

Señales DCO-OFDM eficientes para VLC utilizando Redes Neuronales adaptativas Difusas (ANFIS)

Borja Genovés Guzmán, Víctor P. Gil Jiménez

}bgenoves,vgil @tsc.uc3m.es

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid

Av. de la Universidad, 30. 28911. Leganés. Madrid

Resumen—In this paper, Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems (ANFIS) are used for obtaining Direct Current biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (DCO-OFDM) signals with low power envelope. Signals with very low crest factor obtained from Active Constellation Expansion (ACE) method are used for training our fuzzy systems. After the off-line training, the ANFIS are able to generate from the original real-valued signal another real-valued one with more than 2 dB of power envelope reduction which impacts in the final performance after going through the LED.

I. INTRODUCCIÓN

Cada vez más existe una mayor demanda de servicios de datos de alta velocidad en las comunicaciones inalámbricas. Tecnologías como la 4ª generación (4G) de móviles prometen unas tasas binarias por encima del Gbps. Sin embargo, problemas como la interferencia entre celdas, especialmente en redes heterogéneas (HetNets), o las limitaciones del espectro dificultan el alcance de tales expectativas.

Por este motivo se deben encontrar soluciones que contribuyan a la consecución de esos objetivos. Así surgen las *Optical Wireless Communications* (OWC), una tecnología en pleno desarrollo en la cual se están invirtiendo grandes esfuerzos para llevarla finalmente a la práctica. Una vez se ha demostrado la realidad de las OWC a través de modulaciones sencillas como *On-Off Keying* (OOK), se han propuesto esquemas de modulación multiportadora como *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) adaptado a óptica.

En sistemas inalámbricos ópticos se suele utilizar modulación por intensidad y detección directa (IM/DD), por lo que únicamente se pueden enviar señales reales y no negativas. Para ello, se proponen principalmente dos tipos de modulación OFDM: OFDM óptica con señal de bias continua (DCO-OFDM) [1] y OFDM óptica asimétricamente recortadas (ACO-OFDM) [2]. DCO-OFDM es una de las principales modulaciones en Comunicaciones de Luz Visible (VLC), ya que con ellas se ofrece iluminación además de datos, con lo cual es necesario un nivel de continua.

Las altas fluctuaciones en la envolvente de la señal de estas modulaciones multiportadora y la no linealidad del modelo de diodo emisor de luz (LED) blanco que normalmente se utiliza en este tipo de comunicaciones, obliga a desarrollar métodos y algoritmos para reducir esas variaciones. Algunos de estos han sido descritos en [3]. Comparando DCO-OFDM con ACO-OFDM, el primero es menos eficiente energéticamente debido al nivel de *offset* que se añade (lo cual es una ventaja si se

utiliza para VLC), mientras que el segundo es energéticamente más eficiente al establecer a 0 todas las muestras negativas y así conseguir una señal unipolar. En cambio, ACO-OFDM pierde *throughput* al utilizarse aproximadamente la mitad de las subportadoras que en DCO-OFDM. Este artículo se centra en DCO-OFDM al ser el tipo de modulación previsto para utilizarse en VLC, y esta tecnología a su vez ser incluida en la 5ª generación de comunicaciones móviles.

Active Constellation Expansion (ACE) es una interesante técnica que consigue gran reducción de las fluctuaciones de la envolvente a cambio únicamente de un pequeño incremento en la energía transmitida. Sin embargo, la principal debilidad de esta técnica reside en el alto número de iteraciones que requiere para converger. Por eso, en este artículo el ACE se utiliza sólo para obtener un conjunto de datos de entrenamiento para el sistema *neuro-fuzzy*. Este método se propone en [4], aunque aquí se aplica a señales ópticas, prestando especial atención a los esquemas de modulación multiportadora propios de este tipo de señales y a sus características, entre las que se encuentran el modelo de transferencia de la fuente que se utiliza como transmisor (LED): éste debe recibir señales unipolares, se debe introducir un nivel de continua adecuado, etc. Además, dadas las características de estas señales DCO-OFDM, la arquitectura del sistema tiene que ser necesariamente diferente.

