

Adaptación de la técnica de *Outphasing* para VLC basada en la suma de luces.

Daniel G. Aller, Diego G. Lamar, Juan Rodríguez, Pablo F. Míaja y Javier Sebastián.

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas,

Universidad de Oviedo, Gijón 33204, España.

Email: garciaadaniel@uniovi.es

Abstract:

En este artículo se presenta un *driver* de LEDs de alto rendimiento basado en la técnica de *Outphasing* para comunicación por luz visible (*Visible Light Communication*, VLC). La técnica de *Outphasing* se basa en la generación de una señal senoidal modulada en amplitud y fase mediante la suma de dos señales senoidales moduladas únicamente en fase y de amplitud constante, lo cual incrementa la eficiencia de la etapa amplificadora. El prototipo presentado está realizado mediante dos amplificadores de potencia y un convertidor CC/CC. Los dos amplificadores reproducen las dos señales senoidales moduladas en fase necesarias para la técnica de *Outphasing* mientras que el convertidor CC/CC polariza los LEDs. La propuesta aprovecha que la señal deseada en el sistema VLC es luz, y en lugar de sumar ambas señales eléctricamente estas se suman en luz. Esta modificación reduce la complejidad del diseño debido al aislamiento eléctrico entre ambos amplificadores. Como resultados experimentales se presenta un transmisor basado en dos amplificadores clase E reproduciendo una modulación digital 16-QAM con una frecuencia de portadora de 5 MHz. El prototipo alcanza una eficiencia del 78 % en la generación de señal (91 % cuando se considera la eficiencia de los amplificadores y del convertidor) y una tasa binaria de hasta 4 Mbps a una distancia de 1 m.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayor parte de las comunicaciones inalámbricas se realizan mediante el uso del espectro radioeléctrico (*Radio Frequency*, RF), lo cual está llevando a una alta congestión del espectro y, por tanto, a una regulación cada vez más estricta [1]. Debido a esta situación y a las previsiones de crecimiento del tráfico inalámbrico, en los últimos años se han ido proponiendo nuevas tecnologías para las comunicaciones inalámbricas con el objetivo de aliviar la congestión del espectro de RF. Una de las alternativas más prometedoras es la comunicación por luz visible (*Visible Light Communication*, VLC) [2–4]. La tecnología VLC se basa en el uso del amplio y no regulado espectro de luz visible (desde 280 a 750 nm) y la infraestructura actual de iluminación basadas en LEDs (*Solid-State Lighting*, SSL), donde la capacidad de los LEDs de modular la luz que emiten rápidamente los hace capaces de emitir las señales necesarias para la comunicación.

El uso de la infraestructura SSL en VLC se basa en la realización de dos funciones al mismo tiempo: la función

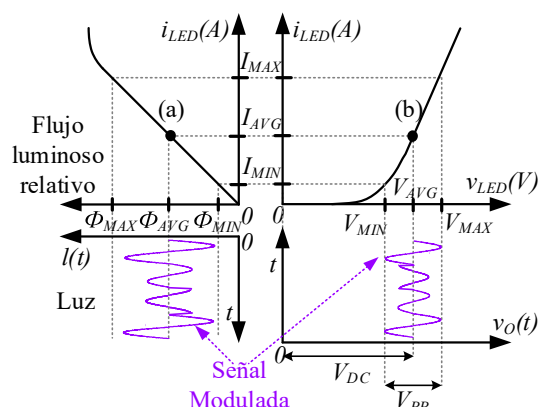


Figura 1: Curvas tensión/corriente y corriente/luz en un LED funcionando como transmisor VLC.

