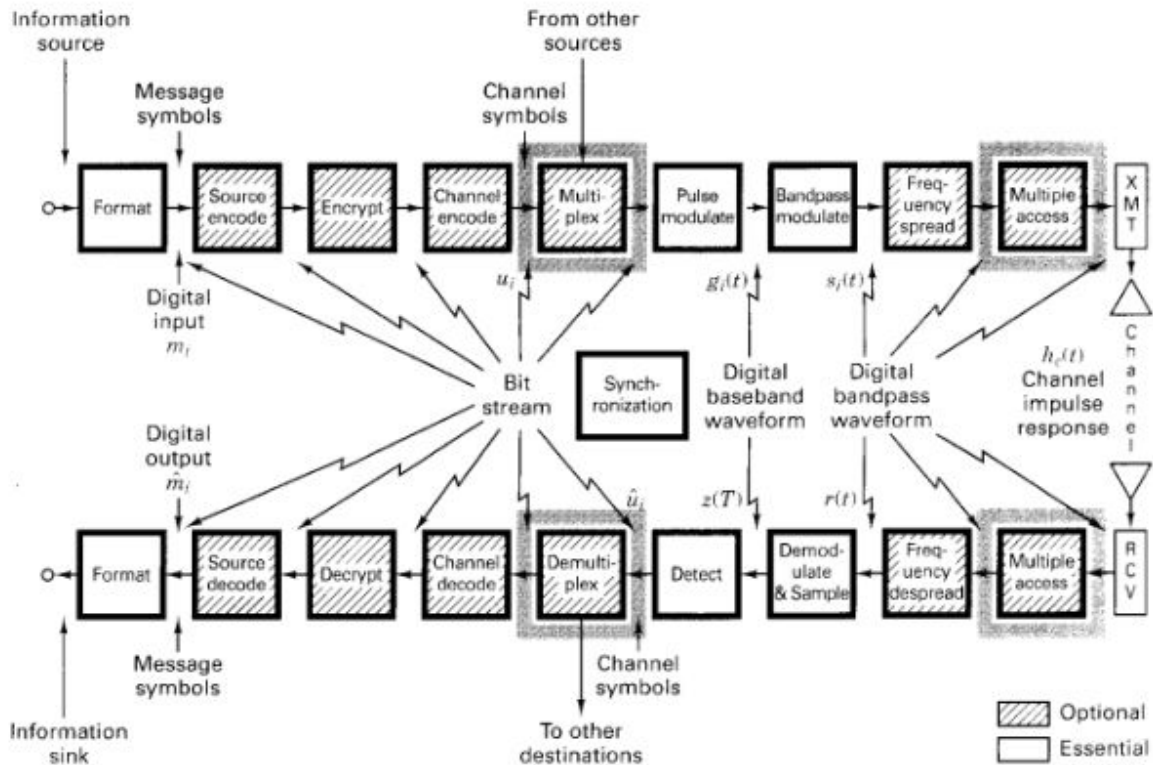


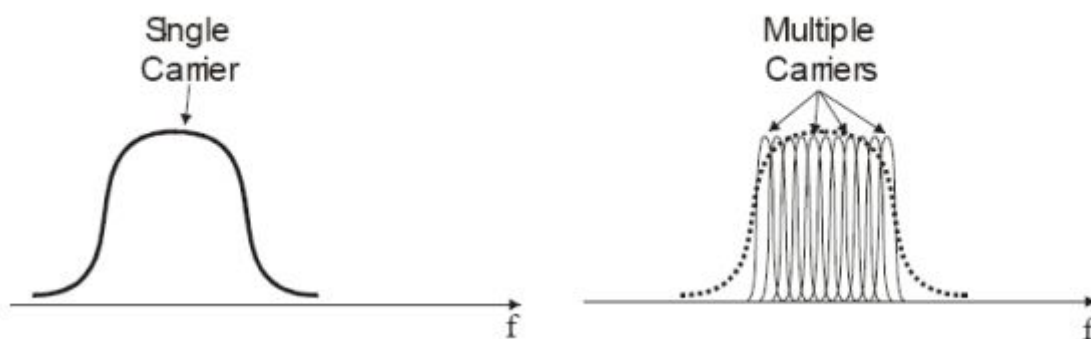
Métodos de Acceso

Capítulo 8: Modulación y Demodulación OFDM

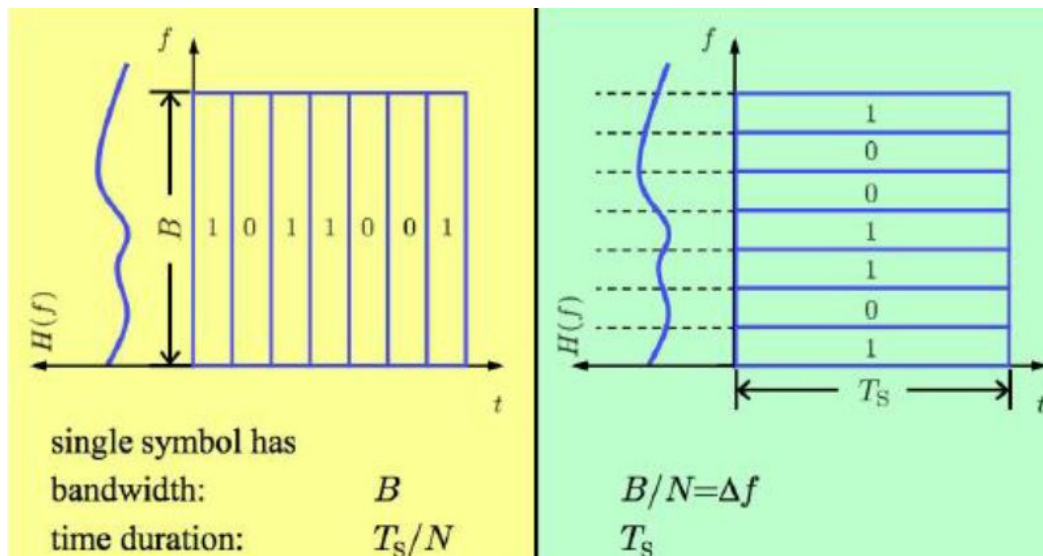


¿Qué es OFDM? OFDM corresponde a una técnica de modulación denominada *Multiplexación por división de frecuencias ortogonales*, en donde su principal cualidad consiste en la transmisión de forma simultánea de varias waveform con información. Es decir, se transmite en diferentes regiones espectrales, al mismo tiempo un conjunto de waveform de un determinado flujo de bits.

En técnicas de modulación por single carrier como ASK, PSK y FSK se realizan transmisiones en serie ocupando todo el ancho de banda disponible símbolo a símbolo, mientras que en un esquema de modulación multiportadora cada waveform es transmitida paralelamente en subportadoras adyacentes, es decir, utilizando algún tipo de multiplexaje por división en frecuencia (FDM).



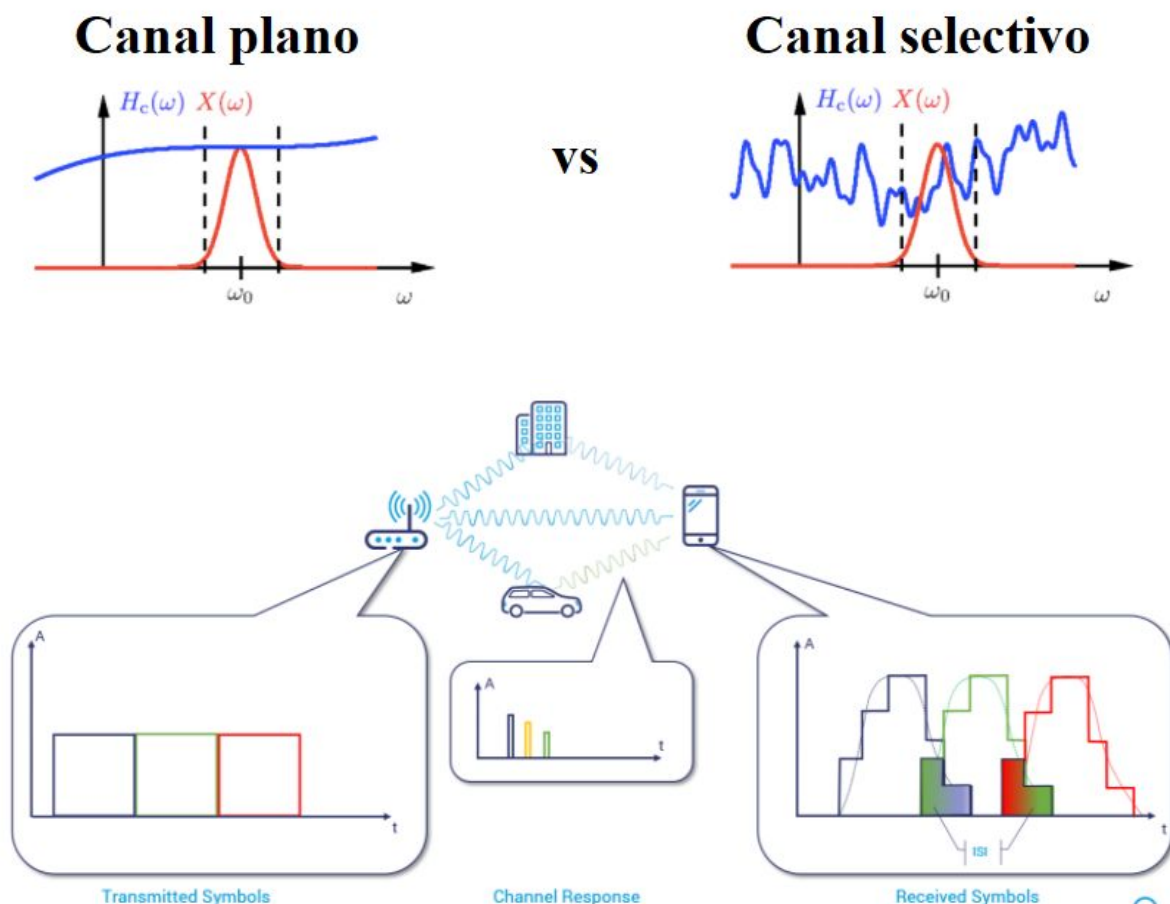
¿Pero entonces cuál es la diferencia con OFDM? Que existe un único símbolo transmitido de una duración mayor "NTs". Compuesto de múltiples waveform provenientes de N sistemas de modulación lineales, preferentemente M-PSK o QAM que transportan la información en diferentes regiones espectrales más pequeñas (B/N).



