

4

Técnicas de Acceso Múltiple. OFDMA y SC- FDMA

4.1 Definición y Modalidades

Un método o técnica de acceso múltiple permite a un número determinado de usuarios conectados a un mismo medio, transmitir y recibir información compartiendo su capacidad. Ejemplos de medio compartido son las redes en anillo, las redes en bus o el caso de estudio en este proyecto, las redes inalámbricas. La manera de conseguir el acceso múltiple se basa en la multiplexación de los usuarios y se lleva a cabo en la capa física del sistema de comunicaciones mediante un protocolo de acceso múltiple y un mecanismo de control conocido habitualmente como MAC (*Media Access Control*) que se sitúa en la capa dos del modelo OSI. Este protocolo se suele encargar de tareas como evitar la colisión entre usuarios y de distribuir los recursos. Hay varios tipos de métodos de acceso múltiple según la manera que tengan de dividir los recursos del medio. Los principales son TDMA, FDMA y CDMA. En la Figura 4.1 se pueden observar gráficamente las diferencias entre los tres.

4.1.1 TDMA (Time Division Multiple Access)

Este método de acceso múltiple está basado en el esquema de multiplexación por división en tiempo (TDM) en el que se asigna un time slot o intervalo de tiempo a cada flujo de datos. En el caso de TDMA, cada flujo de datos se corresponde a un usuario

conectado al medio compartido. En comunicaciones móviles TDMA es utilizado en casi todos los sistemas de segunda generación, destacando GSM.

4.1.2 FDMA (Frequency Division Multiple Access)

Para esta técnica de acceso al medio, el ancho de banda se divide entre múltiples usuarios, correspondiéndole a cada uno de ellos solamente una o varias subportadoras. OFDMA (*Orthogonal FDMA*) es la versión de FDMA en la cual las subportadoras son ortogonales entre sí y es una adaptación de la técnica de modulación OFDM para el acceso múltiple. SC-FDMA (*Single Carrier FDMA*) es la versión pre-codificada con DFT de FDMA.

Pese a que las técnicas FDMA presentan la desventaja de una exigente sincronización en frecuencia, implementaciones ingeniosas como OFDMA y SC-FDMA poseen numerosos beneficios frente a TDMA o CDMA como la robustez al multitrayecto o la eliminación de una costosa ecualización en el dominio del tiempo para canales con largas dispersiones temporales como los inalámbricos, sustituyéndola por una ecualización en frecuencia mucho más sencilla. También destaca la facilidad para el reparto de recursos en frecuencia según las condiciones del canal, muy útil en canales selectivos en frecuencia como son los inalámbricos.

Por este motivo, OFDMA y SC-FDMA son las técnicas de elección para la capa física de la interfaz radio del nuevo estándar para comunicaciones móviles LTE (*Long Term Evolution for UMTS*) que es motivo de estudio en este proyecto.

4.1.3 CDMA (Code Division Multiple Access)

Mientras que en TDMA y FDMA los recursos se dividen de forma temporal o en frecuencia, siéndole asignado un time slot o una banda de frecuencia solamente a un usuario determinado, en CDMA todos los usuarios pueden transmitir al mismo tiempo y en la misma banda de frecuencia. Esto se consigue asignándole a cada usuario un código que los diferencia del resto. La modalidad de CDMA más común es DS-SS (*Direct Sequence Spread Spectrum CDMA*) donde el código asignado a cada usuario es una secuencia PN pseudoaleatoria que multiplica la señal correspondiente a un símbolo y usuario. La secuencia se divide en chips cuya duración es mucho menor que la del tiempo de símbolo. El resultado es una señal con apariencia ruidosa y un espectro expandido. CDMA soluciona los problemas de sincronización asociados a TDMA y FDMA, pero es más vulnerable al problema de *near-far*. El sistema 2G cdma-One y la mayoría de los sistemas 3G de telefonía móvil como CDMA2000 o UMTS incorporan CDMA.

