

Capítulo 5.

El sistema OWC-OFDM

La técnica de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), la cual se le ha dedicado el capítulo 2 completo, consiste en un método de modulación en el que se transmite un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias, de forma que sean ortogonales entre sí, y normalmente moduladas en QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) o en PSK (*Phase Shift Keying*).

Esta técnica permite transmitir una señal de un usuario con una robustez muy grande, y enviarla de forma múltiple y simultánea sobre un mismo medio de transmisión, tanto por cable como inalámbrico, lo que resulta ideal para aplicaciones donde se necesite enviar una gran cantidad de datos (p. ejemplo aplicaciones multimedia, ver capítulo 2).

Como bien se sabe, este método de modulación se está utilizando en nuevas tecnologías, como LTE referido a las comunicaciones móviles de cuarta generación (4G), la televisión digital terrestre (DVB-T, DVB-H, DVB-SH, DVB-T2), la tecnología WiMAX y la ADSL entre otros, ofreciendo altas tasas de datos.

En las comunicaciones ópticas modernas resulta muy interesante el hecho de poder adaptar la modulación OFDM, ya utilizada en sistemas inalámbricos y que entre sus ventajas presenta la robustez frente al multitrayecto, una eficiencia espectral muy alta, flexibilidad para poder adaptarse a sistemas de gran ancho de banda gracias a la ecualización en el dominio de la frecuencia, además de la inserción de un prefijo cíclico (CP), que provoca la eliminación de los efectos producidos por las interferencias intersimbólicas (ISI) y una ventaja para realizar la modulación y demodulación, puesto que puede ser implementada por una simple Transformada Inversa de Fourier Discreta (IDFT), y realizada muy eficientemente mediante la IFFT (inversa de la transformada rápida de Fourier).

En definitiva, si a todas esas ventajas que aporta OFDM, se añaden las ventajas que se obtienen mediante las comunicaciones ópticas inalámbricas OWC (ver capítulo 3), como son principalmente, que su banda de frecuencias no se encuentra regulada ni requiere de licencias, que alcanza unas tasas de bits mayores a las que ofrecen los sistemas RF, que no se ven afectadas por las interferencias radio, además son comunicaciones que aportan más seguridad ante el intrusismo, etc., se obtendría un sistema de comunicación que ayudaría de manera importante a soportar la gran demanda tecnológica que existe actualmente, especialmente en comunicaciones digitales.

5.1 OFDM en las comunicaciones ópticas

Este apartado se centra en ilustrar cómo sería un sistema OFDM adaptado para las comunicaciones ópticas.

Al plantear la utilización de OFDM en sistemas ópticos aparecen ciertos obstáculos debido a las diferencias fundamentales entre los sistemas inalámbricos OFDM convencionales y los sistemas ópticos convencionales.

En la siguiente tabla, se resumen los principales inconvenientes que se encuentran a la hora de plantear este sistema.

Sistema OFDM típico	Sistema bipolar	Información transportada por medio del campo eléctrico	Osciladores locales en el receptor	Detección coherente
Sistema óptico típico	Sistema unipolar	Información transportada por medio de la intensidad óptica	Sin osciladores locales (láser) en el receptor.	Detección directa

Tabla 1. Comparación entre sistema típico OFDM y óptico.

En los sistemas OFDM (no ópticos), la información se transporta a través del campo eléctrico, y la señal presenta muestras con valores positivos y negativos, esto es, una señal bipolar. En el receptor, hay un oscilador local y se aplica detección coherente.

Por el contrario, en un típico sistema óptico de intensidad modulada y detección directa (IM/DD, *Intensity Modulation/Direct Detection*), la información se transporta por medio de la intensidad de la señal óptica y por lo tanto, y muy importante, ésta sólo puede ser positiva, es decir, unipolar. No existe un láser en el receptor actuando como oscilador local, además se usa detección directa en lugar de la detección coherente.

La detección directa consiste en convertir la potencia óptica directamente en una corriente eléctrica proporcional a ella. Este método de detección no permite la recuperación, para su procesado, de la información transportada en la fase de la portadora óptica. Tiene la ventaja de su sencillez y bajo coste, frente al sistema de detección coherente, debido a la complejidad de los componentes que éste incluye.

