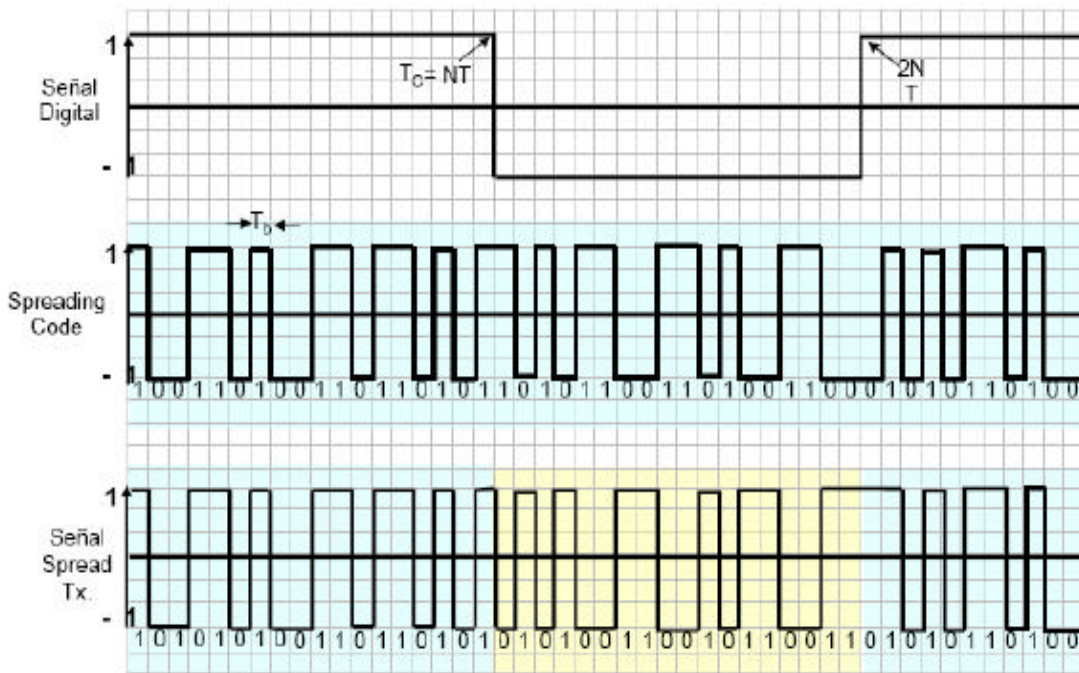


Figura 2.17. Efecto del código de ensanchamiento.

Como consecuencia de la multiplicación de los datos y el código de expansión, se produce un ensanchamiento del ancho de banda de la señal

banda base resultante. Si $d(t)$ presentaba un ancho de banda $B = 1/T_b$, el de $v(t)$ es $W = 1/T_c = SF/T_b$, SF veces mayor. Este efecto queda representado en la figura 2.18. Puesto que la potencia de la señal es la misma que la de $d(t)$, al ensancharse el espectro, la densidad espectral de potencia se ha reducido en el factor $SF = T_b/T_c$. A este valor SF también se le llama ganancia de procesamiento y puede interpretarse como el factor por el cual se multiplica al ancho de banda y se reduce la densidad de potencia.

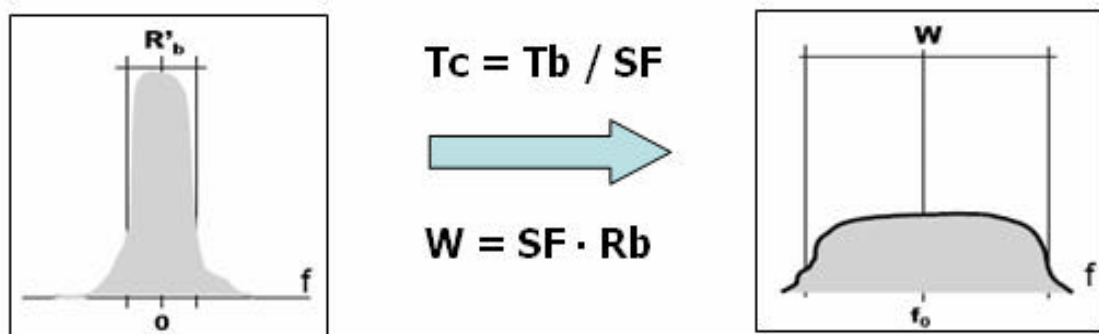


Figura 2.18. Efecto de ensanchamiento.

En recepción (Figura 2.19) debe ejecutarse la operación inversa, esto es, eliminar el ensanchamiento de la señal recibida para poder recuperar la señal original $d(t)$. Para ello se multiplica esa señal por una réplica sincronizada del código de expansión ya que se cumple que $c^2(t) = 1$. De este modo la señal recibida es igual a la señal transmitida salvo un factor de escala. A continuación se demodula esta señal como en QPSK convencional.