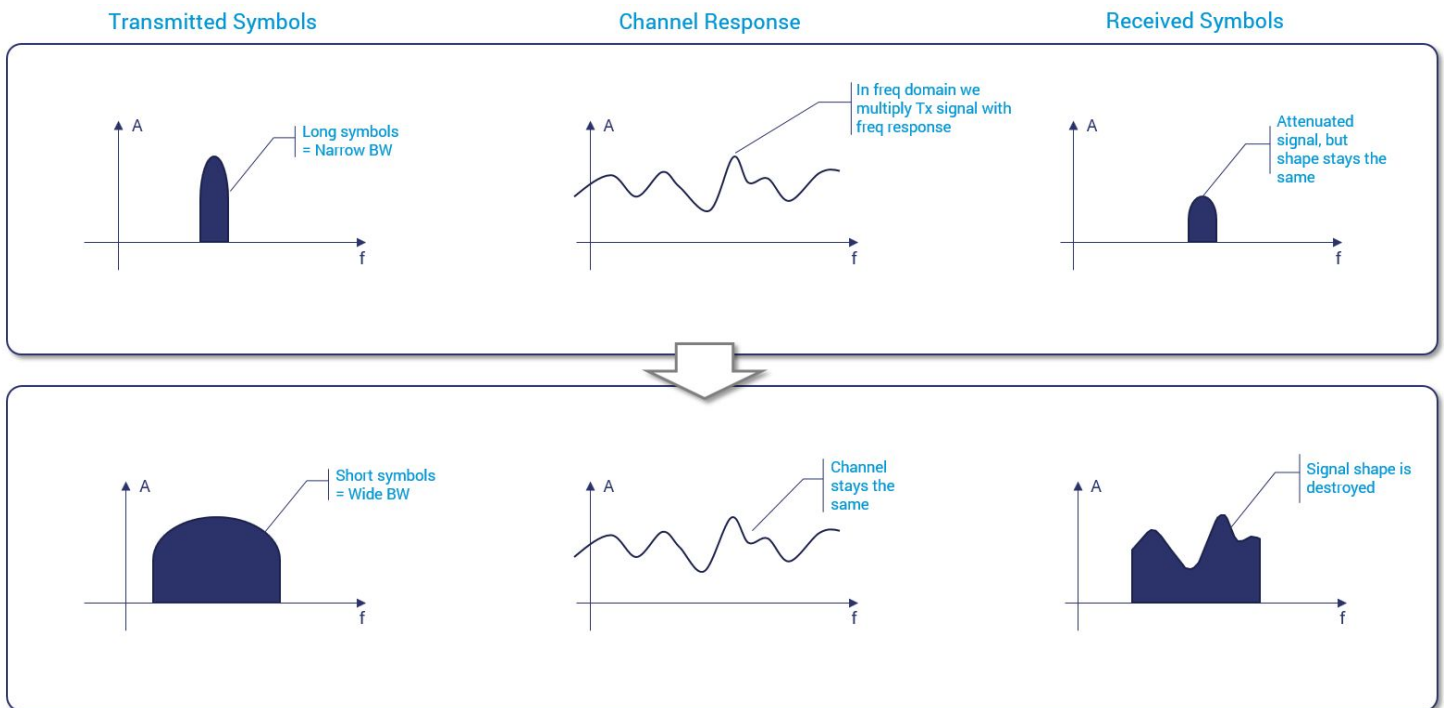
Estas características de funcionamiento de los esquemas multiportadora trae como ventaja un mejor aprovechamiento del ancho de banda disponible o eficiencia espectral. Cuando en un esquema de modulación convencional se requiere un ancho de banda "B" para transmitir los datos a una tasa "Rb", para los esquemas OFDM se requiere un ancho de banda "B/N". Esta ventaja de OFDM se potencia con la capacidad que tienen estos sistemas para hacer frente a canales selectivos en frecuencia, lo que los convierte en fuertes candidatos para aplicaciones inalámbricas. ¿Qué otro sistema era robusto frente al desvanecimiento selectivo? CDMA mediante las aplicaciones DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum) utilizando receptores Rake y FH (Frequency hopping Spread Spectrum) mediante Fast frequency hopping. En el primer caso, los multicaminos eran directamente aprovechados gracias a las características propias de los códigos pseudoaleatorios PN, ya que cualquier señal multicamino que difiera de la señal de camino directo en un tiempo mayor a la duración de un tiempo de chip podría ser despreciada siempre y cuando existiera un sincronismo perfecto entre la señal recibida por camino directo y el código generado de forma local. Al discriminar cada señal recibida por los retardos mayores a un tiempo de chip, se coloca múltiples receptores con versiones de código PN sincronizadas a cada multicamino para que su aporte sea constructivo a la señal de camino directo. La segunda opción, Fast Frequency hopping propone como solución realizar saltos en frecuencia más rápidos que el multicamino más veloz, permitiendo obtener robustez frente a todas las señales interferentes. Sin embargo ¿Por qué no se utilizan directamente técnicas de modulación asociadas a CDMA para combatir los canales selectivos en frecuencia? Porque son muy ineficientes espectralmente. Los sistemas CDMA son diseñados para combatir otro tipo de dificultades dentro de los sistemas de comunicación. Estos sistemas requieren la utilización de un ancho de banda mucho mayor al necesario por cualquier esquema de modulación convencional con la finalidad de lograr buenas prestaciones en situaciones de gran congestión en el rango espectral a utilizar, entiéndase interferencias de otros sistemas funcionando en la misma región del espectro. Esto hace que las técnicas de modulación

asociadas a CDMA tengan una baja eficiencia espectral ya que su foco se encuentra en otro aspecto.

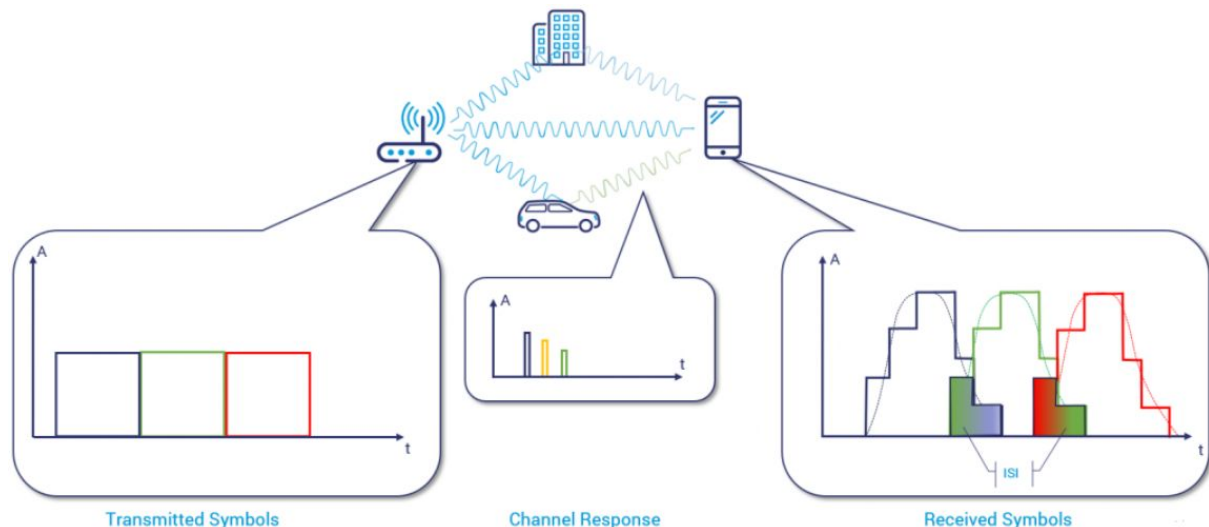
De esta forma, frente a canales selectivos en frecuencia, una buena opción cuando no existe interferencia de usuarios no autorizados es OFDM. Esta característica de los canales para las distintas técnicas estudiadas previamente se ha contemplado mediante la implementación del concepto de ecualizaciones, buscando la función inversa de transferencia del canal, por lo que es interesante recordar y preguntarse ¿En qué consiste un canal selectivo en frecuencia? Por definición corresponde a un canal de comunicaciones cuyas características espectrales no presentan una respuesta en frecuencia plana en el módulo para todo el ancho de banda de interés ni una fase lineal.



Esto significa que cada componente en frecuencia tendrá una atenuación y desfase distinto. En estas condiciones, la señal de salida del canal de comunicaciones " $y(t)$ " está lejos de ser una versión retardada y escalada en el tiempo de la señal de entrada " $x(t)$ ", es decir, no se cumple que $y(t) = x(t - t_d)$, lo que constituye las condiciones ideales de un canal de comunicación.



¿Qué efectos físicos generan este comportamiento en los canales de comunicación? Uno de ellos es el multicamino. El modelo básico e ideal planteado para un canal de comunicaciones funciona siempre y cuando a la llegada del receptor no se haga presente ecos o rebotes de la señal transmitida, llegando únicamente la señal denominada directa. En el caso de que se produzcan múltiples reflexiones de la señal sobre objetos o elementos presentes (como sucede en las comunicaciones del tipo inalámbricas) entre el transmisor y receptor, al medir la respuesta impulsional del canal a la entrada del receptor se encontrará:

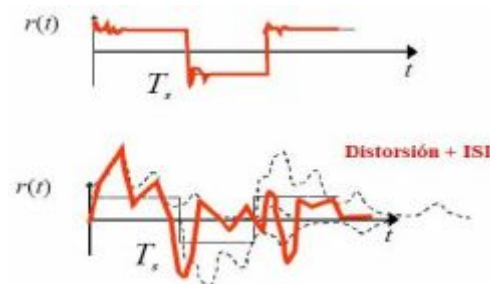


Donde cada réplica producto de las reflexiones, sufrirá una atenuación diferente por la diferencia de caminos recorridos. Se sabe que la atenuación en espacio libre es una función del cuadrado de la distancia y la frecuencia por lo tanto existirán infinitos multicaminos posibles pero solo algunos y principalmente los primeros, con niveles de energía lo suficientemente grandes como para aportar interferencia intersímbolo. Este fenómeno está parametrizado por la dispersión del retardo o delay spread, que mide la duración temporal

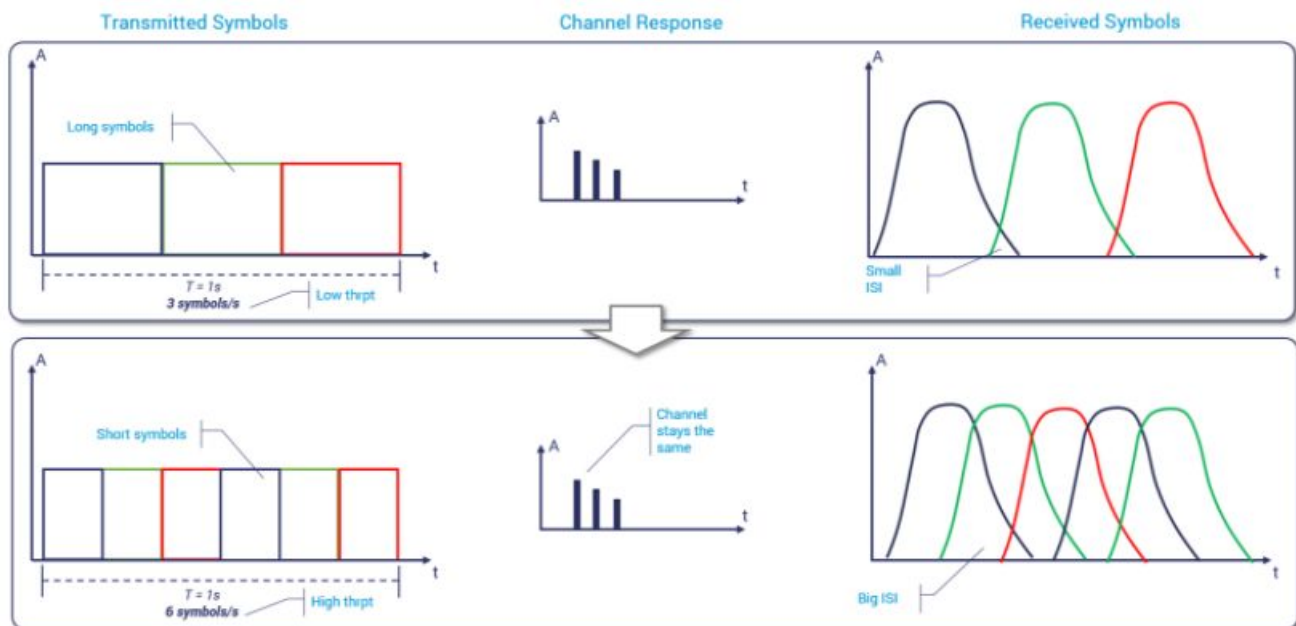
de la respuesta al impulso, es decir, el tiempo hasta que se hace presente el último multicamino significativo. El parámetro delay spread comúnmente se lo define como " τ ". Lo importante de este concepto es que permite obtener el **ancho de banda de coherencia**. ¿Pero qué es el ancho de banda de coherencia? Es la separación en frecuencia que satisface que la respuesta en frecuencia del canal tiene un nivel de correlación estipulado. En la práctica, este parámetro intenta determinar el ancho de banda dentro del cual el comportamiento del canal se puede considerar constante.

$$B_c = \frac{1}{\tau}$$

De esta forma, se puede concluir que para evitar la interferencia intersimbólica producida por el multicamino, es necesario que los tiempos de símbolo del sistema de comunicación a implementar sean como mínimo la inversa al ancho de banda de coherencia. ¿Significa que estamos limitados a una tasa de transmisión máxima? Si, si el objetivo es simplificar el proceso de ecualización de canal.



