

Multiplexado con División en Frecuencia Ortogonal (OFDM).

El multiplexado con división en frecuencia ortogonal (*OFDM*) es una técnica de modulación que divide un canal de comunicaciones en una serie de bandas de frecuencias equidistantes. Una subportadora que contiene una porción de la información es transmitida en cada banda. Cada subportadora es ortogonal a todas las demás subportadoras, diferenciando a OFDM de los multiplexados con división en frecuencia más comunes.[8]

4.1. Definición y Estructura de OFDM.

OFDM es una técnica de modulación con múltiples portadoras, la cual ha sido adoptada por sistemas de comunicación con alta velocidad de transferencia de datos. La popularidad de OFDM por su alta velocidad de transferencia de datos se debe principalmente a su eficiencia y su manejo flexible de la interferencia intersímbolos (*InterSymbol Interference, ISI*) en canales altamente dispersivos.[9]

Mientras la propagación del retraso del canal τ se convierte en un múltiplo cada vez mayor del tiempo T_s , la ISI se hace más severa. Por definición, un sistema con alta velocidad de transferencia de datos generalmente tiene $\tau \gg T_s$, debido a que el número de símbolos enviados por segundo es alto. En un sistema NLOS, como WiMAX, en el cual se va a transmitir en una distancia de moderada a larga, la propagación del retraso también frecuentemente será grande. Los sistemas inalámbricos de banda ancha de todos los tipos sufrirán de ISI severo y por lo tanto requerirán técnicas de transmisión y/o recepción que superen la ISI. Aunque el estándar IEEE 802.16 incluye técnicas de modulación de una portadora, la mayoría de los sistemas usan OFDM, el cual ha sido seleccionado como preferido por el WiMAX Forum.

4.1.1. Modulación con Múltiples Portadoras.

Con el fin de tener un canal sin ISI, el símbolo del tiempo T debe ser más grande que la propagación del retraso del canal τ . Los sistemas de comunicación digitales no pueden operar si ISI está presente; mientras T se aproxima a τ , la tasa de errores de bits se hace intolerable.

A fin de superar este problema, la modulación con múltiples portadoras divide la alta tasa de bits a transmitir en L subcadenas de baja tasa, cada una de las cuales tiene $T_s/L \gg \tau$ y, por lo tanto, son libres de ISI. Estas subcadenas pueden ser enviadas sobre L subcanales paralelos, manteniendo el total de la tasa de datos deseada. Normalmente, los subcanales son ortogonales bajo la condición de propagación ideal, por lo que la modulación con múltiples portadoras es referida como OFDM. La tasa de datos en cada uno de los subcanales es mucho menor que la tasa total, por lo que el ancho de banda del subcanal es mucho menor que el ancho de banda total del sistema. La ISI en cada subcanal es pequeña, por otra parte, en la implementación digital de OFDM la ISI puede ser completamente eliminada con el uso del prefijo cíclico.

La modulación con múltiples portadoras divide la cadena de datos de banda ancha en L subcadenas de banda angosta, después cada una de ellas es transmitida sobre un diferente subcanal de frecuencia ortogonal. El número L de subcadenas se escoge para hacer que el símbolo del tiempo en cada subcadena sea mucho mayor que la propagación del retraso del canal o, lo que es equivalente, hacer el ancho de banda del subcanal menor que el ancho de banda del canal. Esto asegura que las subcadenas no experimentarán ISI significativa.

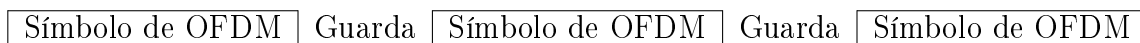
Esta técnica de modulación tiene interpretaciones interesantes en los dominios del tiempo y de la frecuencia. En el dominio del tiempo, la duración del símbolo en cada subportadora se incrementa a $T = LT_s$, por lo que hacer que L sea grande asegura que la duración del símbolo excede el retraso en la propagación del canal, $T \gg \tau$, que es un requerimiento para una comunicación libre de ISI. En el dominio de la frecuencia, las subportadoras tienen un ancho de banda $B/L \ll B_c$, lo que asegura desvanecimiento plano (*flat fading*), el equivalente a la comunicación libre de ISI en el dominio de la frecuencia.