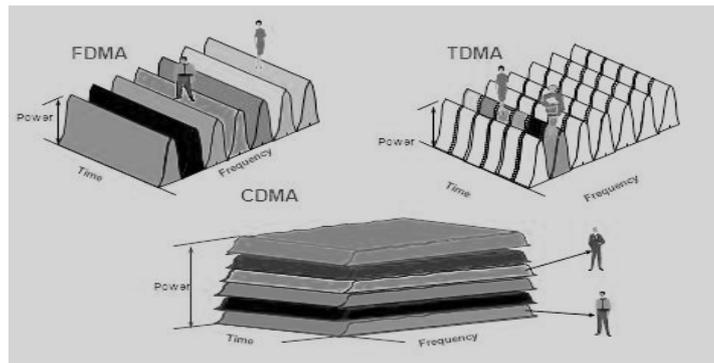


Figura 4.1 Diferencia entre TDMA, FDMA y CDMA.

4.2 OFDMA y SC-FDMA

A continuación vamos a describir las técnicas de acceso al medio por división en frecuencias ortogonales que son las técnicas de elección para los sistemas más innovadores de comunicaciones inalámbricas y en concreto para LTE.

El funcionamiento de OFDM fue explicado extensamente en el capítulo anterior de este documento. En la Figura 4.2 se muestra la implementación de OFDM como técnica de acceso al medio (OFDMA) en el enlace descendente de LTE (podría ser cualquier otro sistema de comunicaciones utilizando OFDMA).

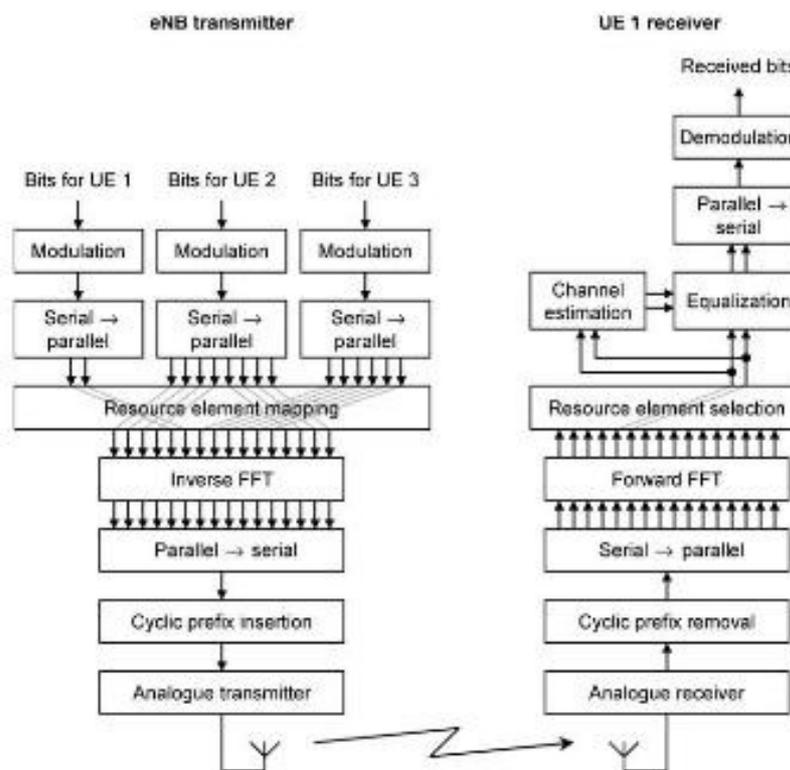


Figura 4.2 Sistema OFDMA en el enlace descendente de LTE.

Como el funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA es muy similar y el primero se basa en OFDM que ya ha sido ampliamente expuesto, ahora nos centraremos en resaltar las diferencias de SC-FDMA con respecto a OFDM como técnica de modulación y después describiremos su funcionamiento como técnica de acceso compartido que puede ser extendido a OFDMA.