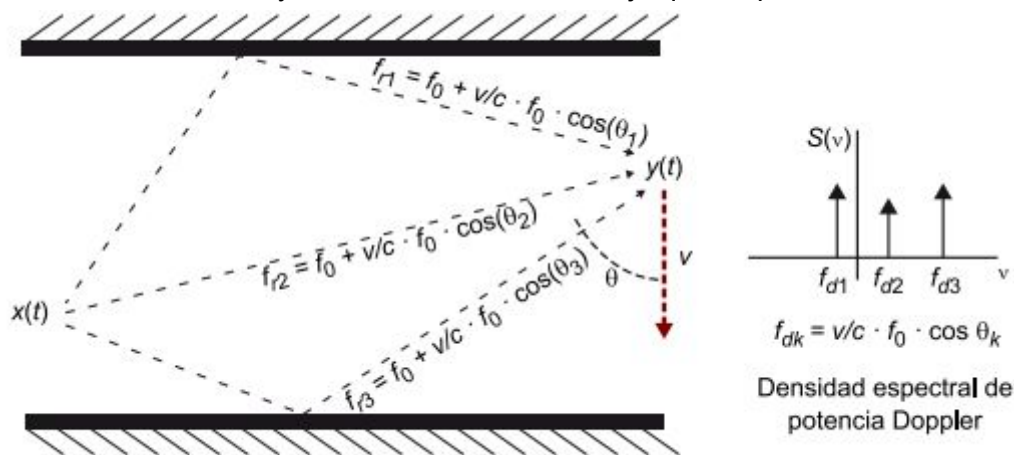
En caso contrario, deberán aplicarse técnicas complejas de ecualización para hacer frente a los efectos de un canal con fading.



Sin embargo, existe otra limitante más definida como **tiempo de coherencia**. ¿Por qué? Porque el canal varía en el tiempo, lo que significa que su respuesta en frecuencia, tanto módulo como ángulo, varían en el tiempo. Este tiempo está definido como tiempo de coherencia. ¿Cuál es el fenómeno físico para que esto ocurra? El movimiento de alguno de los dispositivos que forman parte del enlace o los objetos interferentes sobre los cuales se producen las reflexiones. Aunque frecuentemente para el caso de las comunicaciones

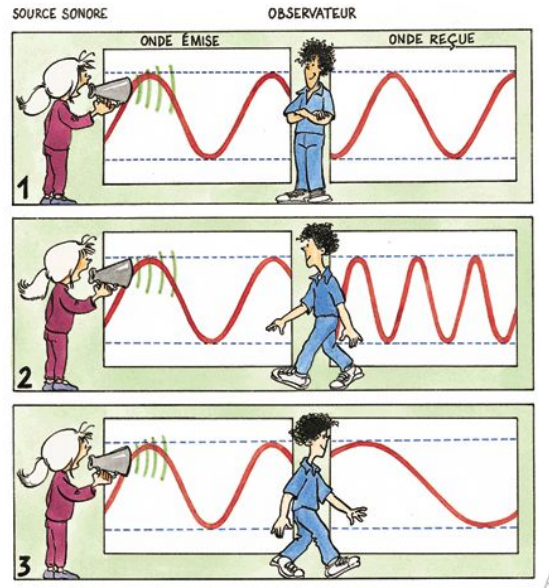
móviles, esto se produce por movimiento de los sistemas receptores. A este fenómeno se lo denomina efecto Doppler. Un objeto en movimiento observa un efecto Doppler que implica una desviación en la frecuencia nominal de la señal transmitida y depende de la velocidad relativa del movimiento (es decir, de la velocidad nominal del movimiento y del coseno del ángulo entre el vector de llegada de la señal y el vector del movimiento). Si se piensa en un escenario en el que la señal recibida está formada por una infinidad de rayos que llegan en el mismo instante de tiempo debido a la diferencia de caminos, se puede afirmar que cada rayo tiene un ángulo diferente de llegada, y por lo tanto el efecto Doppler que experimenta la señal en cada rayo presenta una desviación de frecuencia diferente. Es lo que en inglés se denomina Doppler spread.

Para entender el concepto, se puede plantear un ejemplo: Imaginemos que un receptor en movimiento a una determinada velocidad " v " recibe un tono puro de frecuencia f_o enviado desde un transmisor a través de un canal con multicamino; debido al multicamino, en la recepción se reciben tres rayos, tal como indica el dibujo que se plantea a continuación.



El espectro de la señal transmitida sería una delta dirac en la frecuencia f_o debido al movimiento relativo entre el transmisor y el receptor, cada uno de los rayos que inciden en el receptor experimentarían un efecto Doppler diferente, de modo que la frecuencia recibida será $f_{dopp(k)} = f_o + \frac{v}{c} \cdot f_o \cdot \cos(\theta_k)$. En consecuencia, el receptor, en lugar de recibir un tono puro, recibirá tres tonos en las frecuencias f_{r1} , f_{r2} y f_{r3} , de modo que el espectro de la señal recibida estará formado por tres deltas dirac en las frecuencias mencionadas. De esta forma, se puede afirmar que se ha producido una dispersión frecuencial, ya que la energía, que estaba concentrada en el transmisor en una sola frecuencia, se ha dispersado en tres frecuencias.

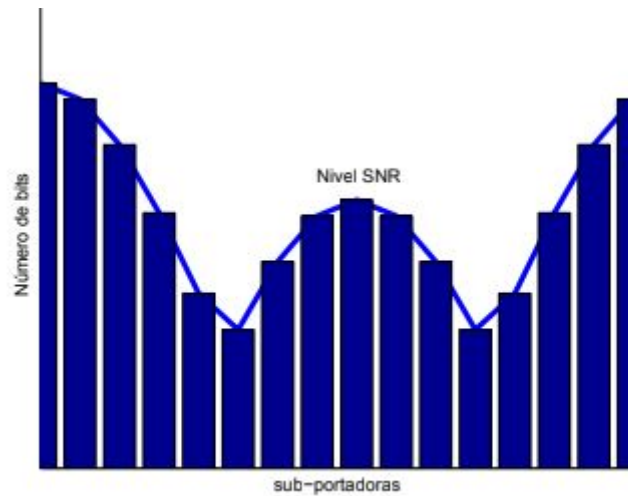
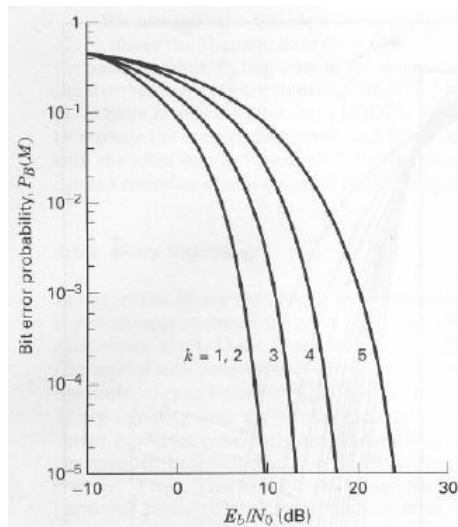
Otro ejemplo, pero más sencillo, consiste en considerar que el ángulo entre la señal recibida y la velocidad del receptor sólo pueden variar entre 0 grados y 180 grados y existe una única señal recibida, el efecto doppler será el que se muestra en la figura:



Estos permiten definir que el límite superior para el tiempo de símbolo es el tiempo de coherencia del canal que significa el intervalo de tiempo durante el cual el canal permanece invariante en el tiempo. Como se detalló anteriormente, está en función de la dispersión máxima de doppler por lo que se puede definir como:

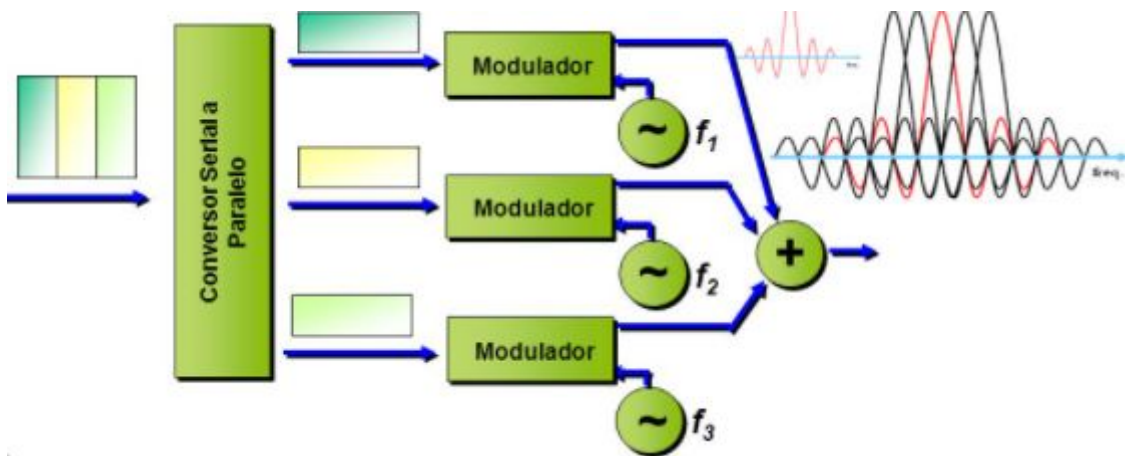
$$T_c = \frac{1}{f_{\max\text{dopp}}}$$

Con ambos parámetros, OFDM propone transmitir símbolos con una duración comprendida entre $\frac{1}{B_c} < T_{OFDM} < T_c$ manteniendo la tasa original de información. Para que esto sea posible se emplean “N” moduladores digitales en paralelo, con una tasa de “Rb/N” a su entrada. A la salida de los mismos, todas las waveform deben tener la misma duración: T_{OFDM} . Esto obliga a que en un principio, todos los moduladores digitales deben ser iguales. Pero el requerimiento está en el tiempo de símbolo, por lo tanto, puede utilizarse “N” fuentes de información independientes y paralelas en lugar de una única como se considera en un inicio. Estas fuentes pueden tener diferentes tasas de información “Rb” pero en su rama, luego del proceso de modulación digital deben respetar todas el mismo tiempo de símbolo. Esta característica que plantea OFDM es muy valiosa porque hace independiente a cada rama dentro del esquema de acuerdo a la performance que obtiene dentro de la región espectral a la cual está trabajando. Cada fuente puede aumentar la tasa y modificar el esquema de modulación M-PSK (aumentandolo) para mantener el mismo tiempo de símbolo y permitirse transmitir más bit por símbolo siempre y cuando la performance para dicho esquema lo permita. De esta manera, aquellas regiones espectrales que se vean más perjudicadas por el ruido, tendrán sus esquemas dentro del sistema OFDM con tasas más bajas y esquemas de modulación más pequeños, lo cual para M-PSK contribuía a una mejor performance, de igual manera ante un canal favorable, la tasa y el esquema M-PSK puede ser aumentado. Esta característica vuelve a confirmar el uso eficiente y el mejor aprovechamiento del espectro asignado.