de iluminación y la de comunicación. En la figura 1 se ilustran ambas funciones en las curvas tensión/corriente y corriente/luz típicas de un LED, sobre las que se realizan las funciones de iluminación y comunicación aplicando una señal de comunicaciones en tensión a un LED. Para realizar la función de iluminación, el LED se polariza usando una tensión media V_{AVG} elegida dentro de la zona lineal de funcionamiento del LED, que hace que una corriente I_{AVG} media circule por el LED produciendo una luz media Φ_{AVG} . Para realizar la función de comunicación, sobre el nivel medio V_{AVG} se aplica la señal de comunicación que se quiere emitir. En el caso ilustrado se utiliza una señal que varía su amplitud (entre V_{MIN} y V_{MAX}) y su fase. Esto hace que la corriente por el LED varíe proporcionalmente entre I_{MIN} y I_{MAX} y la luz emitida entre Φ_{MIN} y Φ_{MAX} respectivamente. De la elección del punto de medio que determina la iluminación dependerá la señal máxima que se pueda emitir. En el caso de un sistema VLC, donde se quiere maximizar la señal de comunicaciones que se quiere emitir, el valor V_{AVG} ha de ser escogido en el punto medio del comportamiento lineal del LED. Es importante enfatizar que las funciones de iluminación y generación de señal pueden ser realizadas por circuitería diferente, y por lo tanto se pueden considerar eficiencias diferentes para cada una de las funciones, ya sea la eficiencia generando la señal de comunicación, la de iluminar o la del sistema completo. Debido a que una de las grandes ventajas

de los sistemas de iluminación basados en LEDs es su alta eficiencia, agregar la capacidad de comunicación inalámbrica mediante luz no debería empeorar significativamente la eficiencia total del sistema. En los últimos años, la mayor parte de las propuestas de transmisores VLC están basadas en la utilización de amplificadores lineales de potencia para realizar la función de comunicación (p. ej. Clase A, B or AB) [5–8], los cuales consiguen una eficiencia muy baja en la generación de señal, lo cual empeora la eficiencia total del sistema. Por ejemplo, la eficiencia máxima de un Clase A es del 50 % y en el caso de un Clase B es del 78.5 %, pero cuando la señal enviada no es de amplitud constante la eficiencia del amplificador es aún menor (p. ej. en una modulación digital 16-QAM, la eficiencia máxima del Clase A baja hasta el 25 % y la del Clase B hasta el 55 %).

Como alternativa al uso de amplificadores lineales, se ha propuesto el uso de convertidores CC/CC para mejorar el rendimiento del transmisor VLC [9–12]. El convertidor CC/CC generaría tanto la polarización de los LEDs como la señal de comunicación, alcanzando una eficiencia del 90 % en el sistema completo (funciones de iluminación y comunicación), pero con la desventaja de tener un ancho de banda limitado, menor que el de los amplificadores lineales y con un diseño y control más complejo.

Debido a las desventajas de ambas propuestas, en este artículo se presenta una adaptación de la técnica de *Outphasing* para VLC. La técnica de *Outphasing* fue presentada en los años 30 [13, 14] como un método de aumentar la eficiencia de los amplificadores de RF cuando la señal de comunicación tenía amplitud variable (caso de peor rendimiento de dichos amplificadores). La técnica se basa en reproducir una señal senoidal modulada en amplitud y fase mediante la suma de dos señales senoidales moduladas en fase y con amplitud constante. Al poder dividir una señal en la suma de dos señales de amplitud constante y realizando la amplificación sobre estas últimas, los amplificadores encargados de la amplificación podrán trabajar en el punto de mayor rendimiento de los mismos, aumentando considerablemente el rendimiento.

En este artículo se presenta un transmisor VLC basado en dos amplificadores clase E. Cada amplificador clase E reproduce una de las dos señales de amplitud constante necesarias para la técnica de *Outphasing*. La propuesta se basa en el mismo principio que la técnica tradicional pero aprovecha que la señal deseada en un sistema VLC es luz, realizando la suma de las dos señales de amplitud constante en luz. Al realizar la suma en luz en lugar de eléctricamente se consigue evitar la conexión eléctrica entre la salida de ambos amplificadores y se consigue aislamiento eléctrico entre las mismas, lo cual simplifica enormemente el diseño. Como resultados experimentales, se construye un transmisor VLC basado en la técnica de *Outphasing* con dos amplificadores clase E. La señal enviada es una modulación digital 16-QAM con una frecuencia de portadora de 5 MHz, alcanzando una tasa binaria de hasta 4 Mbps y una distancia de transmisión de hasta 1 m. El prototipo alcanza una eficiencia del 78 % en la generación de señal (mayor que la máxima eficiencia