4.2.1 Diferencias entre OFDMA y SC-FDMA

SC-FDMA se puede considerar como una versión precodificada, mediante la transformada discreta de Fourier (DFT), de OFDMA. Los símbolos en el dominio del tiempo modulados mediante un esquema M -QAM o M -PSK, pasan por un bloque DFT en el transmisor que convierte los símbolos al dominio de la frecuencia, esparciéndolos en todas las subportadoras que ocupan el ancho de banda destinado al usuario. Esta operación, evidentemente, deberá ser deshecha en el receptor, por lo que también se añade un bloque IDFT que no existía en OFDM.

Haciendo esta operación de precodificación se logra un importante objetivo que es la reducción de PAPR con respecto a OFDMA, debido a la naturaleza de portadora única de la señal resultante que es introducida al HPA antes de la transmisión. Debido a esta virtud, SC-FDMA es la técnica elegida en el enlace ascendente de la capa física de interfaz radio en LTE, ya que reduce el coste de un HPA muy lineal, disminuyendo el consumo de batería del teléfono móvil, aspecto éste cada vez más importante. Por otra parte, OFDMA es la técnica elegida en el enlace descendente ya que el alto PAPR no es un problema en el transmisor de la estación base y permite que el receptor en el teléfono móvil sea algo menos complejo.

En la Figura 4.3 se pueden observar las diferencias entre OFDMA Y SC-FDMA a nivel de diagrama de bloques.

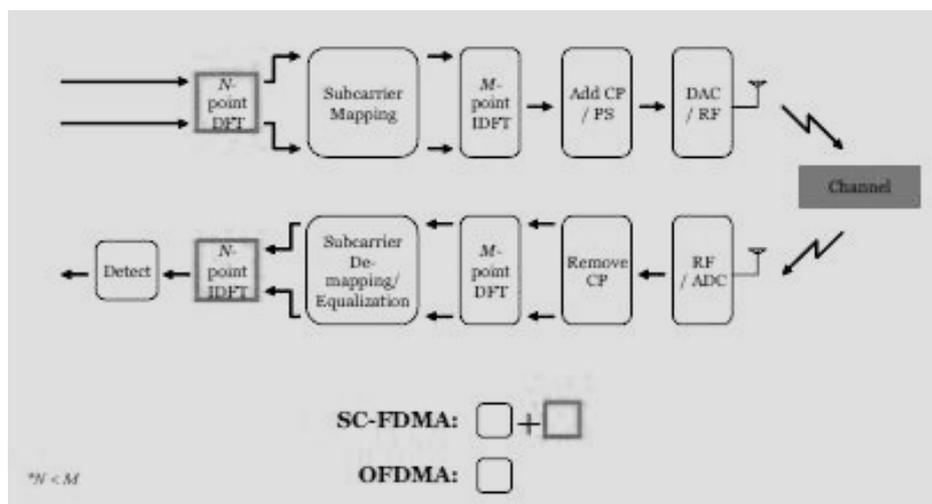


Figura 4.3 Esquema del transmisor SC-FDMA (Diferencias con OFDMA).

4.2.2 Transmisor y Receptor SC-FDMA

Transmisor

Modulador M-QAM/ M-PSK

Veamos con detalle el proceso para crear la señal SC-FDMA en el transmisor para un usuario U_r en un sistema de comunicaciones con Q usuarios en total. En primer lugar, los bits a transmitir, probablemente previamente codificados, pasan por un modulador que sigue un esquema M -QAM o M -PSK. A la salida, tenemos los símbolos en serie modulados, los cuáles separamos en grupos de N símbolos modulados y que se pueden expresar como

$$\{x_n : n = 0, 1, \dots, N - 1\}.$$

Bloque DFT

Estos símbolos x_n son la entrada del bloque DFT, que se implementa mediante el algoritmo FFT con gran eficiencia. La transformada discreta de Fourier es de N puntos, tantos como subportadoras le sean asignadas al usuario U_r dentro del ancho de banda total del sistema $B_{total} \approx M \cdot \Delta f$, donde M es el número total de subportadoras y $\Delta f = 1/T_{simbolo}$ es la separación entre las mismas. A la salida del bloque DFT tenemos los símbolos modulados x_n representados en el dominio de la frecuencia mediante los símbolos DFT dados por

$$\{X_k : k = 0, 1, \dots, N - 1\}.$$

Es importante darse cuenta de que la información de cada símbolo x_n ha sido esparcida a lo largo de todas las muestras X_k y es por ello por lo que se conoce a SC-FDMA como *DFT-spread OFDMA*.