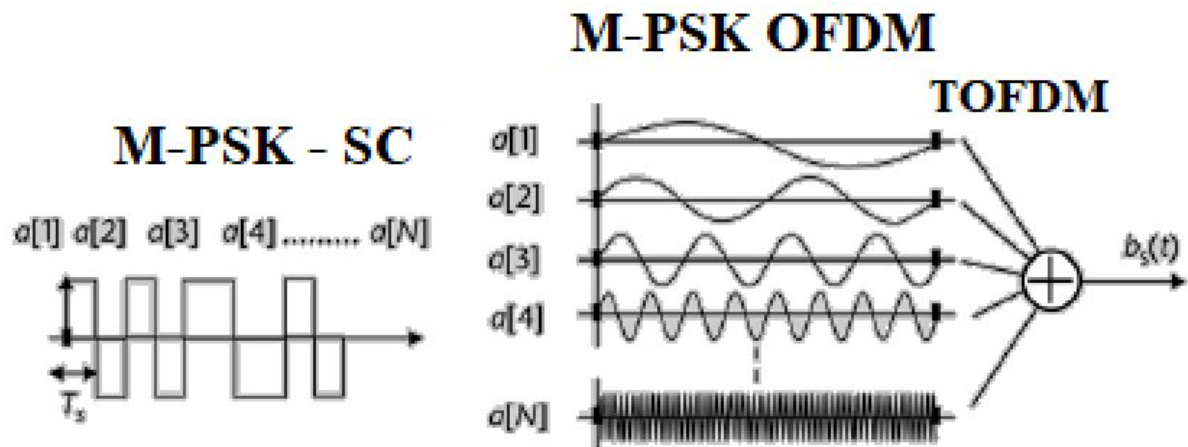


Modulador OFDM

Para poder tener presente la implementación que lleva con sí OFDM, se presenta cómo se conformaba un sistema transmisor de manera muy elemental, teniendo la siguiente estructura:



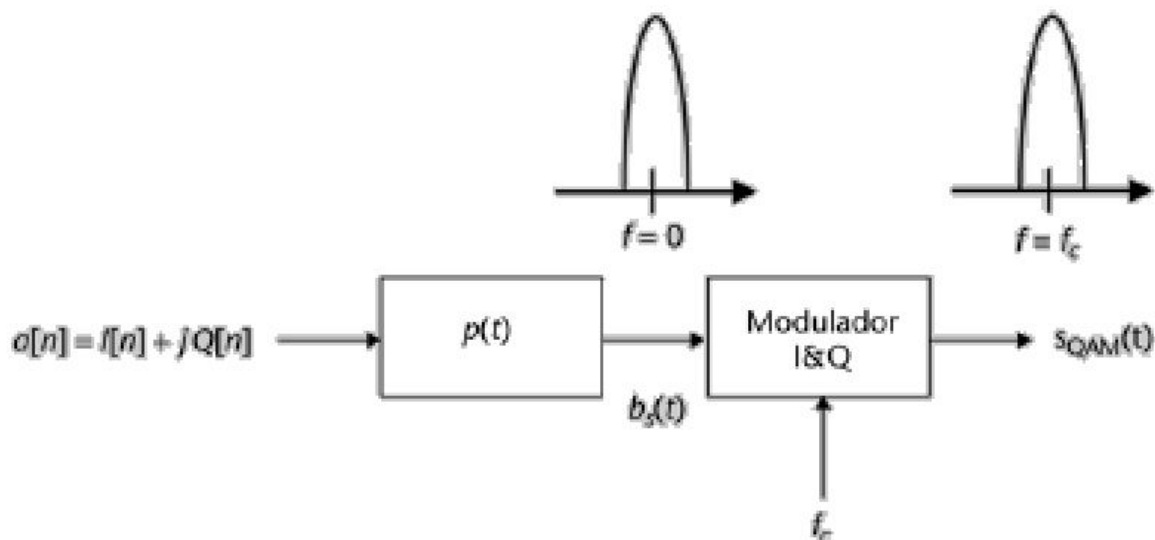
Como se aprecia en la imagen anterior, el modulador consta de un conversor serie a paralelo que entrega en cada una de las ramas salientes, una tasa de información de " R_b/N " para alimentar a N moduladores digitales M-PSK utilizando una frecuencia f_i que resultan ser mutuamente ortogonales en el tiempo T_{OFDM} . Como resultado, las frecuencias f_i son asignadas como múltiplos enteros de $\frac{1}{T_{OFDM}}$ definido como tasa de símbolo OFDM.



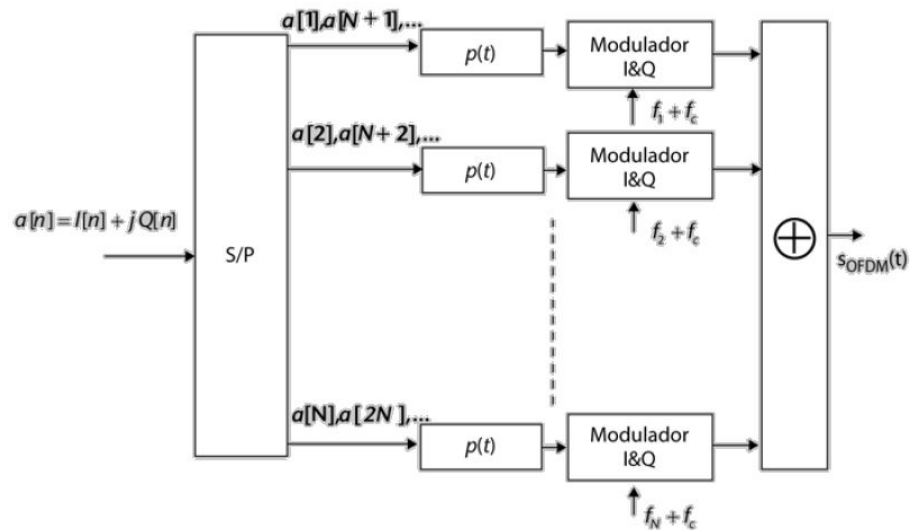
Luego todas las waveform construidas por dichos procesos son aplicadas a un sumador conformando una única waveform para ser entregada al canal de comunicación.

$$s_{OFDM}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_{M-PSK}(t)$$

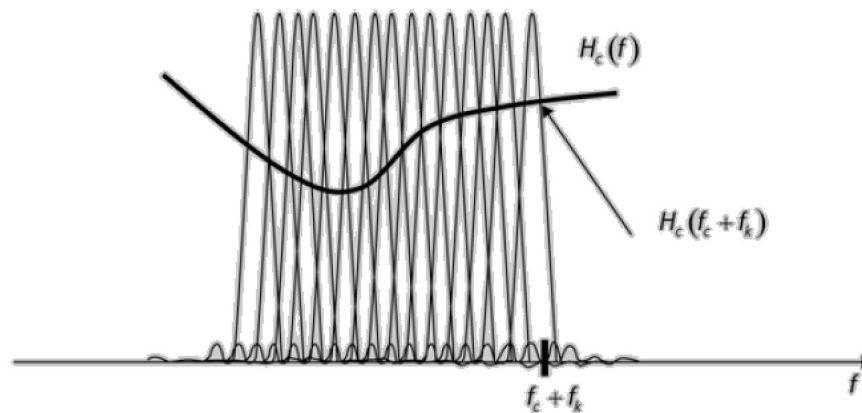
En esta estructura, al tener en cada rama, un esquema de modulación idéntico al resto, se puede pensar en otro esquema, donde el modulador se encuentra antes del conversor serie paralelo. Entonces, los símbolos entregados por el modulador se aplican al conversor y en cada rama se tendrá únicamente un pulso formador de onda “p(t)” que le dará las características espectrales a cada waveform. En el caso de tratarse de un pulso formador de onda rectangular, de duración T_{OFDM} , las características espectrales acusarán un comportamiento en el dominio de la frecuencia correspondiente a una Sinc con cruces por cero de lóbulo principal en $\frac{1}{T_{OFDM}}$. Estas formas de onda son aplicadas a un modulador I&Q para centrar dicha waveform en la región espectral que corresponda.



Entonces el esquema puede ser representado de la siguiente forma:

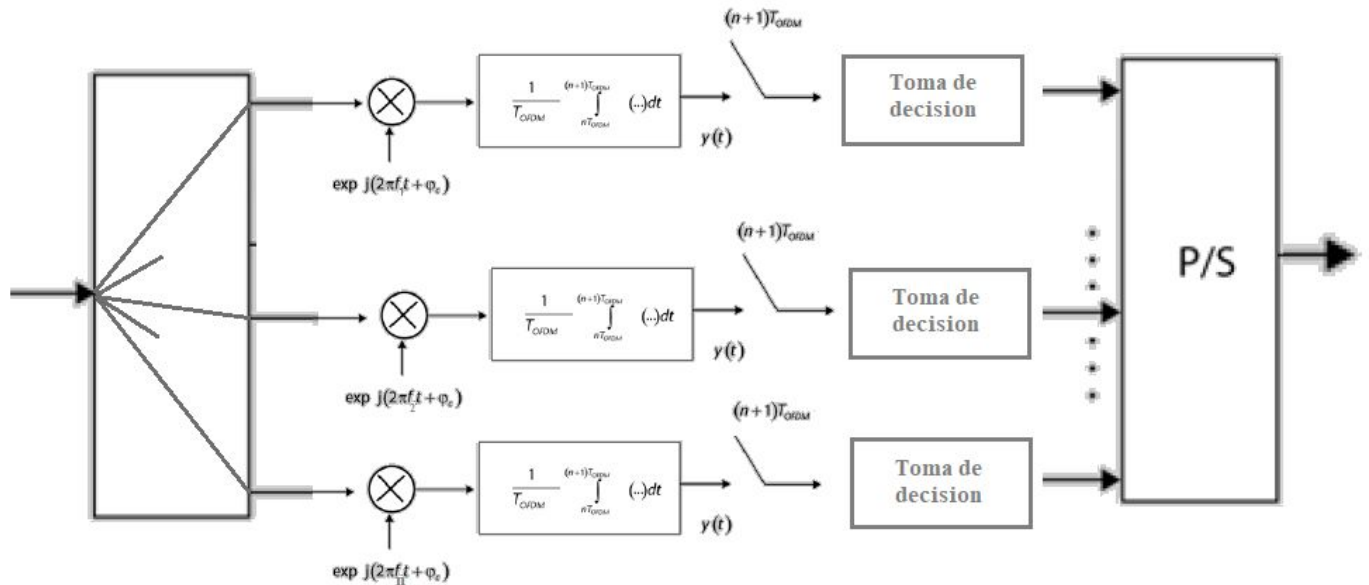


La contribución de cada rama al símbolo OFDM genera las siguientes características espectrales en el dominio de la frecuencia:



Un demodulador digital está conformado por dos bloques básicos, uno denominado transformación de waveform a muestras y otro denominado proceso o toma de decisión. Estos dos bloques están presentes por cada rama del demodulador OFDM, ya que deben realizarse procesos de demodulación en paralelo, al igual que las modulaciones que se realizaron dentro del transmisor OFDM.