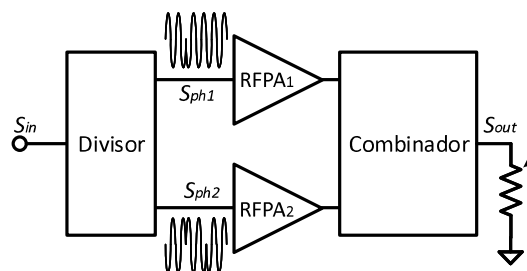


Figura 2: Diagrama de bloques tradicional de un RFPA usando la técnica de *Outphasing* compuesto por un separador, dos RFPA y un combinador.

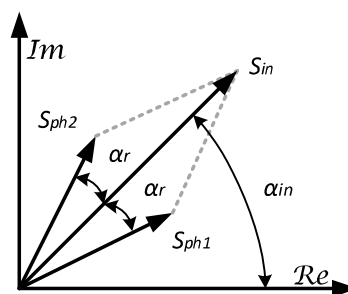


Figura 3: Diagrama fasorial ilustrando la técnica de *Outphasing*.

que alcanzarían las alternativas lineales reproduciendo esa modulación) y un 92 % en la eficiencia del sistema global (próxima a la eficiencia de la alternativa usando convertidores CC/CC).

II. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA TÉCNICA DE OUTPHASING

La figura 2 muestra la implementación tradicional de la técnica de *Outphasing* [13, 14]. El circuito está compuesto por un separador, dos amplificadores de potencia de RF (*Radio Frequency Power Amplifier*, RFPA) y un combinador.

II-A. Análisis matemático

Por simplicidad, la señal de comunicaciones $S_{in}(t)$

$$S_{in}(t) = A_{in}(t) \sin[2\pi f_s t + \alpha_{in}(t)] \quad (1)$$

es una señal senoidal que varía su amplitud $A_{in}(t)$ y su fase $\alpha_{in}(t)$. A partir de $S_{in}(t)$, el divisor genera dos señales senoidales de la misma frecuencia f_s , moduladas en fase y de amplitud constante $S_{ph1}(t)$ and $S_{ph2}(t)$

$$\begin{aligned} S_{ph1}(t) &= A_{ph} \sin[2\pi f_s t + \alpha_{ph1}(t)] \\ S_{ph2}(t) &= A_{ph} \sin[2\pi f_s t + \alpha_{ph2}(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

cuya suma es $S_{in}(t)$. $S_{ph1}(t)$ y $S_{ph2}(t)$ tiene la misma amplitud A_{ph} y fases $\alpha_{ph1}(t)$ y $\alpha_{ph2}(t)$ respectivamente, como se muestra en la figura 3. Sobre estas dos señales $S_{ph1}(t)$ y $S_{ph2}(t)$ se realiza la función de amplificación, consiguiendo hacer trabajar a los amplificadores en su zona de mayor rendimiento, dado que las señales son de amplitud constante.

Asumiendo que ambos RFPAs tienen la misma ganancia k , la señales de salida de los amplificadores son kS_{ph1} y kS_{ph2} respectivamente. La señal de salida es la suma de estas dos señales, $S_{out}(t) = kS_{ph1} + kS_{ph2}$, y por lo tanto $S_{out}(t)$ y $S_{in}(t)$ tienen la misma fase y solo se diferencian en la amplitud.