Así, el sistema propuesto utiliza una arquitectura basada en un sistema neuronal adaptativo de lógica difusa (ANFIS), que se entrena con señales con muy buenas características de envolvente como son las ACE, para aprender cómo deben ser las señales para mostrar buenas condiciones de envolvente. Aunque las señales resultantes son compatibles con las generadas por el ACE, el método de obtenerlas es completamente diferente y mucho menos costoso computacionalmente.

El artículo se organiza como sigue. En la Sección II se introduce el modelo del sistema. En la Sección III se describen los sistemas *neuro-fuzzy* propuestos. A continuación en la Sección IV se presentan los resultados obtenidos así como una comparación de las diferentes alternativas tenidas en cuenta. Finalmente, en V se resumen las principales conclusiones.

II. MODELO DEL SISTEMA

En un sistema multiportadora, la señal transmitida \mathbf{x}^ℓ en banda base en el dominio del tiempo para el símbolo ℓ -ésimo se define como

$$\mathbf{x}^\ell = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_k^\ell e^{j2\pi kn/N}, \ell = 0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

donde N es el número de subportadoras y S_k^ℓ es el símbolo complejo en banda base en el dominio de la frecuencia modulado en la subportadora k -ésima del símbolo OFDM ℓ . Sin embargo, dependiendo de si trabajamos con DCO-OFDM o ACO-OFDM, algunas subportadoras se van a utilizar y otras no, además de tener en cuenta una ordenación adecuada de los símbolos para asegurar que el símbolo OFDM en tiempo sea una señal real positiva.

A. Métricas

Para evaluar el funcionamiento del sistema propuesto en cuanto a variaciones de la envolvente, se van a utilizar diferentes métricas:

1. Factor cresta (*Peak-to-Average Power Ratio*, PAPR): Se define como la amplitud del mayor pico de la forma de onda dividido entre el valor de la media cuadrática (*Root Mean Square*, RMS).
2. Métrica cúbica (*Cubic Metric*, CM) [5]: Métrica que utiliza estadísticos de orden superior para adecuadamente evaluar la distorsión producida por la no linealidad de elementos como un amplificador de alta potencia o un LED.

Es importante resaltar aquí que ambas métricas se deben realizar antes de añadir el *offset* a la señal DCO-OFDM, ya que, de otra forma, y dado que estas señales deben ser reales positivas, éste afectará a la métrica y la distorsionará. Por este motivo, siempre que se hable de PAPR o CM, será antes de añadir el *offset*. Esta es una peculiaridad de los sistemas DCO-OFDM.

B. Método ACE

El método ACE consiste en modificar y expandir los puntos de la constelación en unas zonas dentro de las regiones de decisión correspondientes, con el fin de reducir las fluctuaciones de la envolvente. Como no afecta a las fronteras de decisión, no se necesita enviar ningún tipo de información adicional. El método utilizado en este artículo es el *Approximate Gradient-Project* (AGP) [6].

III. SISTEMAS NEURO-FUZZY

Una regla difusa del tipo *if then* es una expresión de la forma *SI A ENTONCES B*, donde A y B son etiquetas de los conjuntos difusos. Esta forma de *fuzzy* fue propuesta por Tafagi y Sugeno en [7], y tiene una gran capacidad de aprendizaje para aproximarse a funciones no lineales. Aquí se utilizará la regla difusa típica en un modelo *fuzzy* de Sugeno [8], cuyo formato es:

$$\text{Si } x \text{ es } A \text{ e } y \text{ es } B \text{ entonces } z = f(x, y) \quad (2)$$

donde A y B son conjuntos *fuzzy* a priori y $z = f(x, y)$ es una función definida.

La principal desventaja de las reglas difusas es que se necesita el conocimiento de expertos o instrucciones para definir las, por lo que conocer los parámetros de las funciones f se convierte en una tarea difícil. Sin embargo, si se combinan las