En cada rama, el primer paso implica la utilización de filtros acoplados diseñados específicamente para cada forma de onda que es enviada por el transmisor y que se hace presente a la entrada del receptor. La finalidad de este filtro es obtener a la salida una muestra $Z(T_s)$ cuyo valor representa la máxima relación señal a ruido respecto a la entrada para lograr realizar de la mejor forma posible la toma de decisiones. Sin embargo, los filtros acoplados se implementan mediante correladores (multiplicadores e integradores) donde se utilizan señales bases (componentes en fase y cuadratura) para optimizar la implementación de dicho proceso. Teniendo presente estos conceptos se puede pensar en un diagrama general como se plantea en la siguiente figura:



¿Cual es el problema con esta implementación? Que en ambos dispositivos, tanto modulador como demodulador, se requieren la utilización de múltiples osciladores muy precisos y estables, ya que deben mantener estrictamente la ortogonalidad entre frecuencias. Además, asumiendo que la cantidad de ramas en paralelo es elevada, los costos de implementación de dicho esquema harían de OFDM una aplicación inviable.

Sin embargo, al observar la señal transmitida en cada tiempo de símbolo OFDM se puede observar que:

$$s_{OFDM}(t) = Re \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} a_k p(t) e^{j2f_k t} \right\}$$

como " f_k " corresponde a las frecuencias de los osciladores asociados a cada rama, puede reemplazarse por la expresión: $f_k = f_0 + kR_{OFDM}$.

$$s_{OFDM}(t) = Re \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} a_k p(t) e^{j2(f_0 + kR_{OFDM})t} \right\}$$

$$s_{OFDM}(t) = Re \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot e^{j2kR_{OFDM}t} \cdot p(t) \cdot e^{j2f_0 t} \right\}$$

$$s_{OFDM}(t) = Re \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} [a_k e^{j2kR_{OFDM}t}] \cdot p(t) \cdot e^{j2f_0 t} \right\}$$

Es decir, que puede entenderse a la señal OFDM como una señal " $s(t)$ " con una modulación de canal a la frecuencia " f_0 ". La señal $s(t)$ es la que se construye mediante un banco de osciladores y se busca mediante algún procedimiento más efectivo evitar dicha etapa.

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{j2kR_{OFDM}t}$$

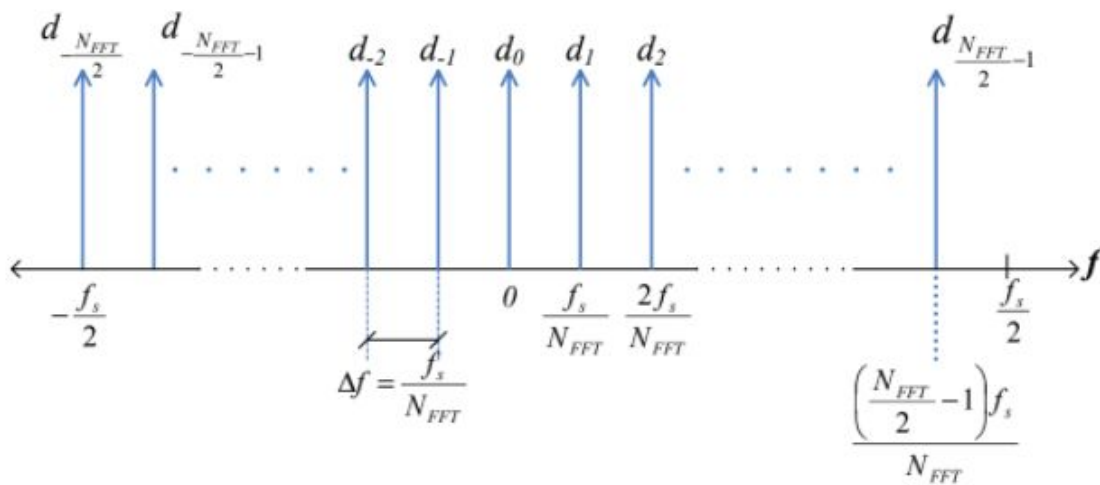
Se sabe que las señales $s(t)$ pueden ser construidas mediante sus muestras discretas, siempre y cuando se cumplan con los requerimientos de muestreo planteados por Nyquist. De esta forma, las muestras discretas pasan por un conversor digital analogico cada " T_s " para reconstruir una señal aproximadamente igual a " $s(t)$ ".

Entonces, el fin es obtener mediante algún procedimiento las muestras discretas de la señal “s(t)” y construirla directamente mediante un conversor D/A. Estas consideraciones llevan a asociar a la señal a la siguiente forma:

$$S[n] = S(t)|_{t=nT_s}$$

Es importante remarcar que la señal s(t) tiene componentes espectrales en banda base desde $-(N/2)R_{OFDM}$ hasta $((N/2)-1)R_{OFDM}$. Por lo tanto se muestrea esta señal analógica considerando $F_{\text{sampling}} = N \cdot R_{OFDM} = B$.

$$f_k = \frac{k \cdot f_s}{N_{FFT}} + f_0, \quad k \in \left[-\frac{N_{FFT}}{2}, \frac{N_{FFT}}{2} - 1 \right]$$



Disposición de los datos en los canales de frecuencia ortogonales contiguos en OFDM

De manera que:

$$S[n] = \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{j2kR_{OFDM}nT_s}$$

$$S[n] = \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{j\frac{2}{N}kn}$$

Al inspeccionar esta última ecuación, se encuentran muchas semejanzas con la transformada inversa fourier discreta, que se define como:

$$x[n] = DFT^{-1} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cdot e^{j\frac{2}{N}k \cdot n}$$

por lo que se deduce que la señal S[n] es la transformada inversa de fourier discreta (DFT⁻¹) escalada por un factor N de los valores a la salida de los consteladores, los cuales también son discretos.

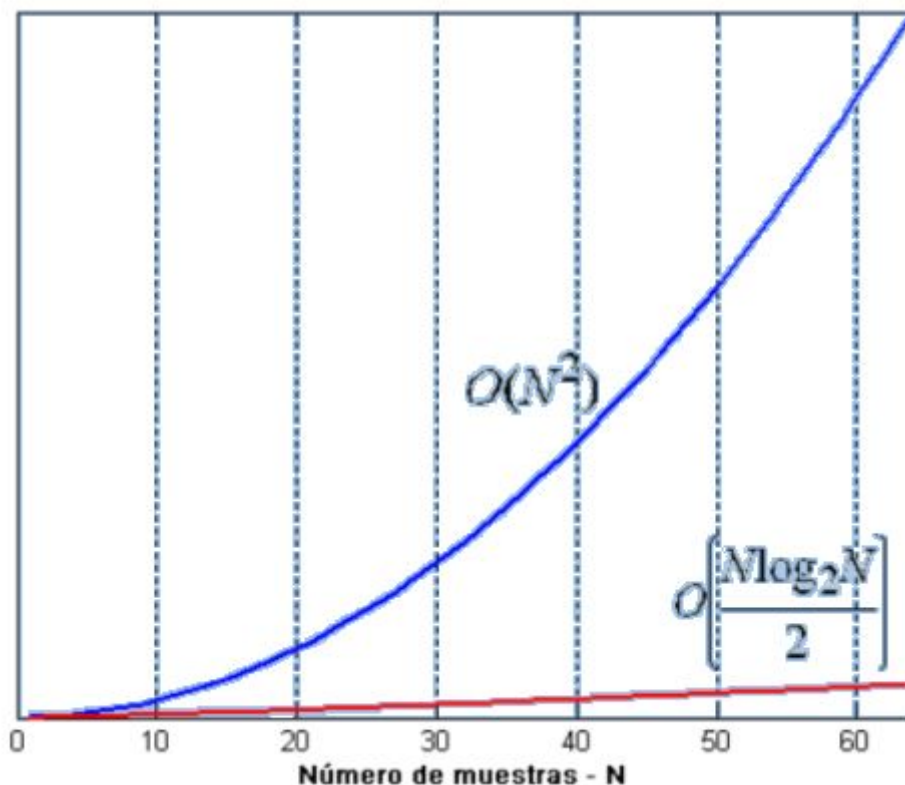
$$S[n] = N.DFT^{-1}[a_k]$$

(Weinstein y Ebert, 1971) Fueron los primeros en realizar el desarrollo matemático que permitía aplicar la Transformada de Fourier Discreta (DFT) a los sistemas de transmisión de datos paralelos como parte del proceso de modulación y demodulación. De esta forma se logró sustituir los bancos de osciladores de las subportadoras y de los demoduladores coherentes requeridos por FDM para el sistema OFDM.

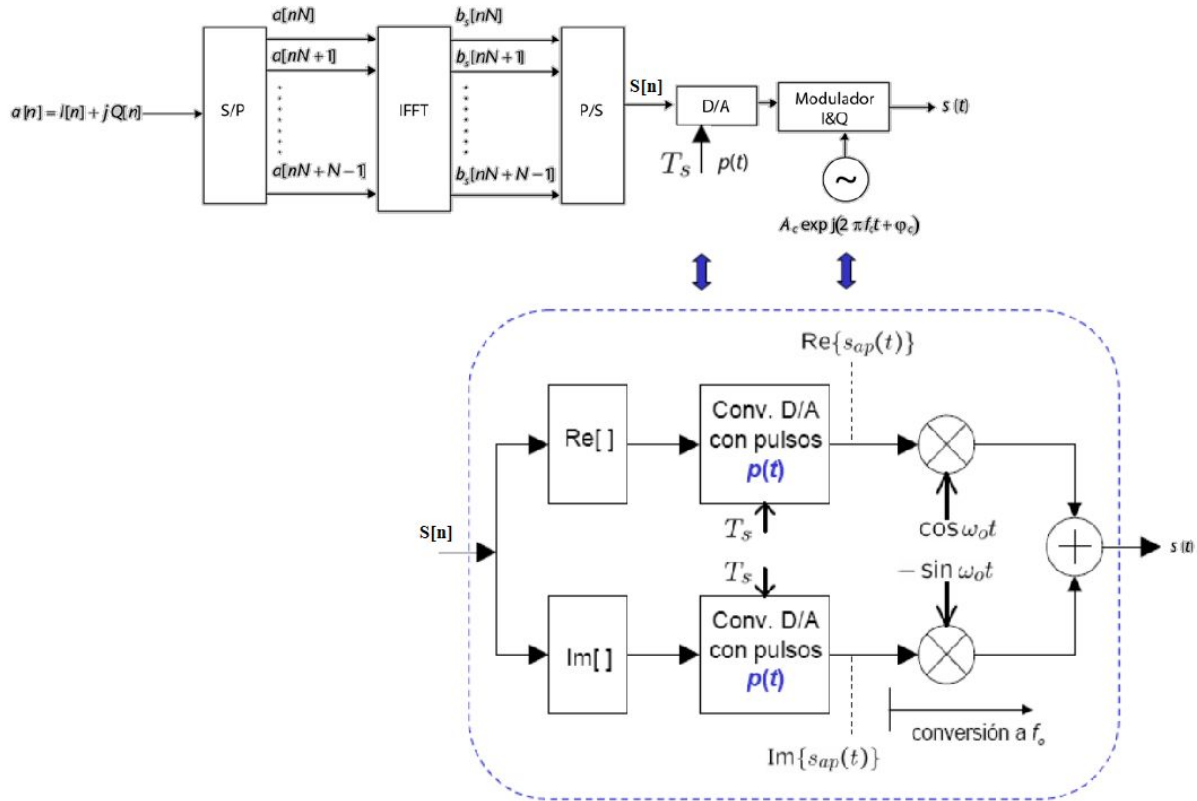
La operación de la DFT o su inversa, implica para su cálculo la realización de sucesivas multiplicaciones y sumas, además de los gastos de memoria que crecen de acuerdo al valor de muestras. Considerando el algoritmo basado en lazos, es decir, la realización secuencial de N_s operaciones (multiplicaciones) por cada valor de k , el esfuerzo computacional asciende en función N_s^2 .