Las fases $\alpha_{ph1}(t)$ y $\alpha_{ph2}(t)$ pueden ser obtenidas en función de la fase de la señal de entrada $\alpha_{in}(t)$ y de una fase relativa $\alpha_r(t)$ como se muestra en el diagrama fasorial 3. La amplitud de la señal de salida $A_{out}(t)$ puede ser obtenida en función de la fase relativa $\alpha_r(t)$ mediante trigonometría

$$\begin{aligned}\alpha_{ph1}(t) &= \alpha_{in}(t) - \alpha_r(t) \\ \alpha_{ph2}(t) &= \alpha_{in}(t) + \alpha_r(t) \\ A_{out}(t) &= 2kA_{ph}\cos[\alpha_r(t)]\end{aligned}\quad (3)$$

En conclusión, la amplitud de la señal de salida $A_{out}(t)$ depende de la fase relativa $\alpha_r(t)$, de la ganancia k de los RFPAs y de la amplitud A_{ph} y, mientras que la fase de la señal de salida dependerá de $\alpha_{in}(t)$ y por lo tanto, la amplitud y fase de la señal de salida pueden ser controladas independientemente.

III. TÉCNICA LIGHT-OUTPHASING PARA TRANSMISORES VLC

A la hora de implementar un transmisor basado en *Outphasing*, la mayor dificultad radica en el diseño del combinador de salida que suma las dos señales y conecta las salidas de los RFPAs. La conexión entre las salidas de dos amplificadores no puede hacerse directamente debido a que la impedancia que verá uno de los amplificadores dependerá del punto de funcionamiento del otro amplificador y viceversa [15], creándose una dependencia indeseada entre ellos. Este efecto es especialmente crítico en amplificadores con circuitos resonantes a la salida o filtros (p. ej. Clase E), donde el correcto funcionamiento del mismo depende del ajuste del filtro, donde en el caso de *Outphasing* se verá modificado el punto de funcionamiento y por la impedancia de salida del otro amplificador. Las soluciones a este problema son el diseño de combinadores que evitan este efecto [15–19], requiriendo análisis matemático complejo y complicando el diseño.

La idea de la propuesta *Light-Outphasing* es la de separar la carga de LEDs en dos *strings* y conectar cada una a uno de los RFPAs y que las señales se sumen en luz como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 4 y con las formas de onda de ejemplo de la figura 5. Ambos *strings* de LEDs están polarizados con un convertidor CC/CC externo que aplica la tensión media V_{AVG} necesaria. Debido a que las señales se suman en luz en lugar de eléctricamente, se evita la necesidad de usar el combinador necesario en la configuración tradicional, lo cual implica una gran simplificación en el diseño y la eliminación de la influencia indeseada entre amplificadores, mejorando así la eficiencia del sistema. El transmisor VLC está hecho con dos amplificadores clase E que generan las señales S_{ph1} y S_{ph2} necesarias para conformar el *Outphasing*. Dado que se evita la conexión entre las salidas de ambos amplificadores, la condición de conmutación a tensión cero (*Zero Voltage*

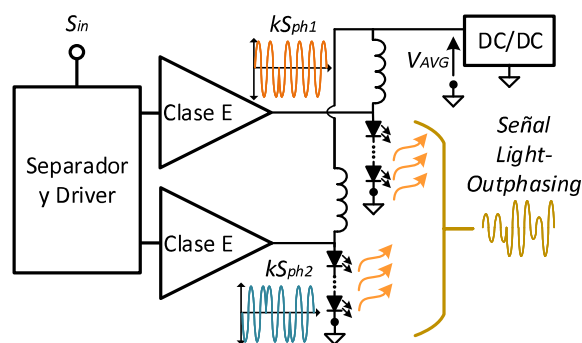


Figura 4: Diagrama de bloques del amplificador usando la técnica de *Light-Outphasing*.