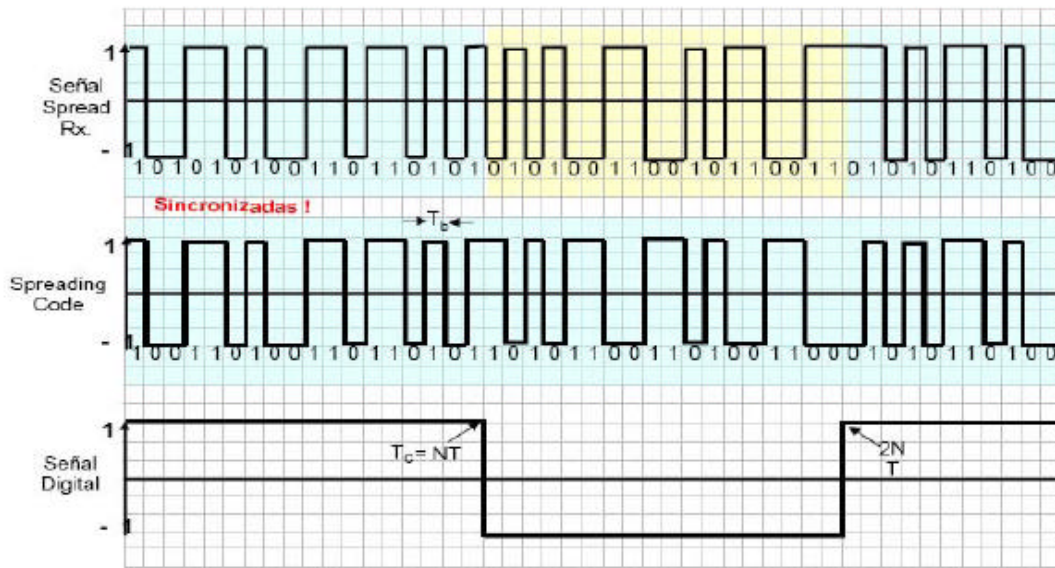


Figura 2.19. Recuperación de la señal original.

A continuación se representa en la figura 2.20 un esquema DS-SS [4] en el que se puede apreciar de una manera más global todo lo explicado anteriormente. Se observa como se produce un ensanchamiento espectral en el transmisor al multiplicar por el código de ensanchamiento. Esta señal se envía a través de un canal y antes de llegar al receptor sufre el efecto aditivo de interferencias debidas a la naturaleza del canal, tales como el ruido térmico, interferencias externas, interferencia multiusuario... De esta forma, la señal deseada se ve enmascarada por estas interferencias, lo cual resulta tener un efecto positivo, ya que, al llegar al receptor, la señal del usuario de interés se verá confundida con el resto de señales que se le suman al pasar por el canal, de tal forma que sólo podrá ser recuperada siempre y cuando se aplique el código adecuado que proceda a la recuperación de la señal deseada, el cual será el mismo que multiplicó a la señal en el bloque transmisor. De esta forma se evita posibles intrusiones espías o “escuchas” por parte de usuarios no deseados.