5.1.1 OFDM para comunicaciones ópticas usando modulación en intensidad (IM).

Una gran variedad de soluciones para la utilización de OFDM en sistemas ópticos han sido propuestas recientemente para diferentes aplicaciones. Para entender las técnicas utilizadas, es necesario conocer qué es fundamental en cada dominio.

Esas soluciones pueden ser divididas en dos grupos, el primero comprende las técnicas para los sistemas de fibra monomodo donde sólo se recibe un modo. En el segundo grupo, se incluyen técnicas para sistemas donde se reciben varios modos ópticos diferentes, como por ejemplo, sistemas de fibra multimodo y sistemas ópticos inalámbricos (OWC). Para ellos, la señal OFDM debe estar representada y modulada por medio de la intensidad de la señal óptica (IM), en lugar de la amplitud y la fase tal y como se hace en los sistemas inalámbricos de radiofrecuencias.

En el receptor, la señal tiene que ser captada a través de detección directa (DD). Eso implica que la señal modulada no sólo tiene que ser positiva sino también real, a pesar de que las señales OFDM en banda base, son por lo general, bipolares y complejas.

En OFDM, los datos se transmiten en paralelo en muchas subportadoras. Por lo tanto, incluso cuando el canal general es selectivo en frecuencia, el “subcanal” a través del cual se transmite una subportadora dada es aproximadamente plano en frecuencia. De esta forma, para OFDM, la ejecución en canales AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) establece una base teórica desde la que se pueden encontrar los resultados para el caso más general de un canal selectivo en frecuencia. Estos nuevos resultados proporcionan una base para el diseño de los futuros sistemas de IM/DD.

No es fácil comparar los esquemas de modulación para IM/DD porque la BER depende de la SNR (*Signal-to-noise ratio*) de la señal eléctrica tras la detección directa, sabiendo que la principal limitación del sistema está por lo general en la potencia óptica media transmitida.

Para una señal $x(t)$, la potencia óptica P_{opt} depende de $E\{x\}$, y la potencia eléctrica P_{elec} depende de $E\{x^2\}$, así que la conversión entre potencia óptica y potencia eléctrica, depende de las estadísticas de la señal en el dominio del tiempo.

5.1.2 Comparación entre ACO-OFDM y DCO-OFDM

Recientes estudios, como los presentados por la investigadora Jean Armstrong en la última década [2-7], proponen la creación de una señal banda base real OFDM, generada a partir del uso de la simetría hermítica de los datos antes del bloque IFFT en el transmisor.

Se proponen dos formas de creación de señales unipolares OFDM:

- DCO-OFDM (*DC-biased Optical OFDM*)

Se añade una componente de continua en la señal a la salida del bloque IFFT, sin embargo debido al problema de la PAPR en OFDM, incluso con una gran componente de continua, siguen quedando algunos picos negativos de señal, que se recortarán y la distorsión resultante va a limitar el rendimiento.

- ACO-OFDM (*Asymmetrically Clipped Optical - OFDM*)

La señal bipolar OFDM a la salida del bloque IFFT pasa por un bloque de reducción a cero (*Zero Clipping*), en el que las componentes negativas se recortan y sólo quedan las componentes positivas. El concepto clave de ACO-OFDM mantiene que si se dejan únicamente las subportadoras impares, intercalando componentes a cero en las componentes pares a la entrada del bloque IFFT, el *clipping noise* sólo afectaría a las subportadoras pares, quedando las impares (donde está la información) libre de este ruido.

En general, ACO-OFDM requiere una potencia óptica media más pequeña que DCO-OFDM para una BER y tasa de datos dada, excepto para grandes constelaciones, pero estas no son típicas en sistemas OWC.

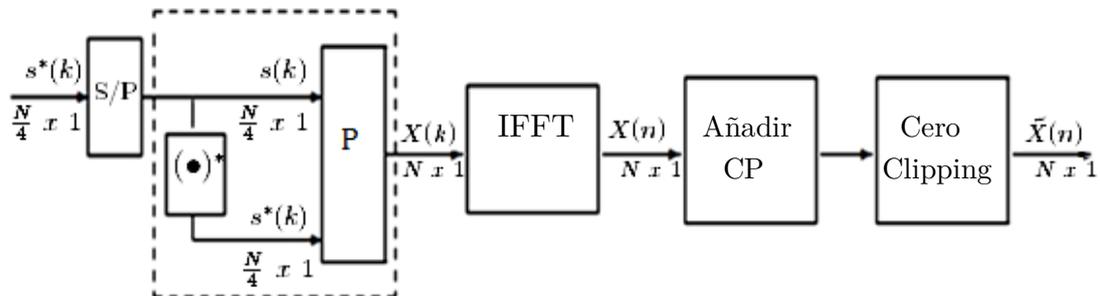
5.2 Implementación de un sistema OWC utilizando ACO-OFDM

Como se ve en el capítulo 6, para las simulaciones del modelo OFDM en OWC, se ha utilizado el método ACO-OFDM.