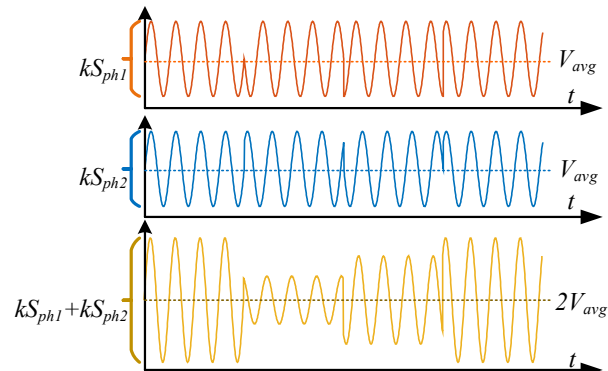


Figura 5: Señales de ejemplo del funcionamiento de la técnica de *Light-Outphasing*.

Switching, ZVS) del amplificador clase E no depende del punto de operación del otro amplificador, simplificando su diseño.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar el concepto de la técnica de *Light-Outphasing* propuesta se construye un prototipo de un transmisor VLC hecho con dos RFPAs clase E mostrado en la figura 6.

IV-A. Esquema de modulación

Para validar la comunicación en el prototipo se reproduce una modulación digital 16-QAM con una frecuencia de portadora de 5 MHz. La modulación contiene 16 señales diferentes, codificándose cada señal con 4 bits y cada señal se mantiene durante un tiempo de símbolo T_{sym} de 5 periodos de señal, alcanzando una tasa binaria de 4 Mbps. En la figura 7 se ilustra el proceso de *Light-Outphasing* sobre las señales medidas en el prototipo. Las corrientes $I_{ph1}(t)$ y $I_{ph2}(t)$ son las corrientes por los dos *string* de LEDs e ilustran la luz emitida por las mismas. Dado que las dos señales tienen amplitud constante, la señal emitida por ambos *strings* también es constante, pero debido al desfase entre ellas, el resultado de la suma en luz, medido por el receptor óptico y mostrado como $V_{rx}(t)$ consigue reproducir los cambios de amplitud y fase de la modulación.

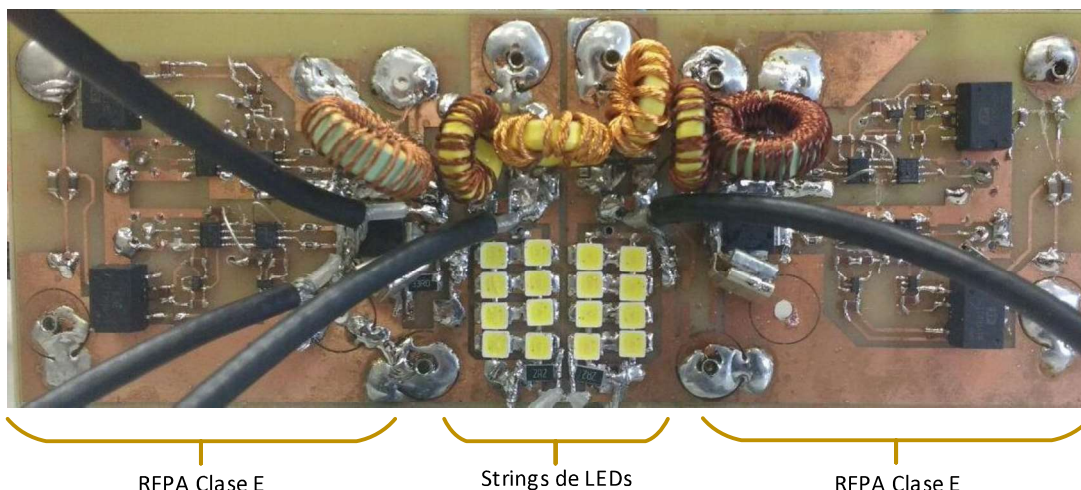


Figura 6: Prototipo contruido de dos RFPA Clase E aplicando la técnica de *Light-Outphasing*.