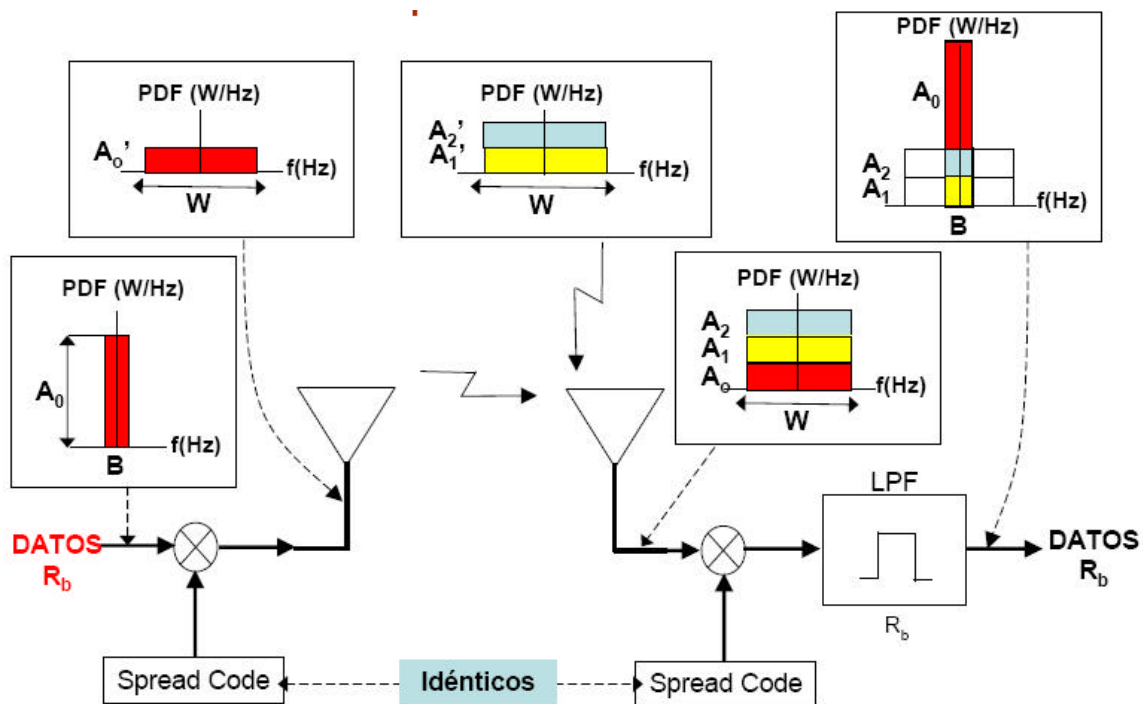


Figura 2.20. Esquema DS-SS.

2.2.6.3 Resumen características CDMA.

Una vez descrita en profundidad la técnica de acceso múltiple CDMA, y fundamentalmente su variante de secuencia directa, resulta interesante resumir de un modo menos exhaustivo, pero más intuitivo, cuáles son las principales características que distinguen a esta modalidad de multiacceso. Procedemos a enumerarlas a continuación:

- ? La técnica CDMA requiere que las señales a transmitir y los códigos de dirección sean digitales.
- ? Es una técnica intrínsecamente de banda ancha.
- ? Ofrece gran capacidad de tráfico.
- ? Debido a la gran anchura de banda, los receptores CDMA poseen gran resolución temporal, pudiendo, por tanto, extraer las réplicas de señal

debidas a la propagación multitrayecto, poner a las mismas en fase, demodularlas y sumar sus contribuciones. De este modo el multitrayecto deja de ser un problema, pasando a aprovecharse de manera positiva.

- ? La técnica CDMA requiere estricto control de la potencia de las transmisiones. Las señales transmitidas han de alcanzar las estaciones con potencias similares para que se pueda llevar a cabo su separación. El denominado efecto cerca-lejos, debe compensarse utilizando para ello técnicas de control automático de la potencia transmitida.
- ? Para sustentar múltiples canales sólo es necesario colocar un transceptor físico en la estación base.
- ? La tecnología que se utiliza en la técnica CDMA es muy compleja y requiere una muy elevada integración para conseguir terminales livianos y de reducido tamaño.
- ? En entornos contiguos se pueden utilizar las mismas frecuencias, lo cual permite mejorar la calidad del traspaso de las comunicaciones de una estación base a otra contigua, apareciendo el denominado traspaso con continuidad.

Todos estos rasgos que hemos enumerado convierten a CDMA en una técnica de acceso múltiple muy útil para los sistemas móviles celulares de tercera generación.

2.2.6.4 Ventajas de CDMA frente a TDMA y FDMA.

El hecho de que CDMA sea la técnica preferida por los sistemas de telefonía móvil celular de tercera generación, se debe fundamentalmente a las

ventajas que presenta sobre las técnicas TDMA y FDMA, las cuales enumeramos a continuación:

1. Mejor comportamiento frente a la interferencia cocanal.
2. Mejor comportamiento frente a la propagación multitrayecto, pues en CDMA es aprovechable pero en TDMA o FDMA produce desvanecimientos selectivos o fuertes atenuaciones de señal que han de contrarrestarse con técnicas especiales que complican los equipos o las instalaciones (ecualización digital, saltos de frecuencia, recepción por diversidad, codificación de canal).
3. Mejor aprovechamiento del espectro, ya que pueden reutilizarse frecuencias en celdas vecinas, lo cual no es posible en TDMA y FDMA. Como consecuencia adicional, en CDMA es innecesaria la planificación de frecuencias requerida con las otras técnicas.
4. Traspaso con continuidad de la comunicación de una estación base a otra vecina (*soft handover*). En las otras técnicas el traspaso puede implicar una pequeña discontinuidad (microcorte) de la señal.
5. Mayor capacidad de tráfico, con un factor de mejora estimado entre 10 y 15 veces sobre FDMA y entre 4 y 7 veces respecto a TDMA

2.2.7. MECANISMOS DE COMPARTICIÓN DEL ESPECTRO: COMBINACIÓN DE OFDM CON CDMA (MC-CDMA).

La modulación OFDM resuelve el problema de la propagación multitrayecto. Por otro lado, se admite que los sistemas de multiplexación

CDMA permiten una eficiencia espectral superior que los TDMA en las redes de comunicaciones móviles cuando el tráfico es de voz, con sus silencios, o de descargas breves de datos. Como consecuencia de estas dos afirmaciones, hay que añadir que en los estudios que se realizan para la definición de los sistemas de comunicaciones móviles posteriores a 3G se está considerando el empleo de mecanismos híbridos OFDM con CDMA.