Su implementación teórica se realizaría de la siguiente manera: Si se llama N al número de subportadoras que contiene el símbolo OFDM al llegar al bloque IFFT, a la salida del *mapper* se obtiene un símbolo OFDM de tamaño $N/4$, el cual contiene toda la información de los bits generados y modulados (QAM, 16-QAM o 64-QAM).

Al llegar al bloque de simetría hermítica, la información pasa a ocupar las subportadoras impares, dejando las posiciones pares a cero, quedando la información intercalada en $X(m)$ siendo $m=1,3,5,7\dots N/2-1$. Una vez llegado a este punto se le aplica la simetría hermítica y se añade como segunda mitad del vector.

Esta simetría consiste en hacer un duplicado de los valores del símbolo de tamaño $N/2$, pero en forma de complejo conjugado y en modo descendente, de manera que ahora sí quedaría un símbolo de N componentes $X(k)$, $k = 0 \dots N - 1$, cuyas componentes son $\left\{ 0 \ X_1 \ 0 \ X_3 \ 0 \ X_5 \ 0 \ \dots \ X_{\frac{N}{2}-1} \ 0 \ X_{\frac{N}{2}-1}^* \ 0 \ X_{\frac{N}{2}-3}^* \ 0 \ \dots \ X_1^* \right\}$.



Simetría Hermítica e inserción de ceros

Figura 5.1. Sistema transmisor ACO-OFDM

El propósito de emplear esta simetría es el de asegurar los valores reales en el tiempo a la salida del bloque IFFT, pero a costa de una reducción del 50% en la eficiencia espectral.

Una vez realizada la IFFT, se añade el correspondiente prefijo cíclico, y a la salida los valores serán reales en el tiempo, pero sus componentes serán tanto negativas como positivas y habrá que reducir las negativas a cero usando un bloque *Zero Clipping*.

El objetivo de la reducción a cero satisface dos aspectos. En primer lugar, la modulación en intensidad sólo puede llevarse a cabo con componentes positivas (unipolar) y en segundo lugar, se sabe que al incluir un canal AWGN, la señal llegará al receptor con componentes positivas y negativas, reales e imaginarias. Eso quiere decir, que aquellas componentes imaginarias y negativas habrían sido producto del paso por el canal, y es ruido añadido a la señal original que puede ser fácilmente eliminado en el receptor.

En la figura 5.2 se aprecia la señal $X(k)$, a la llegada al bloque *Zero Clipping* y posteriormente la señal $X_c(k)$ a la salida del mismo bloque, cuyas componentes negativas han sido reducidas a cero.

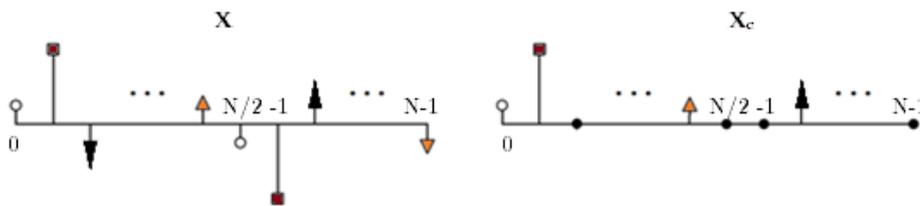


Figura 5.2. Entrada y salida del bloque *Zero Clipping* en el transmisor

La señal unipolar a la salida del bloque, pasa por un convertidor Digital / Analógico para ser enviada a la parte óptica del transmisor, donde es modulada en intensidad (IM) y transmitida por medio de un láser o diodo LED.

Tras el paso por el canal óptico inalámbrico, en el receptor óptico se encuentra el bloque de detección directa (DD), con un fotodetector PIN y un muestreador de la señal analógica recibida.