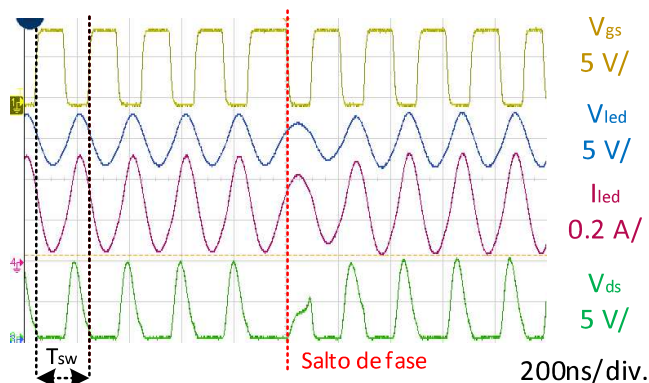


Figura 7: Señales de comunicación del transmisor. I_{ph1} y I_{ph2} con las corrientes por los strings de LEDs de cada amplificador y V_{rx} es la señal recibida por el receptor óptico, resultado de las suma de luces.

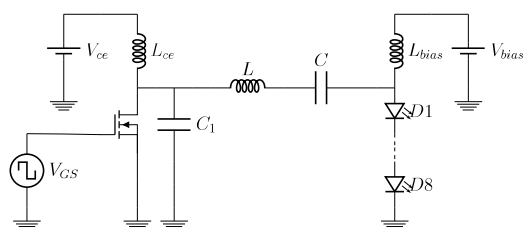


Figura 8: Circuito de uno de los amplificadores Clase E que forman el transmisor.

IV-B. Diseño del RFPA Clase E

Para validar la adaptación de la técnica de *Outphasing* a VLC se construye un prototipo de transmisor hecho con dos amplificadores Clase E. Los dos RFPA son diseñados idénticamente, con una frecuencia de conmutación de 5 MHz, reproduciendo una señal senoidal a la salida de la misma

frecuencia. Cada amplificador es conectado a un *string* de 8 *XLamp MX-3* LEDs. Los LEDs están conectados en serie y son polarizados en su zona lineal usando una fuente CC/CC externa ($V_{AVG} = 28V$, $I_{AVG} = 0,25A$).

En la figura 8 se muestra el circuito de uno de los amplificadores clase E que forman el transmisor. El amplificador está compuesto por el circuito resonante (C_1 , C y L), la bobina de polarización del amplificador L_{ce} , y la bobina de polarización de los LEDs L_{bias} . El circuito resonante formado por C_1 , C y L se diseña acorde al ancho de banda necesario por modulación utilizada. En la figura 4 se puede observar el efecto del filtro resonante en la señal de comunicaciones. Si el factor de calidad Q del filtro es excesivamente grande, el ancho de banda es demasiado estrecho y no deja pasar el espectro de la señal de comunicaciones. Por lo tanto el ancho de banda del filtro resonante ha de ser diseñado acorde con la modulación utilizada.

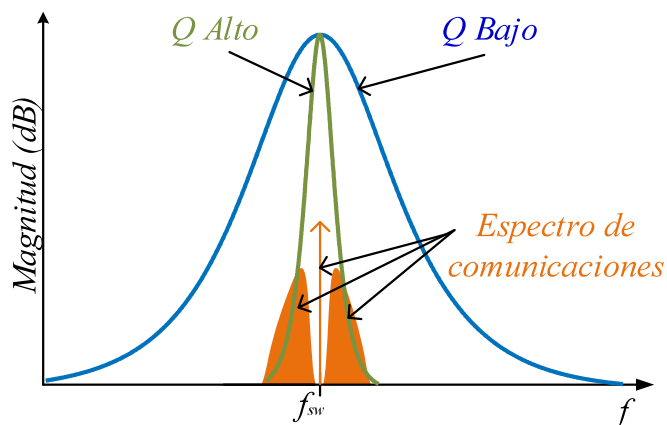


Figura 9: Efecto del Q del filtro resonante del Clase E en la señal de comunicación.