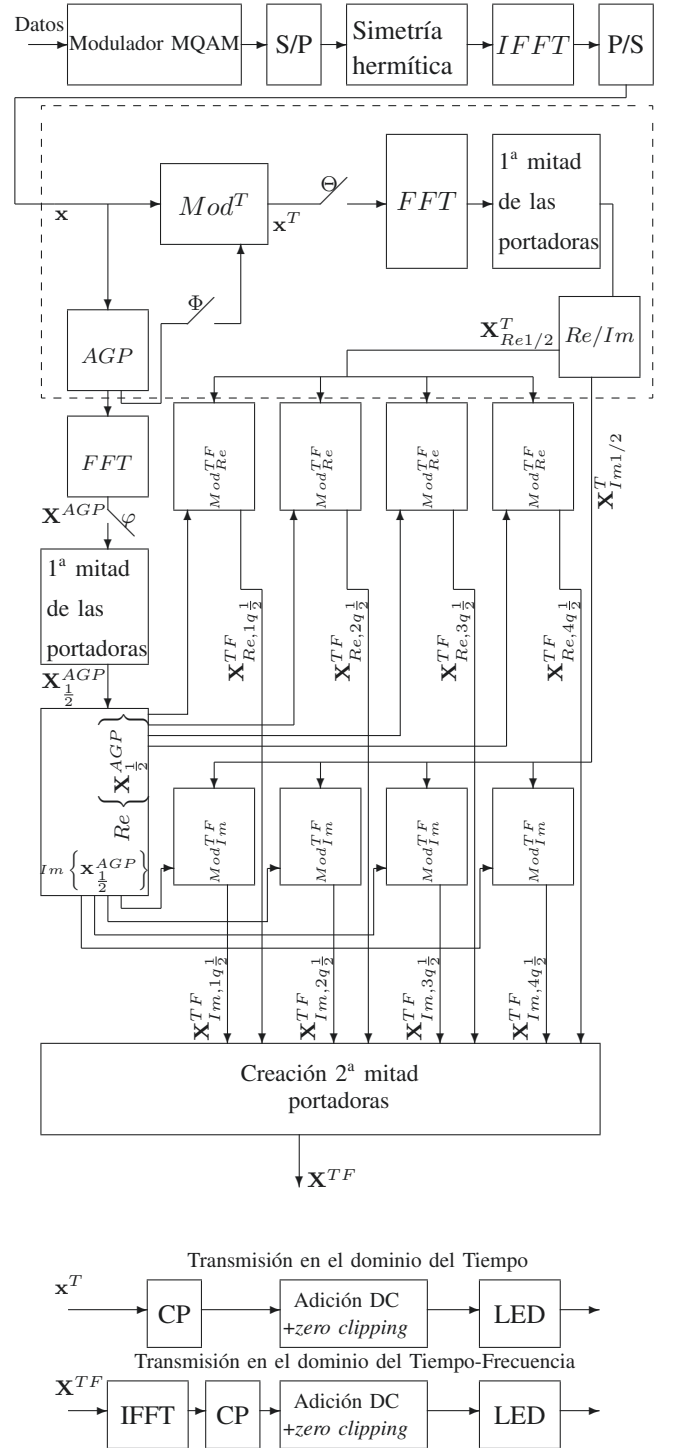


Fig. 1. Esquema del entrenamiento y test para modelo en tiempo (Mod^T) y modelo en tiempo-frecuencia ($Mod_1^{TF}, Mod_2^{TF}, Mod_3^{TF}, Mod_4^{TF}$) para parte real e imaginaria. Entrenamiento en el dominio del tiempo: *Switch* Φ on, Θ off y φ off. Entrenamiento en el dominio tiempo-frecuencia: *Switch* Φ off, Θ on y φ on. Test: Φ off, Θ on y φ off.

reglas difusas con una red neuronal donde se puedan entrenar esos parámetros, se conforma un sistema muy factible en el que las desventajas del uso de reglas difusas se superan con las ventajas del uso de redes neuronales. En el sentido opuesto también superamos las desventajas del uso de redes neuronales, ya que en ellas es extremadamente difícil usar conocimiento a priori sobre el sistema en cuestión y explicar el comportamiento de una red neuronal en una determinada

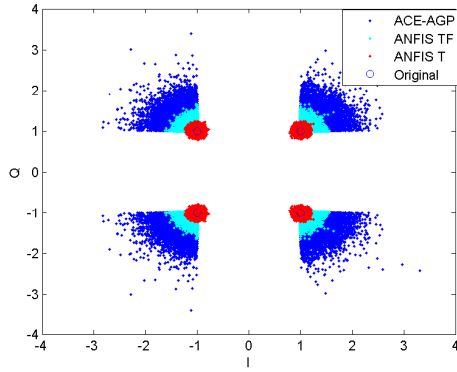


Fig. 2. Constelación QPSK tras el ACE-AGP y los ANFIS propuestos en los dominios del tiempo y tiempo-frecuencia

situación, mientras que, precisamente estos son los puntos fuertes de los sistemas difusos. A esta estructura de red híbrida resultante que combina un sistema difuso y una red neuronal se le llama ANFIS (*Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems*), propuesta en [7].