Mapeador subportadoras

A continuación, los N símbolos del usuario U_r se mapean entre las M subportadoras disponibles para el sistema de comunicación en total. En el siguiente apartado veremos que el mapeo puede ser entrelazado, distribuido o localizado. El sistema de comunicación puede dar servicio a $Q = M/N$ usuarios conectados al mismo tiempo y la cantidad Q se conoce como *Spreading Factor*. La salida del mapeador viene dada por

$$\{\tilde{X}_l : l = 0, 1, \dots, M - 1\},$$

Donde $M - N$ símbolos son nulos. En el esquema OFDMA, los N símbolos x_n se mapearían directamente entre las M subportadoras sin pasar por el bloque FFT. Este tipo de esquema, como ya se ha comentado, presenta el inconveniente de que la señal resultante es multiportadora con un alto PAPR y que los símbolos pueden verse afectados por nulos espectrales y ser irrecuperables.

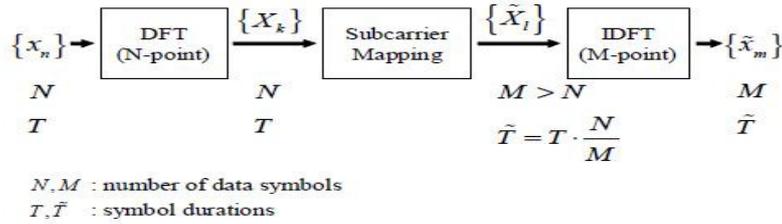


Figura 4.4 Etapas de procesado de los símbolos en SC-FDMA.

Bloque IDFT

La siguiente etapa es la transformada inversa de Fourier, implementada mediante el algoritmo IFFT, que da lugar a los símbolos en el dominio del tiempo:

$$\{ \tilde{x}_m : m = 0, 1, \dots, M - 1 \}$$

Es importante notar en este punto que aunque en los estudios teóricos de SC-FDMA se considera que el número de puntos de la IFFT es igual al número de portadoras M , esto nunca es así en la implementación práctica del sistema, ya que se hace necesario cumplir lo siguiente:

$$N_{IFFT} \geq M$$

Con ello se consigue reducir la interferencia entre canales adyacentes y relajar las especificaciones del filtro de reconstrucción del DAC. Suele tomarse la siguiente potencia de dos superior a M . La salida del bloque IFFT sería entonces

$$\{ \tilde{x}_m : m = 0, 1, \dots, N_{IFFT} - 1 \}$$

Añadir CP, S/P y HPA

Por último, se añade un prefijo cíclico a cada bloque de N símbolos con el objetivo de prevenir la ISI y convertir la convolución entre la respuesta del canal y la señal transmitida en circular para facilitar la ecualización en frecuencia.

La señal SC-FDMA discreta resultante se convierte a analógica utilizando un DAC y se sube en frecuencia mediante un oscilador dando lugar a la señal SC-FDMA paso de banda:

$$S_{SC-FDMA}(t) = e^{-j2\pi f_c t} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{x}_m \cdot r(t - m\tilde{T})$$

Donde f_c es la frecuencia de portadora del sistema y $r(t)$ es el pulso en banda base, que se suele elegir del tipo coseno alzado para reducir la radiación de energía fuera de banda. Obsérvese que $\tilde{T} = T_{muestreo}$, es el tiempo que un símbolo complejo \tilde{x}_m a la salida de la IFFT modula la portadora y es N_{IFFT} veces inferior al tiempo de símbolo

SC-FDMA (se corresponde con el periodo de muestreo). La señal $S_{SC-FDMA}(t)$ es posteriormente amplificada y emitida por medio de la antena.