El primer paso en el diseño es la estimación del ancho de banda mínimo necesario para la modulación. Aunque la modulación objetivo es una 16-QAM, la señal que reproduce cada amplificador es una modulación de fase, y es sobre la que hay que hacer la estimación de ancho de banda. Basándose en [20], la estimación de ancho de banda necesario para cada una de las fases necesarias para *Outphasing* en este caso es de 1.5 MHz. En el caso del amplificador clase E, el ancho de banda viene definido por el factor de calidad Q del filtro resonante definido en 4.

$$Q = \frac{f_{sw}}{\Delta f_{sw}} = \frac{5MHz}{1,5MHz} = 3,3 \quad (4)$$

Siguiendo las reglas de diseño del amplificador clase E con Q bajos [21, 22] se obtienen los valores de diseño del clase E mostrados en la tabla I.

Tabla I: VALORES DE DISEÑO DEL CIRCUITO RESONANTE DEL CLASE E.

C_1	C	L
396 pF	1,28 nF	1,59 μ H

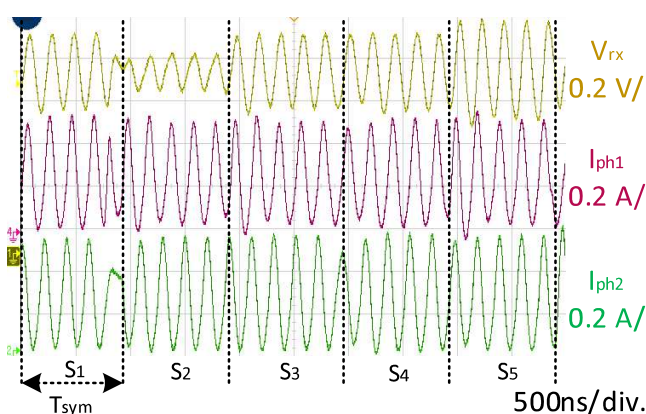


Figura 10: Signals of one Class E RFPA when a phase change occurs. V_{gs} is the gate signal and V_{ds} is the drain to source voltage. V_{led} and I_{led} are the voltage across and the current through the LED string.

En la figura 10 se muestran las formas de onda más significativas del clase E durante un salto de fase. La señal $V_{gs}(t)$ es la señal que controla la puerta del MOSFET en la que se observa un cambio de fase. Antes y después del cambio de fase se observa el correcto funcionamiento del amplificador, donde $V_{led}(t)$ y $I_{led}(t)$ son la tensión y corriente por los LEDs respectivamente y $V_{ds}(t)$ la tensión drenador-fuente del MOSFET. Se observa que la señal de salida es senoidal y que se alcanza conmutación a tensión cero (ZVS). En cambio, durante el cambio de fase hay un ciclo de transición hasta que se alcanza la fase deseada y durante el cual no se alcanza ZVS. Este último efecto reduce la eficiencia del amplificador, generando una relación entre tiempo de símbolo T_{sym} y

eficiencia. A menos tiempo de símbolo, mayor tasa binaria pero más saltos de fase y por lo tanto menor eficiencia.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se presenta el diseño de un transmisor VLC compuesto por un convertidor CC/CC y dos amplificadores Clase E para validar la adaptación de la técnica de *Outphasing* a las comunicaciones VLC (*Light-Outphasing*). En esta adaptación, las dos señales de amplitud constante se suman en luz en lugar de eléctricamente, lo cual simplifica enormemente el diseño y mejora la eficiencia del sistema final. Al conseguir un aislamiento entre ambos amplificadores, se consigue eliminar la parte más compleja del diseño de la técnica tradicional, el combinador de señal de salida. El transmisor propuesto reproduce una modulación digital 16-QAM, alcanzando una tasa binaria de 4 Mbps a una distancia de 1 m. El prototipo alcanza una eficiencia del 78 % en la generación de señal (superior a la máxima eficiencia de un amplificador Clase A o B) y de un 92 % en la eficiencia del sistema global (próxima a la eficiencia de la alternativa usando convertidores CC/CC).

AGREDECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía a través de del proyecto MINECO-17-DPI2016-75760-R, el Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto IDI/2018/000179, la beca BP17-91 y los fondos FEDER.

REFERENCIAS

- [1] Cisco Systems. (2017) Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016-2021.
- [2] "IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-range wireless optical communication using visible light," *IEEE Std 802.15.7-2011*, pp. 1–309, Sept 2011.
- [3] A. Jovicic, J. Li, and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26–32, December 2013.
- [4] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 9, pp. 56–62, September 2011.
- [5] H. Chun, S. Rajbhandari, G. Faulkner, D. Tsonev, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, D. C. O'Brien, and H. Haas, "LED based wavelength division multiplexed 10 Gb/s visible light communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 13, pp. 3047–3052, July 2016.
- [6] J. Vučić, C. Kottke, K. Habel, and K. D. Langer, "803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary," in *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, March 2011, pp. 1–3.
- [7] F.-M. Wu, C.-T. Lin, C.-C. Wei, C.-W. Chen, Z.-Y. Chen, and H.-T. Huang, "3.22-Gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation," in *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, March 2013, pp. 1–3.
- [8] Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi, and N. Chi, "8-Gb/s RGBY LED-Based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer," *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 1–7, Dec 2015.

- [9] J. Rodriguez, D. G. Lamar, P. F. Miaja, and J. Sebastian, "Re-producing single-carrier digital modulation schemes for VLC by controlling the first switching harmonic of the DC-DC power converter output voltage ripple," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 7994–8010, Sept 2018.
- [10] J. Rodriguez, D. G. Lamar, P. F. Miaja, D. G. Aller, and J. Sebastian, "Power efficient VLC transmitter based on pulse-width modulated DC-DC converters and the split of the power," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018.
- [11] J. Sebastian, D. G. Lamar, D. G. Aller, J. Rodriguez, and P. F. Miaja, "On the role of power electronics in visible light communication," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pp. 1–1, 2018.
- [12] J. Rodriguez, D. G. Lamar, D. G. Aller, P. F. Miaja, and J. Sebastian, "Efficient visible light communication transmitters based on switching-mode DC-DC converters," *Sensors*, vol. 18, no. 4, 2018.
- [13] H. Chireix, "High power outphasing modulation," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 23, no. 11, pp. 1370–1392, Nov 1935.
- [14] L. F. Gaudernack, "A Phase-Opposition system of amplitude modulation," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 26, no. 8, pp. 983–1008, Aug 1938.
- [15] F. Raab, "Efficiency of outphasing RF Power-Amplifier systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 33, no. 10, pp. 1094–1099, Oct 1985.
- [16] M. Özen, M. van der Heijden, M. Acar, R. Jos, and C. Fager, "A generalized combiner synthesis technique for Class-E outphasing transmitters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 64, no. 5, May 2017.
- [17] R. A. Beltran and F. H. Raab, "Simplified analysis and design of outphasing transmitters using Class-E power amplifiers," in *IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications (PAWR)*, Jan 2015.
- [18] R. Marante, M. A. Rui, and J. A. Garcia, "A UHF outphasing transmitter based on Class E power amplifiers," in *2012 Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits*, Sept 2012, pp. 1–3.
- [19] R. Beltran, F. H. Raab, and A. Velazquez, "HF outphasing transmitter using Class-E power amplifiers," in *2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, June 2009, pp. 757–760.
- [20] J. Proakis, *Digital Communications*, ser. Electrical engineering series. McGraw-Hill, 2008.
- [21] M. Kazimierczuk and K. Puczek, "Exact analysis of Class E tuned power amplifier at any Q and switch duty cycle," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 149–159, February 1987.
- [22] M. K. Kazimierczuk, "Class E tuned power amplifier with nonsinusoidal output voltage," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 21, no. 4, pp. 575–581, Aug 1986.