Con el objetivo básico de reducir dicho número de multiplicaciones, fue diseñada la denominada “Transformada Rápida de Fourier” o FFT, en el cual reduce la cantidad de cálculos iterativos a $\frac{N \log_2(N)}{2}$, siendo N la cantidad de subportadoras para OFDM.

La siguiente figura muestra la gran diferencia entre los dos algoritmos en cuanto al número de cálculos realizados, lo que justifica plenamente su uso, no obstante su complejidad. La FFT logra la eficiencia algorítmica a través de la estrategia “divide y vencerás”. La idea básica es que un grupo de N muestras de la sumatoria de la DFT pueden ser expresadas como una combinación de sumatorias de DFT de $N/2$ muestras. Siendo así, cuando N es una potencia de dos, el proceso se puede repetir hasta llegar al caso de la simple sumatoria para DFT de solo 2 muestras. Podemos concluir que el proceso es además recursivo.



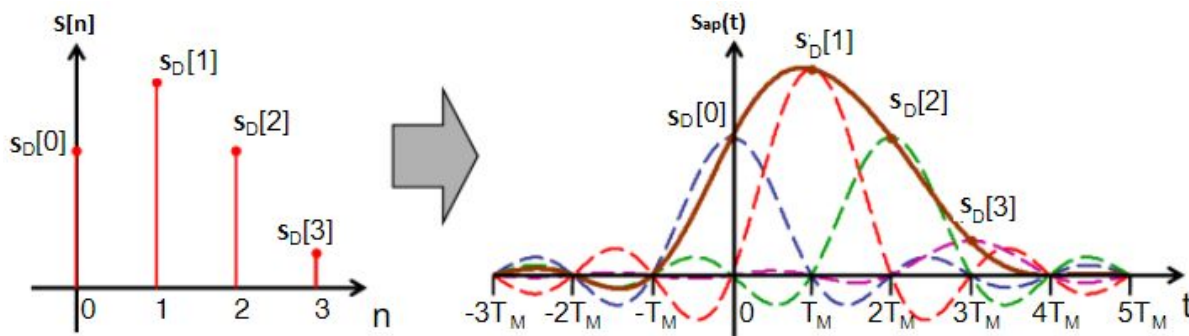
Una vez presentada la posibilidad de la implementación del banco de osciladores mediante la utilización del algoritmo de la FFT bajo la estricta condición de la utilización de una cantidad de coeficientes equivalentes a una potencia de 2 (lo cual permite implementar de forma eficiente la DFT y evitar todo el costo computacional que esta última implicaba) tal como se vio en la anterior figura. Estos avances son los que llevaron a que la nueva implementación para OFDM, quede conformada de la siguiente manera:



Posterior a la implementación de la IFFT se obtendrán muestras complejas, lo que lleva a que el conversor Digital Analógico se componga de dos ramas, correspondientes a fase y cuadratura, las cuales cuentan con un pulso interpolador (cumple la misma función que el pulso formador de onda en la implementación con banco de osciladores) con duración de 0 a T_{sampling} para luego llevar la señal a banda de paso en la frecuencia f_0 asignada al modulador.

$$S_{ap}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} S[n] \cdot p(t - nT_{\text{sampling}}) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \right) \cdot p(t - nT_{\text{sampling}})$$

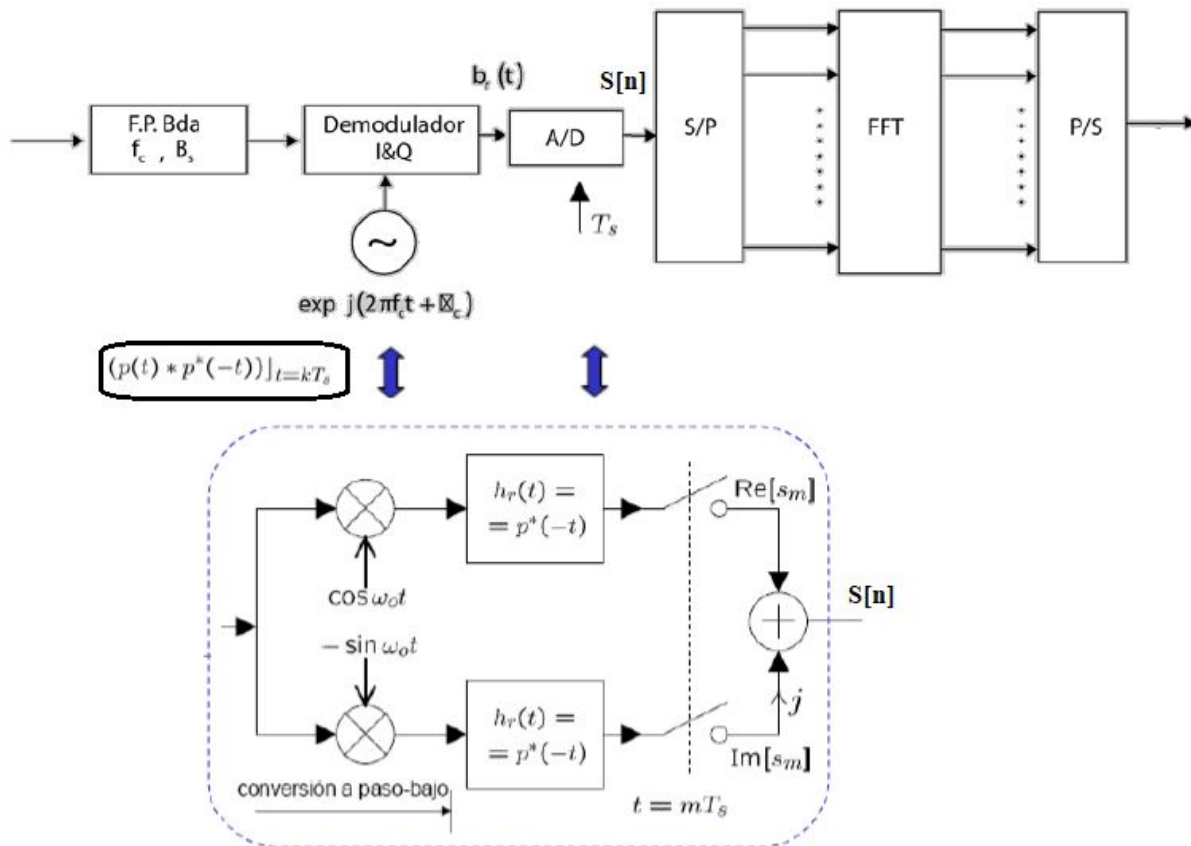
$$S(t) = \text{Re}\{S_{ap}(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}\}$$



Donde la conversión digital analógica en el transmisor (D/A) y en el receptor, mediante un conversor analógico digital (A/D), deben respetar el tiempo de muestreo $T_{\text{sampling}} = T_{\text{OFDM}}/N$.

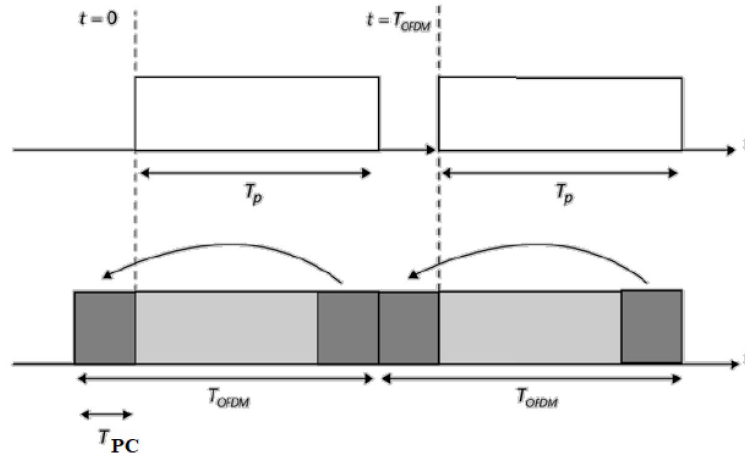
El algoritmo IFFT realiza una conversión del dominio frecuencial al temporal, lo que significa que en realidad los consteladores en paralelo asociados a cada una de las ramas, entregan las diferentes componentes espectrales de la señal $S[n]$. Por eso la IFFT, permite obtener una señal temporal de forma discreta en banda base a su salida cuyas características espectrales cumplen con los requerimientos de un modulador OFDM. Entiéndase, frecuencias mutuamente ortogonales para cada rama en paralelo en múltiplos de $k.R_{\text{OFDM}}$.

De forma similar, un demodulador OFDM utiliza los mismos conceptos para sustituir a todos los bancos de correladores por la operación de la FFT. Este algoritmo, permite obtener a su salida, una señal discreta que representa las componentes espectrales de la señal de entrada. Para poder aplicar FFT es necesario que la entrada sea una señal temporal discreta, por lo tanto en la recepción, se implementa un demodulador I&Q que transforma las señales a banda base utilizando señales sinusoidales en fase y cuadratura y el pulso interpolador " $p^*(-t)$ ". Luego, se muestrean las señales resultante cada T_{sampling} para obtener una conversión analógica digital (A/D).



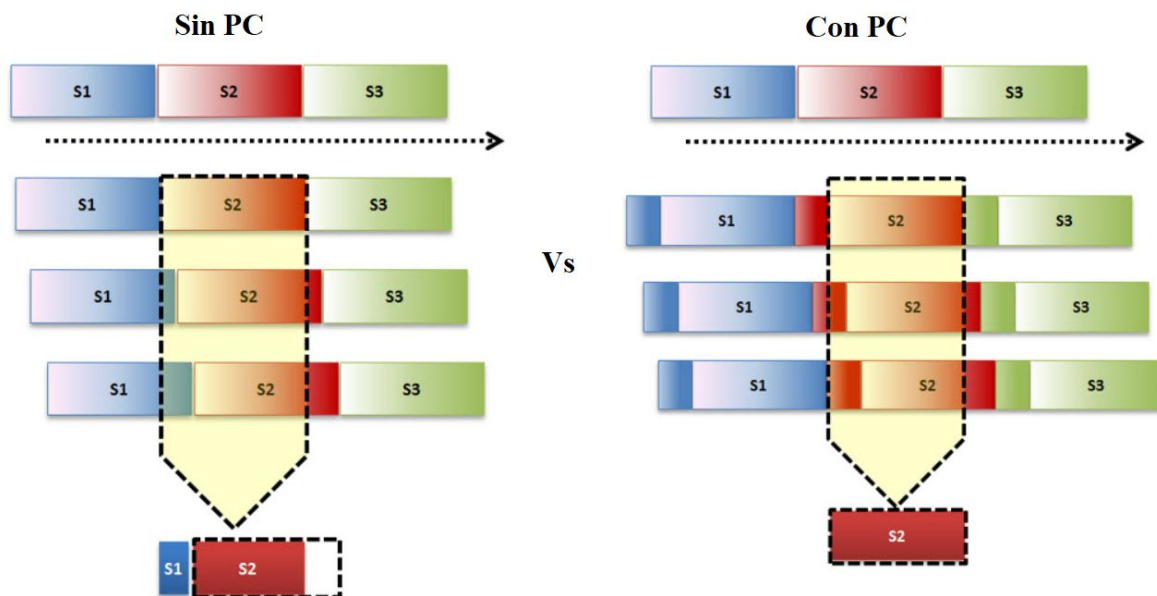
Hasta el momento se ha logrado demostrar cómo se compone un sistema que implementa OFDM tanto en la etapa de transmisión y recepción. Siendo la idea básica de OFDM dividir el rango del espectro disponible en varios subcanales (subportadoras). Usando canales de banda estrecha, que experimenten casi un desvanecimiento plano, haciendo la ecualización mucho más simple. Para obtener una mayor eficiencia espectral la respuesta en frecuencia de los subcanales son solapadas y ortogonales, que es de donde proviene el nombre de OFDM. Esta ortogonalidad puede ser completamente mantenida, aun cuando la señal pase a través de canales con multicaminos, introduciendo la solución que se denomina como Prefijo Cíclico. En donde el prefijo

cíclico es una copia de la última parte del símbolo OFDM la cual es añadida en el sistema, como es de esperar, posterior a la generación del símbolo.