Receptor

Como se observaba en la comparativa entre sistemas OFDMA y SC-FDMA de la Figura 4.1, la única diferencia entre los receptores de ambos sistemas es que el sistema SC-FDMA tiene que incluir un bloque IDFT de N puntos para deshacer los cambios introducidos por el bloque DFT de N puntos en el transmisor.

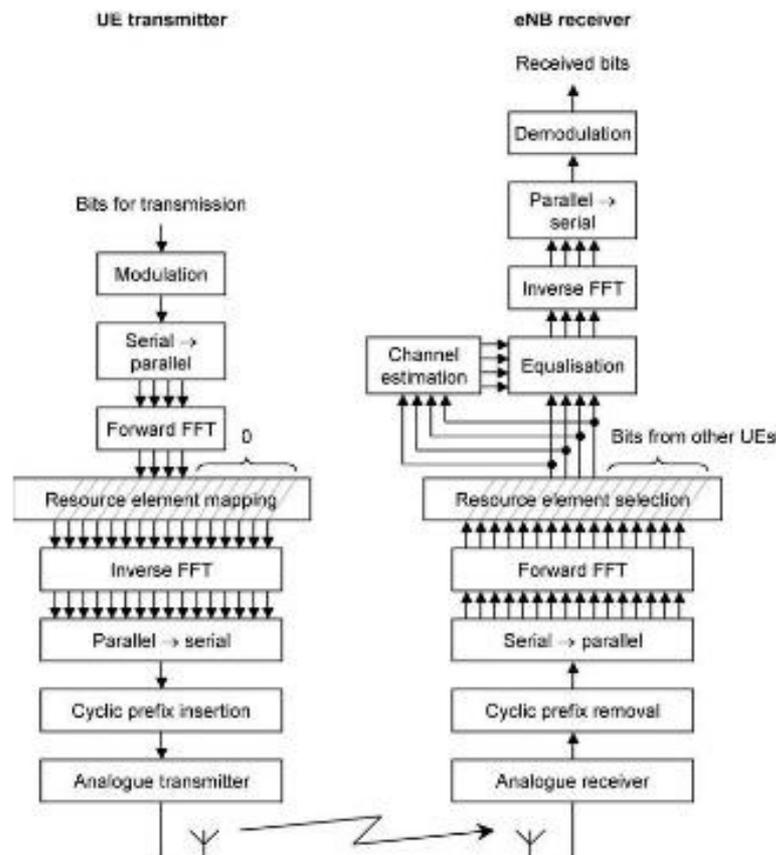


Figura 4.5 Sistema SC-FDMA en el enlace ascendente de LTE.

4.2.3 Modalidades de SC-FDMA

Hay tres tipos de mapeo de los símbolos en las subportadoras: entrelazado (IFDMA o *Interleaved FDMA*), distribuido (DFDMA o *Distributed FDMA*) y localizado (LFDMA o *Localized FDMA*). Cada uno de ellos da lugar a una señal con distintas características tanto en tiempo como en frecuencia.

El conjunto de operaciones mostrado en la Figura 4.4 (FFT + mapeo + IFFT) se puede expresar como una operación lineal sobre la secuencia de símbolos modulados $\{x_n : 0, 1, \dots, N - 1\}$. Por lo tanto, cada elemento de la secuencia de salida

$\{\tilde{x}_m : m = 0, 1, \dots, M - 1\}$ (en la implementación real $\{\tilde{x}_m : m = 0, 1, \dots, N_{IFFT} - 1\}$), es una suma ponderada de los elementos de la secuencia de entrada, donde los coeficientes de ponderación son números complejos. A continuación, se exponen las diferencias entre los distintos tipos de mapeo.