En la figura 1 se pueden observar los 2 tipos de sistemas ANFIS diseñados en este trabajo: uno en el dominio del tiempo para aprender qué señales temporales muestran bajas variaciones en su envolvente, y otro en el dominio de la frecuencia para aprender qué regiones de la constelación están permitidas o prohibidas.

A. ANFIS en el dominio del tiempo

Este primer modelo aprende cómo deben ser las señales para que tengan bajas fluctuaciones de potencia. El proceso se detalla a continuación:

1. La señal DCO-OFDM en tiempo \mathbf{x} se introduce al módulo AGP para que éste reduzca la envolvente de la señal y por consiguiente el PAPR y CM. Esta señal se utilizará como modelo para entrenar nuestro sistema *neuro-fuzzy*.
2. Las señales \mathbf{x} y \mathbf{x}^{AGP} se dividen en dos partes, los datos de test (\mathbf{x}_{ts}^{AGP} , \mathbf{x}_{ts}) y los datos de entrenamiento (\mathbf{x}_{tr}^{AGP} , \mathbf{x}_{tr}).
3. Se entrena el modelo \mathbf{Mod}^T con los datos \mathbf{x}_{tr}^{AGP} y \mathbf{x}_{tr} .
4. Se valida el modelo \mathbf{Mod}^T con los datos de test \mathbf{x}_{ts} .

Esta parte de entrenamiento y test en el dominio del tiempo se muestra en la figura 1 como un cuadro con líneas discontinuas. Una vez que se ha entrenado *offline* el modelo ya no es necesario volver a ejecutar el algoritmo AGP y el sistema está preparado para recibir y sintetizar las nuevas señales en tiempo real.

En las figuras 2 y 3 se muestran las constelaciones de los símbolos obtenidos en varios casos: símbolos originales, símbolos a la salida del ACE-AGP, a la salida del módulo en el dominio del tiempo \mathbf{Mod}^T y a la salida del 2º esquema propuesto en el dominio del tiempo-frecuencia. Como se puede observar, el primer esquema propuesto correspondiente con el dominio del tiempo, aún introduce puntos en las regiones prohibidas, por lo que es necesario, si se quiere no perder en prestaciones, una segunda fase con los sistemas *neuro-fuzzy* en frecuencia.

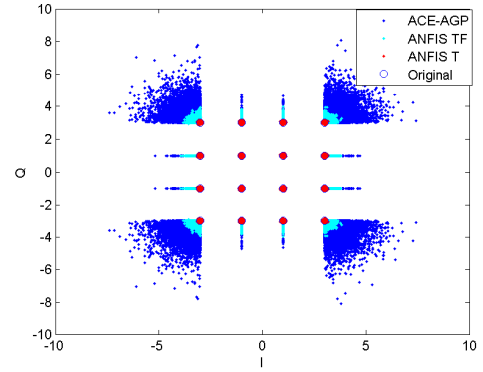


Fig. 3. Constelación 16QAM tras el ACE-AGP y los ANFIS propuestos en los dominios del tiempo y tiempo-frecuencia

B. ANFIS en el dominio de la frecuencia

Estos sistemas aprenderán qué zonas de la constelación están permitidas y cuáles no.