Esta repetición de la última parte del símbolo al comienzo del mismo es necesaria, ya que la operación que se está realizando es la FFT, es decir, un algoritmo eficiente para calcular la transformada de fourier discreta DFT. Pero en realidad lo que debería realizarse es la DTFT, ya que la señal transmitida $s_{\text{OFDM}}(t)$ está afectada por la respuesta impulsiva del canal $h_c(t)$, de modo que $r(t)=s_{\text{OFDM}}(t)*h_c(t)+n(t)$.

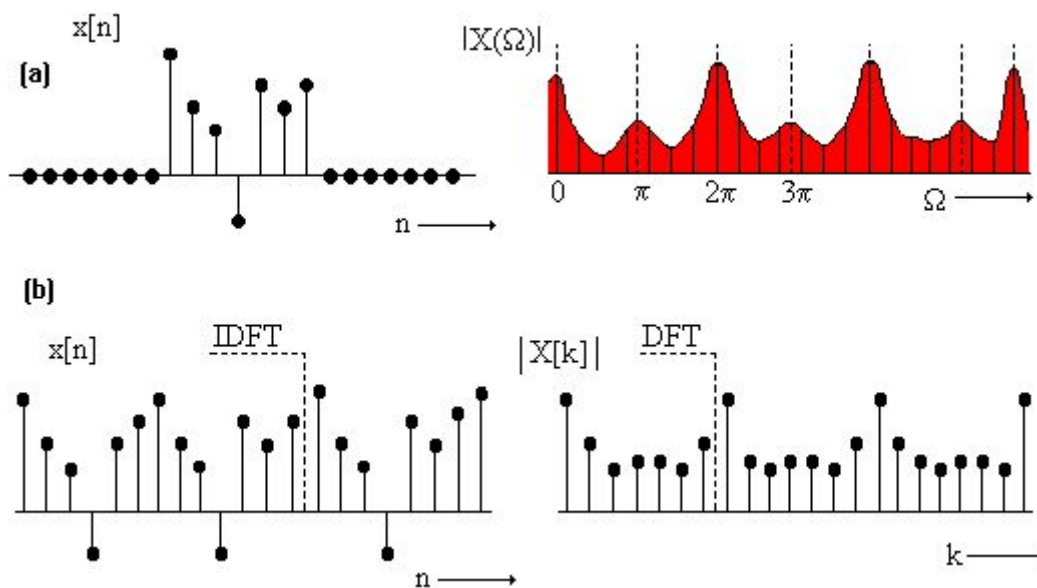
Utilizar la DFT implica que el segmento que se analiza es un único período de una señal periódica que se extiende de forma infinita; si esto no se cumple, se debe utilizar una ventana para reducir los espurios del espectro. Por la misma razón, la DFT inversa (IDFT) no puede reproducir el dominio del tiempo completo, a no ser que la entrada sea periódica indefinidamente. Por estas razones, se dice que la DFT es una transformada de Fourier para análisis de señales de tiempo discreto y dominio finito.



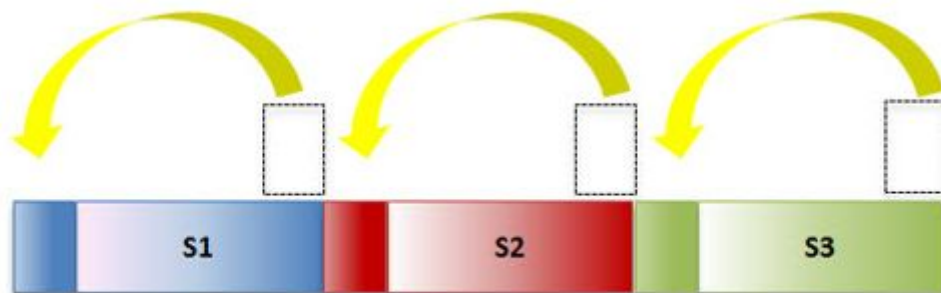
La DFT mediante la FFT se realiza sobre todas las señales recibidas durante un tiempo de símbolo OFDM perfectamente sincronizado con el símbolo recibido del camino directo. Los resultados de cada operación contribuyen tanto de forma constructiva como destructiva al símbolo en cuestión generando lo que se conoce como ICI (Interferencia entre portadoras), ya que en la ventana de análisis, los multicaminos hacen ver al algoritmo de la DFT señales diferentes a la del

enlace directo en la longitud de la ventana. La transformada de fourier que se obtiene en este caso no mantiene las condiciones de ortogonalidad entre frecuencias portadoras con las cuales se realizó el proceso de modulación OFDM. Por eso comúnmente se dice que el problema de ISI (interferencia entre símbolos) genera ICI (interferencia entre portadoras).

Para realizar la DFT se utilizan conceptos de convolución circular ya que se necesitan versiones periódicas de las secuencias discretas sobre las que se realiza el algoritmo, repitiendo cíclicamente la señal contenida dentro de la ventana. La operación que habría que realizar es la DTFT pero se implementa DFT por lo que la imagen a continuación muestra dicha relación:



En síntesis, este prefijo de duración " T_{PC} ", proporciona una banda de guarda para eliminar la interferencia entre símbolos sucesivos, además, se repite el final del símbolo para que la convolución lineal de un canal multitrayecto selectivo en frecuencia se pueda modelar como convolución circular, que a su vez puede transformarse en el dominio de frecuencia a través de una DFT o FFT como es en la implementación. Esta implementación del prefijo cíclico permite obtener la transformada de fourier mediante un algoritmo propio del procesamiento digital de señales, gracias a que la convolución lineal de cada uno de los multicaminos se transforma en una convolución circular periódica en el tiempo de análisis de un símbolo.



El prefijo cíclico introduce una pérdida en la razón señal-ruido (SNR) que supone el pequeño precio a pagar para mitigar la interferencia.

La siguiente pregunta es ¿Cuánto debe incorporarse de prefijo cíclico al símbolo OFDM para solucionar los problemas de Interferencia Intersimbólica? Para evitar la interferencia intersimbólica (ISI) y la interferencia entre portadoras (ICI), se debe cumplir siempre la condición de que la

duración del prefijo cíclico sea mayor o al menos igual que la duración de la respuesta impulsional del canal. Debido al carácter aleatorio de los canales de comunicación inalámbricos, esta condición se ajusta para sistemas OFDM al tener en cuenta el parámetro “delay spread”, por lo tanto:

$$< T_{PC}$$

Sin embargo, esta operación realizada en el ámbito digital luego de la conversión paralelo a serie genera un desaprovechamiento espectral de “ N_{PC}/T_{OFDM} ” Hz, ya que como el tiempo de símbolo OFDM no cambia al incluir dichas muestras, debe reducirse el tiempo asociado a las muestras útiles del símbolo OFDM (“ T_{util} ”) y las del prefijo cíclico (“ T_{PC} ”). Esta última no implica una transmisión de información del símbolo OFDM utilizable en el receptor para el camino directo, por lo que genera una pérdida de eficiencia. Aunque este es un precio que debe pagarse en canales dispersivos en frecuencia para mantener la ortogonalidad entre portadoras.

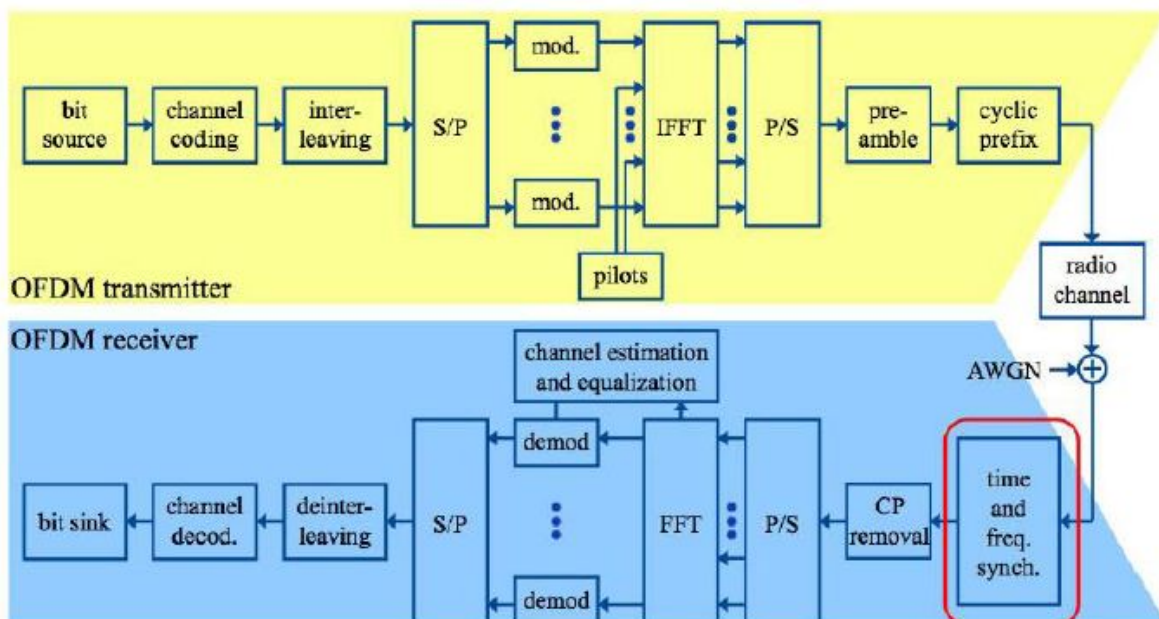
Como conclusión, la inclusión del prefijo cíclico cambia la utilización del ancho de banda de “ N_{util}/T_{OFDM} ” Hz a “ $(N_{PC}+N_{util})/T_{OFDM}$ ” Hz, por lo que la inclusión de “ N_{PC}/T_{OFDM} ” Hz genera una pérdida

de eficiencia espectral de: $\frac{(\frac{N_{PC}}{T_{OFDM}})}{(\frac{N_{PC}+N_{util}}{T_{OFDM}})}$ “ $N_{PC}/(N_{PC}+N_{util})$ ”, la cual es considerada como una forma de

pérdida en la relación señal a ruido, ya que la porción de señal transmitida en el tiempo de guarda y no aprovechada en recepción, repercute en que se debe enviar más energía media transmitida por bit para conservar la probabilidad de error respecto a un enlace convencional.