Interleaved Frequency Division Multiple Access (IFDMA)

En IFDMA, la salida del mapeador $\{\tilde{X}_l\}$ viene dada por la expresión

$$\tilde{X}_l = \begin{cases} X_{l/(Q+r)}, & l = Qk + r \quad (0 \leq k \leq N - 1) \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Donde $0 \leq l \leq N - 1$, $M = Q \cdot N$ y r es la subportadora en la que empieza el reparto para un usuario U_r , cumpliéndose $0 < r \leq Q - 1$.

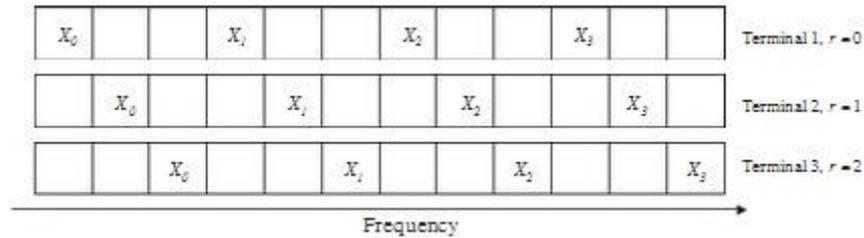


Figura 4.6 Ejemplo simple de IFDMA con $N = 4$ símbolos por usuario, $M = 12$ subportadoras disponible en total y $Q = 3$ el número de usuarios

Como se deduce de la expresión, la transmisión de cada usuario U_r se distribuye por todo el ancho de banda del sistema B_{total} , separándose cada símbolo \tilde{X}_l del siguiente en Q subportadoras y rellenándose con ceros las subportadoras intermedias.

Los símbolos en el dominio temporal $\{\tilde{x}_m\}$, tras la IFFT, vienen dados por

$$\tilde{x}_m = \frac{1}{Q} \cdot x_{m(mod N)} \cdot e^{-j2\pi \frac{nr}{M}}$$

Por lo tanto, la señal IFDMA en el dominio del tiempo no es más que una repetición periódica de los símbolos complejos modulados mediante un esquema M-QAM o Q-PSK, con una amplitud escalada por un factor Q y un desplazamiento de fase para los símbolos de los usuarios $r \neq 0$.

Localized Frequency Division Multiple Access (LFDMA)

Por otra parte, en LFDMA, la salida del mapeador $\{\tilde{X}_l\}$ viene dada por

$$\tilde{X}_l = \begin{cases} X_l, & (0 \leq l \leq N - 1) \\ 0, & (N \leq l \leq M - 1) \end{cases}$$

Es decir, todos los símbolos \tilde{X}_l pertenecientes al usuario U_r se agrupan seguidos en un ancho de banda B_{total}/Q asignado al usuario U_r .

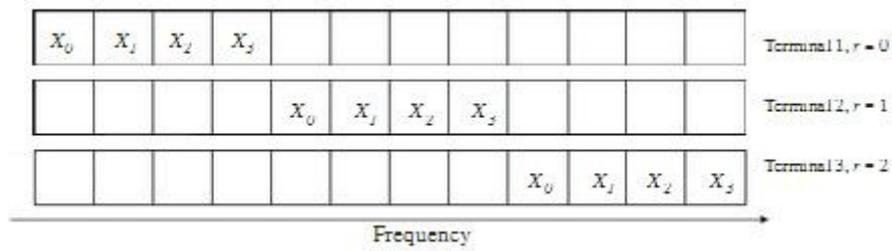


Figura 4.7 Ejemplo simple de LFDMA con $N = 4$ símbolos por usuario, $M = 12$ subportadoras disponible en total y $Q = 3$ el factor de expansión.