1. Se calculan los símbolos a través de una *DFT* tanto de la señal a la salida del primer esquema (\mathbf{x}^T) como a la salida del AGP que es la señal con envolvente reducida (\mathbf{x}^{AGP}).
2. Se van a entrenar los modelos con un conjunto de datos de entrenamiento, por lo que se dividen esos datos en entrenamiento y test, dando lugar a: \mathbf{X}_{ts}^T , \mathbf{X}_{tr}^T , \mathbf{X}_{tr}^{AGP} y \mathbf{X}_{ts}^{AGP} .
3. Únicamente se trata con la primera mitad de las subportadoras de los datos de entrenamiento ($\mathbf{X}_{tr\frac{1}{2}}^T$ y $\mathbf{X}_{tr\frac{1}{2}}^{AGP}$) para asegurar que a la salida del proceso se cumpla la simetría hermitica propia de una señal DCO-OFDM.
4. Se subdividen los datos en parte real e imaginaria ya que los modelos sólo pueden trabajar con señales del tipo *integer*.
5. Se entrenan los dos conjuntos de ANFIS, uno trabajando con la parte real de los símbolos y el otro con la parte imaginaria, cada uno de los mismos con 4 modelos diferentes dependiendo del cuadrante al que pertenencia: $Mod_{Re,1q}^{TF}$, $Mod_{Re,2q}^{TF}$, $Mod_{Re,3q}^{TF}$, $Mod_{Re,4q}^{TF}$, $Mod_{Im,1q}^{TF}$, $Mod_{Im,2q}^{TF}$, $Mod_{Im,3q}^{TF}$ y $Mod_{Im,4q}^{TF}$.
6. Se validan los ocho modelos con los datos de validación \mathbf{X}_{ts}^T .

Como se puede observar en las figuras 2 y 3, después del sistema tiempo-frecuencia, las constelaciones obtenidas son completamente válidas. Para más información se puede consultar [4], donde existe un desarrollo analítico de la implementación de ANFIS en detalle con las ecuaciones base.

IV. RESULTADOS

Para la obtención de los resultados se ha utilizado un modelo de LED blanco Philips Luxeon Rebel [9] y con la presencia de ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN).

Se han realizado simulaciones Monte Carlo con 5000 símbolos OFDM aleatorios de modulaciones QPSK y 16QAM con 256 y 1024 subportadoras. Para entrenar los modelos se han empleado un 70% de los datos, mientras que el 30% restante ha sido para el proceso de validación.

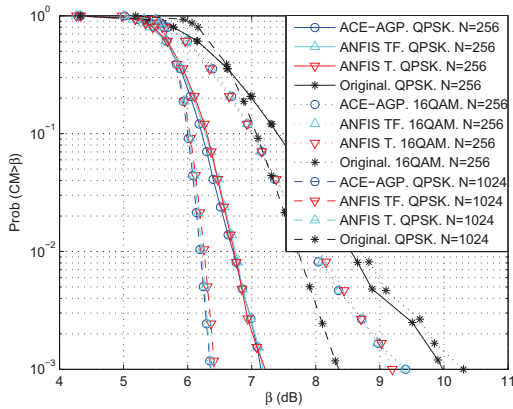


Fig. 4. Comparación de CM con QPSK y 16QAM con 256 subportadoras y QPSK con 1024 subportadoras.

En la figura 4 se pueden observar las reducciones de CM producidas por los métodos en cuestión. En modulación QPSK se consigue una reducción de aproximadamente 3 dB, mientras que en modulaciones de orden mayor como 16QAM la reducción en términos de CM es algo menor, alrededor de 1 dB. La razón de ello es que en constelaciones de órdenes mayores, el porcentaje de símbolos de la constelación que tienen margen de corrección es cada vez menor (únicamente los que están en la parte exterior de la constelación), pues en una QPSK se pueden mover el 100% de los símbolos, mientras que en 16QAM el 75%, y en 64QAM el 43,75%.

En la figura 5 se presenta una comparación de la tasa de error de bit (BER) para una modulación QPSK. Ambos esquemas propuestos mejoran las prestaciones presentadas por el modelo original. La principal razón es que se está reduciendo el valor del estadístico CM, lo cual supone que:

- El modelo del LED va a distorsionar en menor medida la señal porque trabajará en la zona considerada como la más lineal.
- El nivel de continua añadido a la señal es menor debido a que éste depende de la desviación típica de la señal en tiempo [10]. En todos los métodos usados se ha seleccionado el nivel de continua mínimo adecuado para minimizar el efecto del *clipping*, asegurándose que se trabaja por encima del *turn-on voltage* (TOV) del LED (2.7 V) y por debajo del valor máximo (3.34 V) para evitar el sobrecalentamiento del mismo.