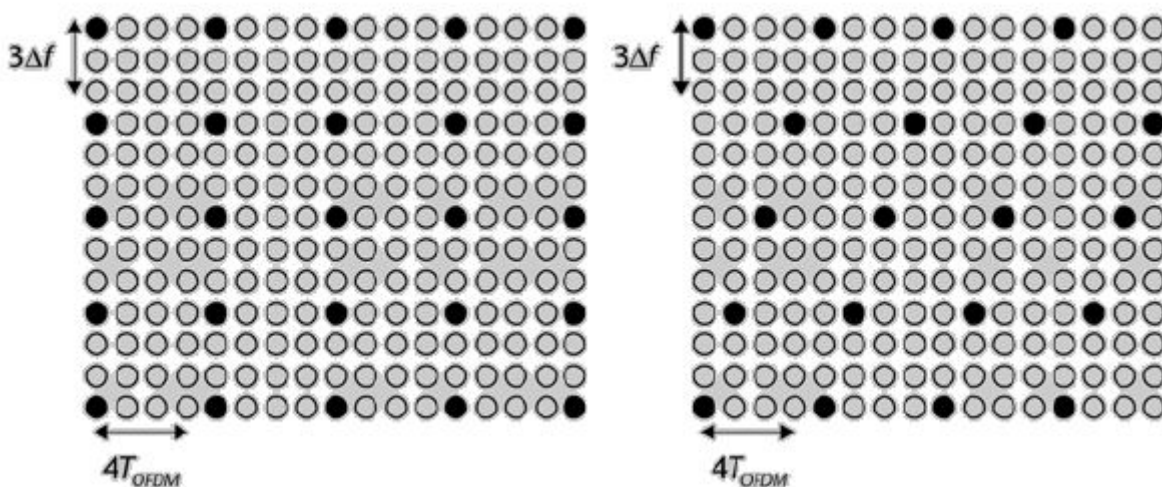
$$SNR_{p\acute{e}rdida} = 10 \cdot \log_{10} \left(1 - \frac{N_{PC}}{N_{PC}+N_{util}} \right)$$

Cuanto menor sea N_{PC} menor será la pérdida en eficiencia espectral pero serán mayores las posibilidades de perder la ortogonalidad entre portadoras. Para esto se define un criterio de elección, el cual debe ser mayor que la dispersión máxima de retardo pero menor al 20% o “ $N_{util}/5$ ”, siendo en la práctica habitual una elección no superior al 10%. Por ejemplo, si se considera el caso de $N_{util} = 64$ y un $N_{PC} = 64 \cdot 0.2 \approx 13$, por lo que la pérdida de señal ruido es $SNR_{p\acute{e}rdida} = 10 \cdot \log_{10} \left(1 - \left(\frac{13}{13+64} \right) \right) = -0.8 \text{ db}$.



Ha quedado demostrado el costo/beneficio que trae la inclusión del prefijo cíclico a la implementación del sistema, pero no es una herramienta aislada, ya que no tendrá beneficios si anteriormente no se aplica una buena ecualización de canal. Es entonces en sistemas OFDM que resulta también fundamental la inclusión de ecualización en el canal para cada una de las ramas asociadas a las diferentes regiones espectrales sobre las que trabaja un modulador OFDM. La ecualización consiste en encontrar la función de transferencia inversa a la del canal, de manera tal, que a los ojos del receptor, el canal se comporte de forma ideal (módulo de la respuesta en frecuencia plana y fase lineal, en la banda de frecuencias de interés). De esta forma, la señal recibida resulta ser una versión atenuada y retardada de la señal transmitida. La implementación combinada de ecualización de canal y la incorporación de prefijo cíclico permiten reducir la ISI e ICI. La modulación OFDM utiliza el concepto de "frecuencias piloto" para estimar la respuesta en frecuencia del canal e identificar cual resulta ser la función inversa a implementar. Como la ecualización se aplica sobre cada rama, las cuales se sabe que trabajan en un ancho de banda relativamente pequeño, el canal en dicha región espectral se observa prácticamente plano. Entonces la función inversa a implementar es una constante. Esto permite que la operación de ecualización sea básicamente una división utilizando un conjunto de coeficientes determinados como: $|H(f)|_{|f=f_k}$.

Las frecuencias piloto son un conjunto de frecuencias asignadas tanto por el transmisor como receptor para la transferencia de símbolos conocidos, también denominados pilotos, con una determinada periodicidad temporal. Estos símbolos son utilizados para estimar la función de transferencia del canal y también para facilitar el sincronismo de la frecuencia portadora de las señales OFDM. Es necesario que la cantidad de frecuencias piloto por símbolo OFDM sea lo suficientemente grande para que la respuesta en frecuencia del canal se pueda extrapolar para obtener aquellos valores de la misma en los símbolos que no transportan piloto. En tiempo, los símbolos pilotos deben aparecer de forma suficientemente densa como para seguir las fluctuaciones de variación temporal del canal. Es por el teorema del muestreo que se recomienda como mínimo que se produzcan dos símbolos piloto dentro del tiempo de coherencia



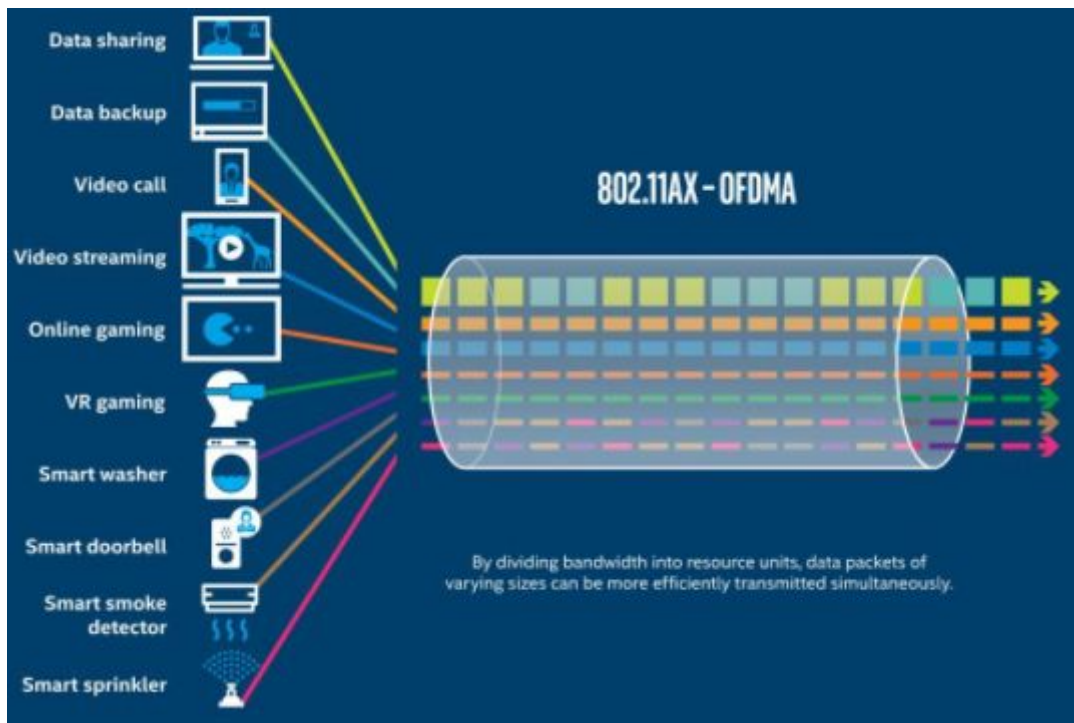
OFDMA

OFDMA (Acceso Múltiple por División en Frecuencias Ortogonales - Orthogonal Frequency Division Multiple Access) es la técnica de acceso basada en OFDM en donde un terminal sólo

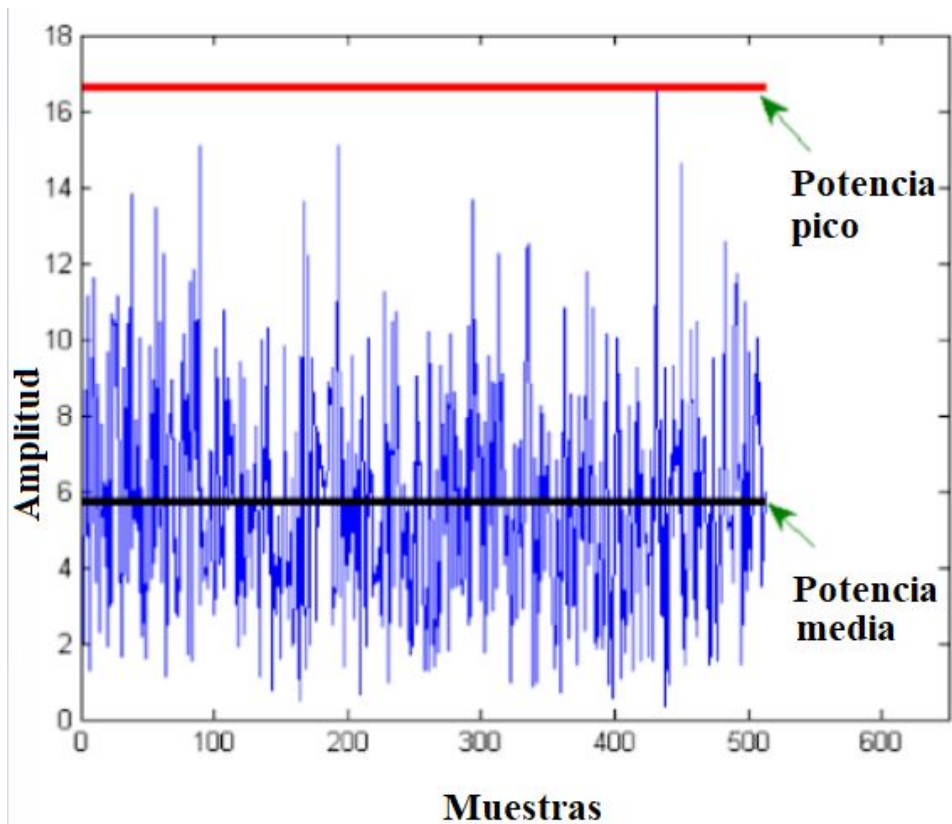
modula ciertas subportadoras dentro de un símbolo OFDM, permitiendo dejar el resto de subportadoras libres para que puedan ser utilizadas por otros usuarios.

Aunque en principio cada terminal puede escoger en qué subportadoras transmitir información, así como el número de éstas, en los estándares IEEE 802.16a(WiMax y HiperMAN) se fijan tanto el número de subportadoras por usuario (12, 24, 48, 96 o 192) como la distribución de éstas: contigua, espaciamiento regular ó espaciamiento pseudoaleatorio. Esto es lo que denominan subbandas. Lo que puede seleccionar el terminal dependiendo de la calidad de cada una de estas subbandas, es la que se utilizará para transmitir, así como el número de las mismas y por ende la modulación en cada una de ellas.

Algunas ventajas en este método de acceso, son: Un buen rendimiento frente a canales con fading selectivo, gracias a su capacidad de adaptación al medio mediante la combinación de distintas técnicas de modulación. Permite también hacer una asignación dinámica de la cantidad y cuales subportadoras a destinar (sin necesidad de que sean continuas) a cada usuario utilizando como criterio la cantidad de tráfico que ha solicitado cada individuo.



Con respecto a una de sus principales desventajas es la relación potencia pico potencia media también conocida como PAR, ya que la función de distribución de probabilidad en las amplitudes puede ser aproximada mediante el teorema central del límite por una gaussiana, por lo que posee una distribución de Rayleigh en la potencia. Esto hace que la excursión de las señales sea muy grande. Este inconveniente se debe a que la información en OFDM se encuentra principalmente en la amplitud y en la fase, por lo que, es necesario que ambas no se distorsionen al momento de ser enviadas. Esto implica que los amplificadores de potencia de salida deben tener un gran margen dinámico lineal para no distorsionar la señal. Para que el amplificador se encuentre en su zona lineal durante toda la gran excursión de la señal, se suelen polarizar muy por debajo de la zona lineal reduciendo muy significativamente la eficiencia de los amplificadores.



Estos resultados hacen que OFDMA sea una aplicación sumamente inapropiada para enlaces reverse de un sistema de telefonía móvil, ya que agotaría rápidamente la batería de los móviles. Por eso, en la tecnología LTE se propone como la utilización de OFDMA para el enlace forward y SC-FDMA para el enlace reverse.