Sea $m = Q \cdot n + q$, donde $0 \leq n \leq N - 1$, $0 \leq q \leq Q - 1$ y $N = Q \cdot M$, tras una serie de pasos matemáticos, se puede deducir que la secuencia de símbolos en el dominio del tiempo $\{\tilde{x}_m\}$ viene dada por

$$\tilde{x}_m = \tilde{x}_{Q \cdot n + q} = \begin{cases} \frac{1}{Q} \cdot x_{(n) \bmod N}, & q = 0 \\ \frac{1}{Q} (1 - e^{-j2\pi \frac{q}{Q}}) \cdot \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} \frac{X_p}{1 - e^{-j2\pi \{ \frac{n-p}{N} + \frac{q}{QN} \}}}, & q \neq 0 \end{cases}$$

En este caso los símbolos tras la IFFT, resultan en el dominio temporal como

$$\tilde{x}_m = \frac{1}{Q} (1 - e^{-j2\pi \frac{q}{Q}}) \cdot \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} \frac{X_p}{1 - e^{-j2\pi \{ \frac{n-p}{N} + \frac{q}{QN} \}}}$$

Simplificando un poco, cada símbolo x_l aparece una sola vez y están separados entre ellos por N muestras. El resto de muestras son una combinación lineal del resto en la forma:

$$\tilde{x}_m = \sum_{k=0}^{N-1} c_{k,m} x_k \quad q \neq 0$$

Distributed Frequency Division Multiple Access (DFDMA)

Por otra parte, en DFDMA, las muestras en frecuencia tras el mapeo de subportadoras $\{\tilde{X}_l\}$ pueden ser descritas como sigue:

$$\tilde{X}_l = \begin{cases} X_{l/\tilde{Q}}, & l = \tilde{Q} \cdot k \quad (0 \leq k \leq N - 1) \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde $0 \leq l \leq M - 1$, $M = Q \cdot N$ y \tilde{Q} es el factor real de expansión que cumple $1 \leq \tilde{Q} < Q$.

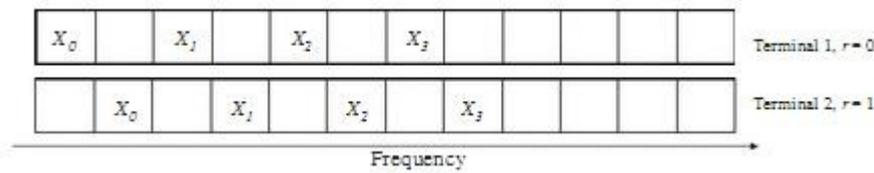


Figura 4.8 Ejemplo simple de DFDMA con $N = 4$ símbolos por usuario, $M = 12$ subportadoras disponible en total, $Q = 3$ el factor de expansión y $\tilde{Q} = 2$ el factor de expansión real.

Sea $m = Q \cdot n + q$, donde $0 \leq n \leq N - 1$ y $0 \leq q \leq Q - 1$, se puede demostrar que la secuencia $\{\tilde{x}_m\}$ viene dada por:

$$\tilde{x}_m = \tilde{x}_{Q \cdot n + q} = \begin{cases} \frac{1}{Q} \cdot x_{(\tilde{Q}(n) \bmod N) \bmod N}, & q = 0 \\ \frac{1}{Q} (1 - e^{-j2\pi \frac{\tilde{Q}q}{Q}}) \cdot \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} \frac{X_p}{1 - e^{-j2\pi \left\{ \frac{\tilde{Q}n-p}{N} + \frac{\tilde{Q}q}{QN} \right\}}}, & q \neq 0 \end{cases}$$

Como se observa la versión distribuida de SC-FDMA da lugar a una señal temporal de características no iguales pero sí similares a la versión localizada.

En la Figura 4.9 se ofrece una comparativa de la secuencia de símbolos en el tiempo correspondiente al usuario U_0 para cada esquema de SC-FDMA.