Existen varias formas de combinar la modulación OFDM con la multiplexación CDMA, aunque todavía se está estudiando cuáles son las mejores y bajo qué circunstancias se producen. Las dos combinaciones más básicas, de las que se derivan todas las demás, son:

1. *La asignación de datos a frecuencias*, conocida como MC-DS CDMA. En este caso a cada portadora se le asigna un dato y todos los datos de un mismo usuario son multiplicados por un mismo código, que es diferente para cada usuario.

El transmisor se representa en la Figura 2.21.

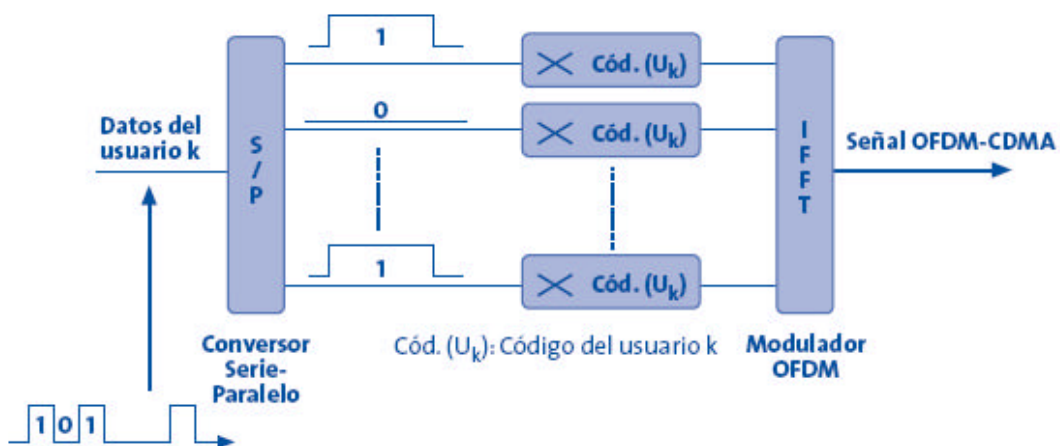


Figura 2.21. Transmisor MC-DS-CDMA.

2. *La asignación de códigos a frecuencias*, conocida como MC-CDMA (*Multicarrier CDMA*). Consiste en transmitir el flujo de datos de cada

usuario por todas las portadoras a la vez, de manera que cada portadora es expandida a su vez por un código, que es diferente para cada portadora y para cada usuario.

En la Figura 2.22 se representa un esquema de funcionamiento en transmisión.

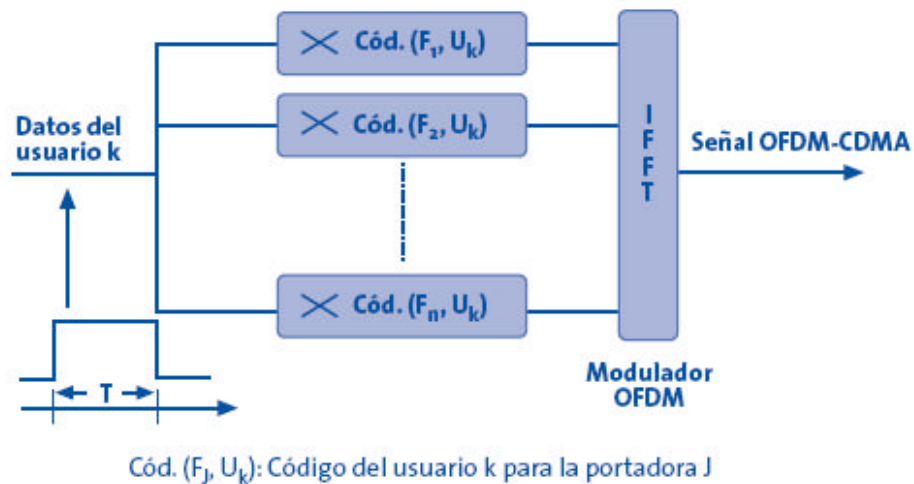


Figura 2.22. Transmisor MC-CDMA.

De estos dos procedimientos básicos se derivan variantes, que difieren en el número de chips por portadora o en los tipos de códigos, o que incorporan concatenaciones de réplica de datos y conversión de serie a paralelo.