Aunque este simple tipo de modulación con múltiples portadoras es fácil de entender, tiene varios defectos fundamentales. Primero, en una implementación realista, una penalización en el ancho de banda por que las subportadoras no pueden tener la forma de pulsos rectangulares perfectos y están limitadas en tiempo. Además filtros paso bajas de muy alta calidad serán requeridos para mantener la ortogonalidad de las subportadoras en el receptor. Y más importante, este esquema requiere L unidades de RF independientes y trayectorias de demodulación. A continuación se presentará como OFDM supera estos defectos.[10]

4.1.2. Las bases de OFDM.

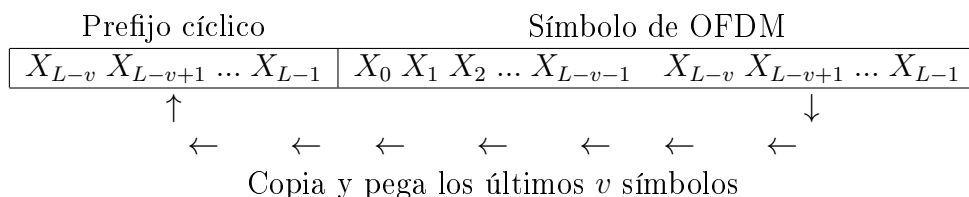
Para superar la necesidad de L unidades de RF en el transmisor y en el receptor, OFDM usa una técnica computacional efectiva, la transformada de Fourier rápida (*FFT*). La FFT y su inversa, la IFFT, pueden crear múltiples subportadoras ortogonales utilizando una sola unidad de RF.

Se inicia agrupando L símbolos de datos en un bloque conocido como el símbolo de OFDM (*OFDM symbol*). Un símbolo de OFDM tiene una duración de T segundos, donde $T = LT_s$. Para mantener cada símbolo de OFDM independiente de los otros que irán a través del canal inalámbrico, es necesario introducir un tiempo de guarda entre los símbolos de OFDM :



De esta manera, después de recibir una serie de símbolos de OFDM , mientras el tiempo de guarda T_g sea más largo que la propagación del retraso del canal τ , cada símbolo de OFDM sólo interferirá con él mismo.

La clave para hacer OFDM realizable en la practica es el uso del algoritmo FFT. Para que la IFFT/FFT puedan crear un canal libre de ISI, el canal debe proveer una convolución circular. Al añadir un prefijo cíclico a la señal transmitida, como se muestra a continuación, se crea una señal $x[n]_L$, y por lo tanto $y[n] = x[n] \otimes h[n]$.



Esto es, si la propagación del retraso del canal máxima tiene una duración de $v + 1$ muestras, añadir una banda de guarda de al menos v muestras entre símbolos de OFDM hace cada símbolo de OFDM independiente de los que vienen después y antes de él y así sólo un símbolo de OFDM puede ser considerado.

El prefijo cíclico viene con penalizaciones tanto en ancho de banda como en potencia. Puesto que v símbolos redundantes son enviados, los requerimientos de banda ancha se incrementan. De la misma manera, v símbolos adicionales deben ser contabilizados para su transmisión y así consumir más potencia.

Para poder estimar los símbolos recibidos, la ganancia compleja del canal de cada subportadora debe ser conocida, se debe conocer la amplitud y la fase de la subportadora.

Para técnicas de modulación, como QPSK, que no usan la amplitud para transmitir información, sólo la información de la fase será suficiente.

Después de que se realiza la FFT, los símbolos de datos son estimados usando un ecualizador en el dominio de la frecuencia (*Frequency Domain Equalizer*, FEQ) de la siguiente manera:

$$\hat{X}_1 = \frac{Y_1}{H_1},$$

donde H_1 es la respuesta compleja del canal a una determinada frecuencia y por lo tanto corrige la fase y ecualiza la amplitud.[3]

En la figura 4.1 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones basado en OFDM .