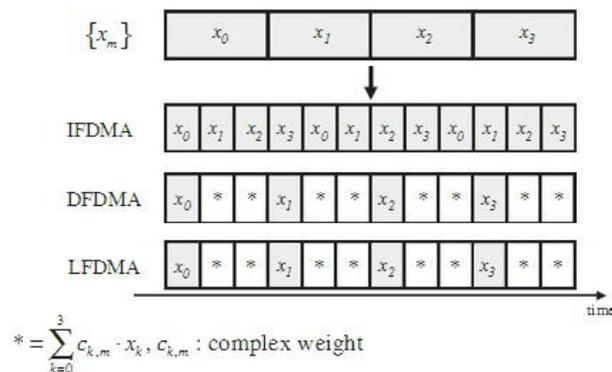


Figura 4.9 Secuencias OFDMA y SC-FDMA en sus distintas modalidades enviadas por un usuario en el dominio del tiempo para un sistema con $N = 4$ símbolos por usuario, $M = 12$ subportadoras disponible en total y $Q = 3$ el número de usuarios.

A continuación, se muestran la forma de las señales OFDMA y SC-FDMA en sus distintas modalidades en el dominio del tiempo para un sistema en el que se dispone de $M=64$ subportadoras y se asignan 16 subportadoras por usuario. Todos los sistemas admiten $Q=4$ usuarios menos DFDMA que admite $\tilde{Q} = 3$ usuarios. Se utiliza Q-PSK como esquema de modulación.

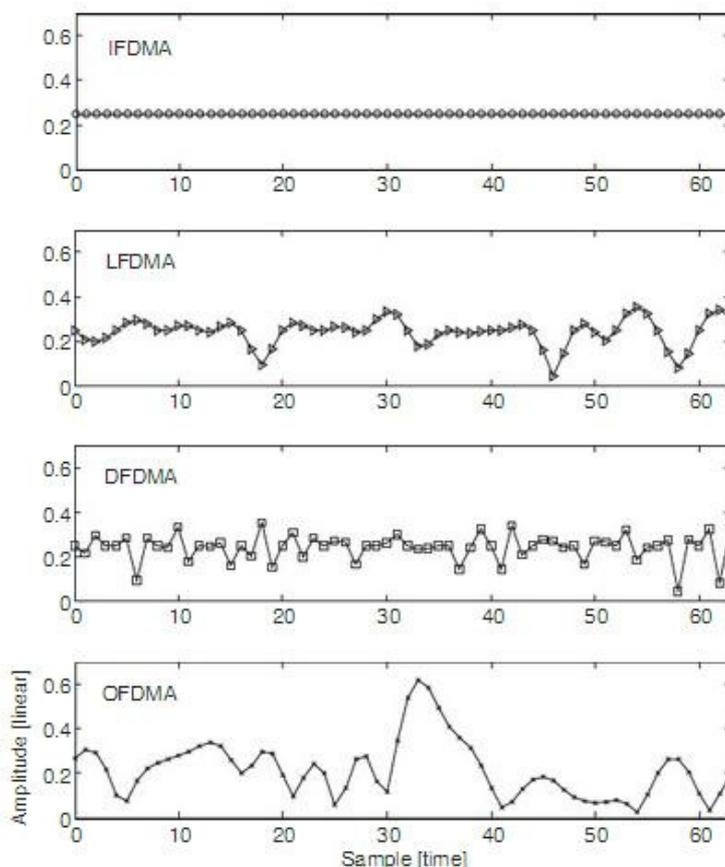


Figura 4.10 Envoltora de la señal enviada por un usuario en el dominio del tiempo para sistemas ideales SC-FDMA y OFDMA con $M=64$ subportadoras, $N=16$ símbolos por usuario y $Q=4$ el factor de expansión.

La anterior figura puede servir como orientación sobre la forma de la envolvente de los distintos tipos de señal en un esquema ideal con $N_{IFFT} = M$ y sin *pulse shaping*. Se resalta lo de ideal, debido a que, como se indicó anteriormente, en un sistema inalámbrico real será necesario que $N_{IFFT} \geq M$ e incorporar algún tipo de enventanado para reducir la radiación fuera de banda y poder utilizar un filtro de reconstrucción realizable. Las consecuencias de ello, será un aumento del PAPR como se comprobará en el estudio con detenimiento del PAPR en el capítulo seis dedicado a las simulaciones.