El siguiente paso es la parte eléctrica del receptor, donde lo primero que hace el sistema es retirar el prefijo cíclico que se había incluido en el transmisor. Los símbolos recibidos pasan de estar en serie a paralelo, para así incluirlos en el bloque FFT.

En este bloque, los N símbolos que eran reales y positivos a la salida del transmisor, llegan con componentes reales e imaginarias como consecuencia del paso por el canal AWGN, estando ese ruido en las componentes pares, que en un principio eran cero, y a continuación, van a ser eliminadas.

A la salida del bloque FFT, se obtienen los símbolos en el dominio de la frecuencia, esta vez con componentes reales e imaginarias, y con un valor del 50% del valor que tuviese a la entrada del bloque IFFT en el transmisor como consecuencia de la simetría hermítica y del recorte de las componentes negativas realizado en el bloque *cero clipping*.

Por tanto, una vez obtenidos los símbolos, se procede a retirar las componentes pares (en las que se intercalaron ceros y ahora contiene componentes de ruido), y se pasa a tener $N/2$ símbolos, siendo estos los símbolos originales y su complejo conjugado. A partir de esta información, se puede obtener una buena aproximación de los símbolos transmitidos mediante un sistema ACO-OFDM.

A continuación, en la figura 5.3 (a) y 5.3 (b) se presenta un esquema con los correspondientes bloques pertenecientes al transmisor (a) y al receptor (b) de un sistema ACO-OFDM, en este caso para una modulación QAM.

En este esquema (a) se aprecia la parte del transmisor, con la inserción de ceros ya realizada entre los símbolos modulados (como se explicó en la figura 5.1) y su posterior duplicado en forma de complejo conjugado antes de la entrada en el bloque IFFT. Los posteriores bloques, IFFT, Serie-paralelo, añadir CP, convertidor D/A y cero clipping, pertenecen a la parte eléctrica del transmisor. A partir de ahí, comienza la parte óptica del transmisor, donde están los bloques del modulador en intensidad y la fuente óptica, que normalmente será un diodo LED.

En el esquema (b) destaca por un lado, la parte óptica del receptor con el fotodetector y la detección directa de la señal, y por otro lado, la parte eléctrica del receptor con el muestreador de la señal recibida, la retirada del CP, el bloque Serie-Paralelo y la FFT.