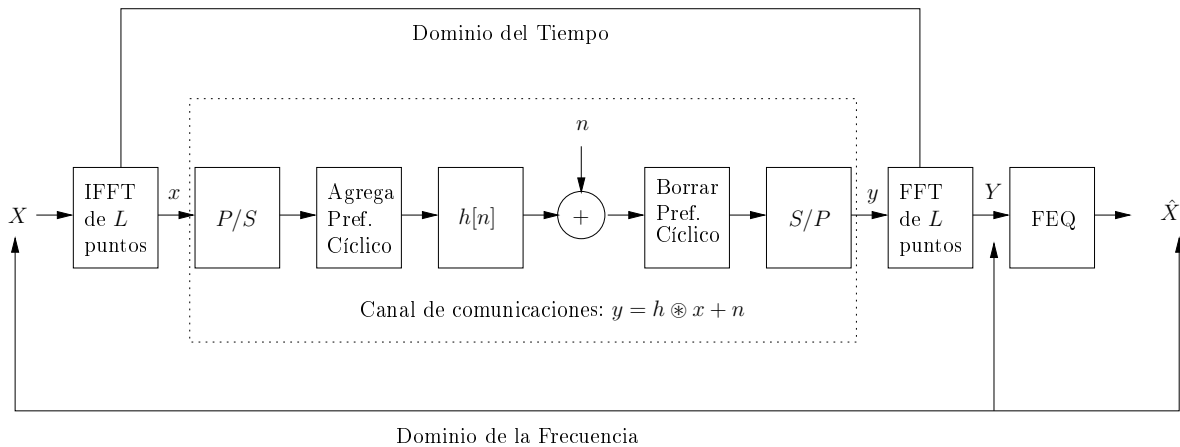


Figura 4.1: Diagrama de bloques de un sistema OFDM

En OFDM la codificación y decodificación de la señal son realizadas en el dominio de la frecuencia, donde X , Y y \hat{X} contienen los L símbolos de datos transmitidos, recibidos y estimados. A continuación se recapitularán los pasos clave de OFDM .

El primer paso es dividir la señal de banda ancha con ancho de banda B en L señales de banda angosta -subportadoras-, cada una de las cuales tiene un ancho de banda B/L . De esta manera la tasa de símbolos se mantiene pero cada subportadora experimenta una comunicación libre de ISI, mientras que se use un prefijo cíclico que exceda la propagación del retraso. Las L subportadoras en un símbolo de OFDM son representadas por un vector X .

Para poder usar sólo un dispositivo de RF de banda ancha en lugar de L de banda angosta, las subportadoras son moduladas usando la IFFT.

Para que la IFFT/FFT pueda separar un canal con ISI en subportadoras ortogonales es necesario agregar un prefijo cíclico de longitud v después de la IFFT. Los resultantes $L + v$ símbolos son enviados en serie a través de un canal de banda ancha.

En el receptor, el prefijo cíclico es descartado y los L símbolos recibidos son demodulados, usando una FFT, lo cual resulta en L símbolos de datos con la forma $Y_l = H_l X_l + N_l$ provenientes de la subportadora l .

Ahora cada subportadora puede ser ecualizada por un FEQ simplemente dividiendo entre la ganancia compleja del canal $H[i]$ para esa subportadora. Esto da como resultado $\hat{X}_l = X_l + N_l/H_l$.

Para esta descripción se ha asumido que el transmisor y el receptor se encuentran perfectamente sincronizados y que el receptor conoce perfectamente el canal para poder realizar el FEQ.

En la tabla 4.1 se enlistan los principales parámetros de OFDM y los valores más ocupados para los sistemas WiMAX móviles.