La diferencia entre las curvas con 256 ó 1024 subportadoras se debe a que a mayor número de subportadoras, mayores fluctuaciones se producen y un mayor nivel de señal continua es necesaria para evitar el efecto del *clipping*, aunque se sigue trabajando dentro del rango de operación casi lineal del LED.

Por último, se debe destacar la mejora del método ANFIS en tiempo y frecuencia sobre el ANFIS temporal, dato que se observa en el zoom de la propia figura 5 y cuya razón se muestra en las figuras 2 y 3, donde se ve que puntos del ANFIS temporal trabajan en zona prohibida aumentando el valor de BER.

V. CONCLUSIONES

En este artículo, se han adaptado dos métodos de reducción de fluctuaciones de la envolvente a señales ópticas DCO-

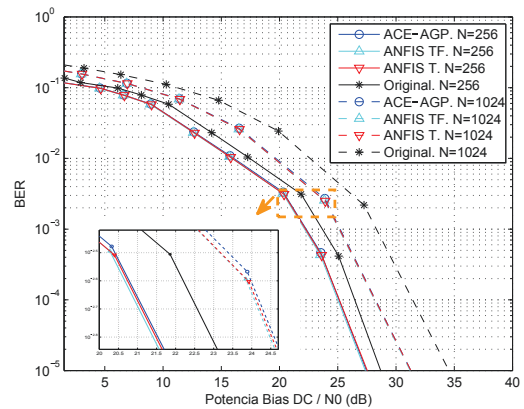


Fig. 5. BER obtenidas con el método ACE-AGP y los esquemas propuestos ANFIS en el dominio del tiempo y en tiempo-frecuencia. Modulación QPSK

OFDM para VLC en comunicaciones móviles de futura generación. Se ha demostrado que el esquema propuesto en el dominio del tiempo, a pesar de ser mucho más simple que el propio en los dominios de tiempo-frecuencia, provee similares prestaciones en términos de reducción de fluctuaciones de envolvente que el segundo, además de en términos de BER. Por lo tanto, no es necesario esa complejidad adicional que supone el 2º esquema ANFIS. Sin embargo, ambos esquemas mejoran las prestaciones en cuanto a BER con respecto al original, y teniendo en cuenta que los esquemas propuestos tienen una complejidad mucho menor que el método ACE-AGP, superan de igual manera sus prestaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos GRE3NSYST (TEC2011-29006-C03-03) y COMONSSENS (CSD2008-00010).

REFERENCIAS

- [1] J. Carruthers and J. Kahn, "Multiple-subcarrier modulation for non-directed wireless infrared communication," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 3, pp. 538–546, Abril 1996.
- [2] J. Armstrong and A. Lowery, "Power efficient optical ofdm," *Electronics Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 370–372, Marzo 2006.
- [3] S. H. Han and J. H. Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission," *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, no. 2, pp. 56–65, Abril 2005.
- [4] V. Jimenez, Y. Jabrane, A. Armada, B. Said, and A. Ouahman, "Reduction of the envelope fluctuations of multi-carrier modulations using adaptive neural fuzzy inference systems," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 59, no. 1, pp. 19–25, Enero 2011.
- [5] TDoc R1-060023, "Cubic Metric in 3GPP-LTE," *3GPP TSG RAN WG1, Tech. Rep.*, Enero 2006.
- [6] B. S. Krongold and D. L. Jones, "PAR reduction in OFDM via active constellation extension," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 49, no. 3, pp. 258 – 268, Septiembre 2003.
- [7] J.-S. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, Mayo 1993.
- [8] L. Aik, S. Yogan, and O. Jayakumar, "A study of neuro-fuzzy system in approximation-based problems," *MATEMATIKA*, vol. 23, no. 2, pp. 113–130, 2008.
- [9] Philips. Luxeon Rebel Datasheet. [Online]. Available: <http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-white>
- [10] B. Inan, S. C. J. Lee, S. Randel, I. Neokosmidis, A. Koonen, and J. Walewski, "Impact of led nonlinearity on discrete multitone modulation," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 1, no. 5, pp. 439–451, Octubre 2009.