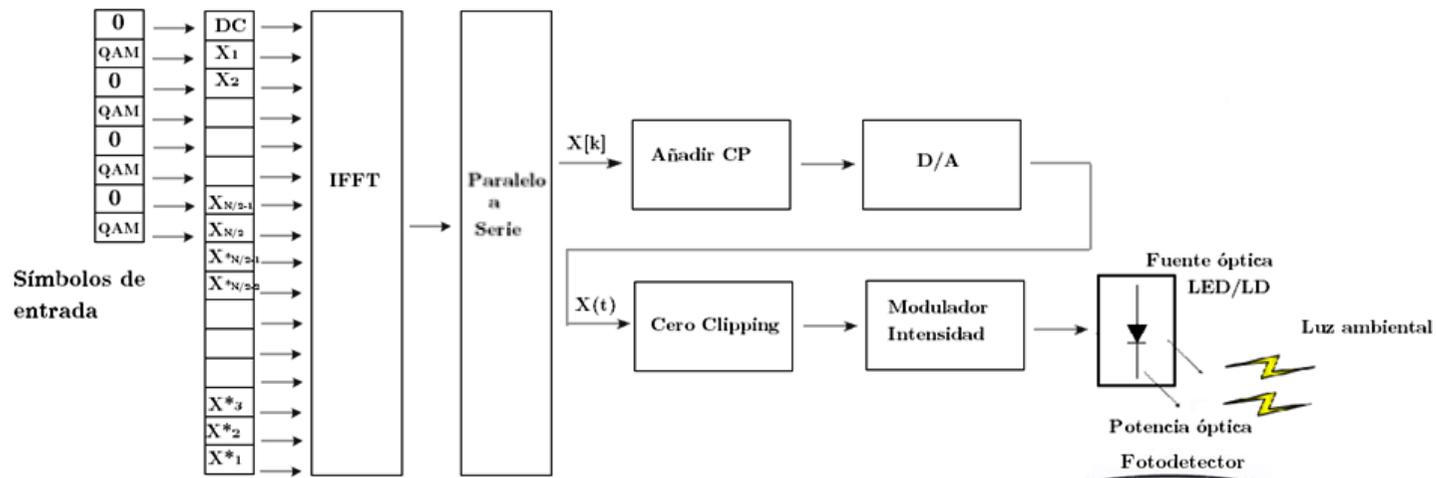


Figura 5.3. (a) Bloques del transmisor ACO-OWC OFDM

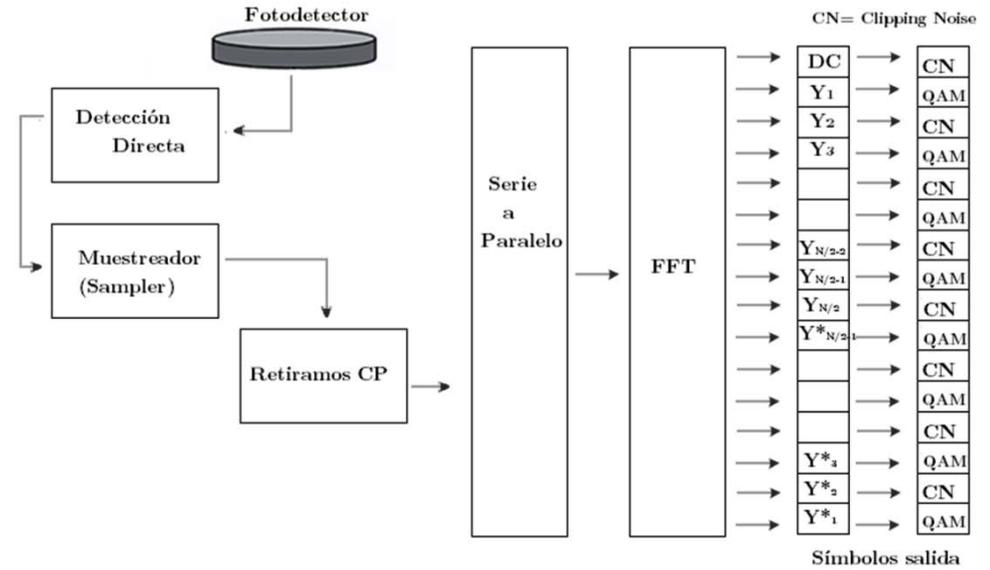


Figura 5.3. (b) Bloques del receptor ACO-OWC OFDM

5.3 Referencias

- [1]. F.R. Gfeller, H.R. Muller, and P. Vettiger, “*Infrared Communication for In-House Applications*”, IEEE COMPCON, 1978.
- [2]. Jean Armstrong and Brendon J.C. Schmidt “*Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN*”, IEEE. May 2008.
- [3]. Jean Armstrong and Sarah Kate Wilson “*Transmitter and Receiver Methods for Improving Asymmetrically-Clipped Optical OFDM*”, IEEE. Sept 2009.
- [4]. Jean Armstrong and Arthur James Lowery “*Orthogonal-Frequency-Division Multiplexing for Optical Dispersion Compensation*”, Oct 2009.
- [5]. Jean Armstrong, R. Mardling and Xia Li “*Channel Capacity of IM/DD Optical Communication Systems and of ACO-OFDM*”.
- [6]. Jean Armstrong and Sarangi Devasmitha Dissanayake “*Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems*”, IEEE. April 2013.
- [7]. Jean Armstrong “*OFDM for Optical Communications*”, IEEE. January 2009.
- [8]. Svilen Dimitrov, Sinan Sinanovic and Harald Haas “*Clipping Noise in OFDM-Based Optical Wireless Communication Systems*”, IEEE. April 2012.
- [9]. Poompat Saengudomlert “*On the Benefits of Pre-Equalization for ACO-OFDM and Flip-OFDM Indoor Wireless Optical Transmissions Over Dispersive Channels*”, IEEE. January 2014.
- [10]. Nirmal Fernando, Yi Hong and Emanuele Viterbo “*Flip-OFDM for Optical Wireless Communications*”, IEEE. 2011.
- [11]. Dobroslav Tsonev, Sinan Sinanovic and Harald Haas “*Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless*”, University of Edinburgh, UK.
- [12]. Nirmal Fernando, Yi Hong and Emanuele Viterbo “*Flip-OFDM for Unipolar Communications Systems*”, IEEE. Dec, 2012.