Símbolo	Descripción	Relación	Valor en WiMAX
B^*	Ancho de banda nominal	$B = 1/T_s$	10 MHz
L^*	Número de subportadoras	Tamaño de la IFFT/FFT	1024
G^*	Fracción de guarda	% de L para el prefijo cíclico	1/8
L_d^*	Subportadoras de datos	L subportadoras piloto/nulas	768
T_s	Tiempo de muestreo	$T_s = 1/B$	1 $\mu\text{seg.}$
N_g	Símbolos de guarda	$N_g = GL$	128
T_g	Tiempo de guarda	$T_g = T_s N_g$	12.8 $\mu\text{seg.}$
T	Tiempo del símbolo de OFDM	$T = T_s(L + N_g)$	115.2 $\mu\text{seg.}$
B_{sc}	Ancho de banda de subportadora	$B_{sc} = B/L$	9.76 KHz

* Son parámetros para WiMAX establecidos; los demás parámetros de OFDM pueden ser calculados con estos valores.

Tabla 4.1: Principales parámetros de OFDM para WiMAX.

4.1.3. Espectro del Multiplexado con División en Frecuencia.

En el Multiplexado con División en Frecuencia (*Frequency Division Multiplexing, FDM*) convencional, cada frecuencia de portadora está separada por una banda de guarda para evitar interferencia. Las frecuencias en la banda de guarda no pueden ser utilizadas

para mandar información. En la figura 4.2 se muestra el espectro de una modulación FDM.

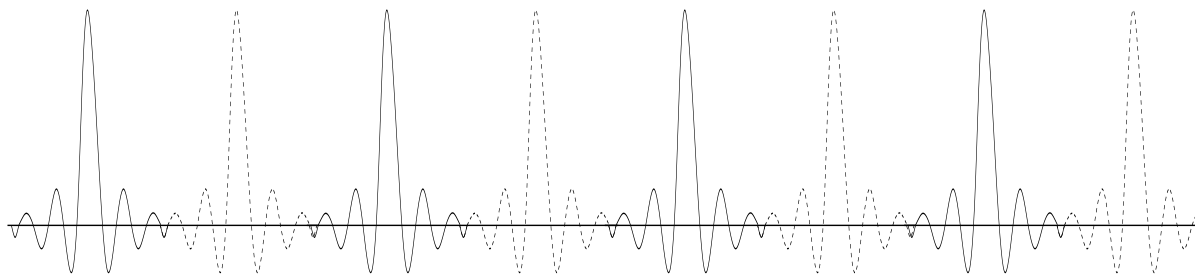


Figura 4.2: Espectro de la modulación FDM.

En OFDM las subportadoras tienen una respuesta en frecuencia con forma de sinc ($\text{sen}(x)/x$) resultando en un traslape en el dominio de la frecuencia. Este traslape no causa interferencia por la ortogonalidad de las subportadoras. En la figura 4.3 se muestra el espectro de OFDM.

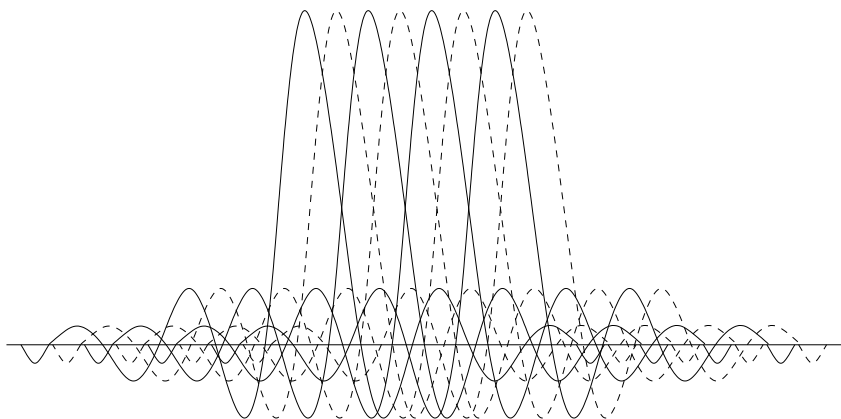


Figura 4.3: Espectro de la modulación OFDM.

El receptor de OFDM usa una FFT sincronizada en tiempo y frecuencia para transformar el símbolo de OFDM del dominio del tiempo al de la frecuencia. En este proceso la FFT toma muestras de las frecuencias, que corresponden a los picos de las subportadoras. A cada una de estas frecuencias, las demás subportadoras pasan por cero eliminando la interferencia entre ellas.

Se puede observar que uno de los pasos más importantes para la realización de la modulación OFDM es la aplicación de la IFFT/FFT, puesto que simplifica de gran manera su implementación.

4.2. La Transformada de Fourier Rápida en OFDM.

La implementación de un sistema OFDM es posible cuando la complejidad del equipo y el consumo de energía son reducidos enormemente al utilizar la FFT en tiempo real para reemplazar el banco de (de)moduladores necesario para cada una de las subportadoras.

Para procesamiento en tiempo real, la FFT requiere de $F(\log_2 N)$ operaciones aritméticas por ciclo de muestreo, donde N es la longitud de la transformada. Se puede lograr el procesamiento en tiempo real de alta velocidad de dos diferentes maneras. De manera convencional, mediante un procesador de propósito general, un solo procesador que realice la transformada con una frecuencia de reloj muy alta, la cual es $F(\log_2 N)$ veces la frecuencia de muestreo. La otra manera es utilizar una aplicación específica, mediante procesadores en paralelo o pipeline, con frecuencias de reloj cercanas o equivalentes a la frecuencia de muestreo. Ésta solución ha resultado ser la más preferida cuando el consumo de energía está limitado por el ambiente en el que se encuentra la aplicación, como son las comunicaciones móviles.

Existen varias arquitecturas que han sido propuestas con diferentes enfoques. Las arquitecturas de pipeline tienen las ventajas del paralelismo, por lo que usualmente son muy rápidas pero no son tan flexibles y requieren de mayor complejidad en hardware.[11] Las arquitecturas de estos procesadores requieren unidades en donde se realizan las estructuras de mariposa de la transformada rápida de Fourier.

A continuación se mencionan algunas arquitecturas de pipeline:

Radix-2 Multi-path Delay Commutator (R2MDC). Es una implementación del algoritmo FFT Radix-2. La secuencia de entrada se divide en 2 cadenas de datos paralelas, las cuales, con la distancia correcta entre elementos, entran a las mariposas. Se requieren $\log_2 N - 2$ multiplicadores, $\log_2 N$ mariposas Radix-2 y $3/2N - 2$ registros.

Radix-2 Single-path Delay Feedback (R2SDF). Usa el registro más eficientemente al guardar la salida de la mariposa en el registro de realimentación. Una sola cadena de datos pasan por los elementos en cada etapa. Tiene el mismo número de elementos que la arquitectura R2MDC pero con menos registros, $N - 1$

Radix-4 Single-path Delay Feedback (R4SDF). Una versión del R2SDF con el algoritmo FFT Radix-4. Guarda 3 de los 4 valores resultantes por la realimentación. Requiere $\log_4 N - 1$ multiplicadores, $\log_4 N$ mariposas completas de Radix-4 y $N - 1$ registros.

Radix-4 Multi-path Delay Commutator (R4MDF). Es la versión Radix-4 del R2MDF. Se pueden procesar 4 FFTs simultáneamente. Requiere de $3\log_4 N$ multiplicadores, $\log_4 N$ mariposas Radix-4 y $5/2N - 4$ registros.

Radix-4 Single-path Delay Commutator (R4SDC). Utiliza 1/4 de la mariposa Radix-4, un multiplexor en el conmutador de retardos que reduce la memoria requerida a

$2N - 2$, manteniendo el número de componentes igual que el R4MDF.

Las arquitecturas con delay-feedback son más eficientes que las que utilizan delay-commutator con respecto a la utilización de la memoria. Las arquitecturas basadas en el algoritmo Radix-4 utilizan más el multiplicador, las basadas en el Radix-2 tienen mariposas más simples.[12]

Los principales algoritmos de la FFT ocupados en estas arquitecturas, como se puede observar, son el Radix-2 y el Radix-4, así como derivados de estos mismos. En el siguiente capítulo se describen estos dos algoritmos de la FFT.