

Entorno experimental PAM-4 para la evaluación de DSP orientado a implementaciones en ASICs para comunicaciones ópticas

Ramón Cajal-Pérez, David Izquierdo, Natalia Herguedas, Ignacio Garcés

Afiliación: Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF)
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.
Tel. +34-976762707, e-mail: rcajal@unizar.es

Resumen

En este trabajo se desarrolla una plataforma experimental de transmisión y recepción óptica de señales PAM-4 destinada a la evaluación de algoritmos de procesamiento digital de señal (DSP) para sistemas de comunicaciones ópticas de alta velocidad, con vistas a futuras implementaciones hardware en tiempo real basadas en ASICs.

Introducción

El crecimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas de alta velocidad ha impulsado la necesidad de soluciones hardware capaces de realizar DSP para mejorar la calidad de las señales recibidas a la vez que se trata de conseguir este objetivo con menor latencia y consumo energético [1]. En este contexto, este trabajo plantea el desarrollo de circuitos ASIC para el procesamiento de señales en sistemas de transmisión óptica basados en óptica integrada, con el objetivo de migrar algoritmos desde un entorno software a arquitecturas hardware. Como base experimental, se ha implementado un enlace de modulación en intensidad y detección directa (IM/DD) con modulación PAM-4 para validar el comportamiento de la señal [2]. Sobre este modelo se han evaluado distintos filtros y la sensibilidad en la razón de errores de bit (BER), estableciendo una referencia para el desarrollo posterior de los módulos hardware.

PAM-4 y arquitectura del sistema

La modulación PAM-4 es una modulación en intensidad que permite transmitir dos bits por símbolo, duplicando la capacidad de transmisión respecto a sistemas binarios convencionales [3]. El sistema experimental, que representa una plataforma experimental para la validación de algoritmos DSP y futuras implementaciones hardware [4], se muestra en la figura 1. Utiliza un generador arbitrario de formas de onda (AWG) de 80 GSa/s para generar la señal eléctrica PAM-4, que posteriormente modula una fuente láser continua (TLS) mediante un

modulador Mach-Zehnder (MZM). La señal óptica atraviesa un enlace de fibra de pequeña longitud, lo que se denomina Back-to-Back (BTB), incluyendo un atenuador óptico variable (VOA) para controlar la potencia recibida. Finalmente, la señal es detectada mediante un fotodetector y capturada con un osciloscopio digital (DSO) del que se obtienen los datos mediante un ordenador donde son almacenados y procesados para evaluar el rendimiento del sistema. En la figura 2 se muestra un ejemplo de diagrama de ojo correspondiente a una transmisión PAM-4 donde se pueden distinguir los 4 niveles de amplitud.

Resultados

Con el objetivo de analizar el rendimiento del sistema PAM-4, se estudió la evolución de la BER frente a distintas técnicas de filtrado y DSP aplicadas en recepción. Se evaluaron configuraciones basadas en filtros RC y RRC [5], así como un escenario sin filtrado en transmisión y con filtrado Butterworth en recepción. Además, se incorporaron técnicas de ecualización LMS y optimización de umbrales mediante k-means. Todos estos resultados se pueden visualizar en las figuras 3 y 4, en las que se muestran los resultados para tasas de transmisión de 4 y 10 Gbps respectivamente. En ellos se aprecia que el uso de filtrado y DSP mejora significativamente el comportamiento del sistema, reduciendo la BER para distintos niveles de potencia óptica recibida. La configuración RRC combinada con ecualización LMS proporciona las mejores prestaciones globales, mientras que, en ausencia de ecualización, la mejor respuesta se obtiene empleando únicamente filtrado Butterworth en recepción. Asimismo, el uso de k-means mejora la discriminación entre niveles PAM-4 respecto al empleo de umbrales fijos en todas las situaciones.

Planteamiento de ASICs

El diseño de los ASICs propuestos busca implementar diferentes bloques asociados al procesamiento digital de señal dentro de sistemas

fotónicos de alta velocidad. Entre los módulos destacan las etapas de adquisición, sincronización, filtrado digital, ecualización, recuperación de portadora y análisis de calidad de transmisión. En este contexto, se contemplan específicamente bloques como el PLL (Phase-Locked Loop) para la recuperación y estabilización de la sincronización de fase y frecuencia, los filtros digitales para la reducción de ruido y limitación de banda, y el ecualizador adaptativo, encargado de compensar la distorsión del canal y mitigar efectos como la dispersión o interferencias entre símbolos. El objetivo global en este trabajo es la validación de los algoritmos mediante procesamiento software, para posteriormente adaptar dichas soluciones a arquitecturas digitales sintetizables e implementables sobre hardware ASIC.

Conclusiones

Se ha desarrollado una plataforma experimental PAM-4 de transmisión y recepción óptica destinada a la evaluación de técnicas de procesamiento digital de señal orientadas al desarrollo de arquitecturas ASIC para comunicaciones ópticas de alta velocidad. Los resultados obtenidos muestran que el uso de filtrado RC y RRC mejora el comportamiento del sistema frente a ISI y ruido, reduciendo la BER. Además, la incorporación de técnicas de ecualización LMS y del algoritmo k-means permite optimizar la detección de niveles PAM-4 y mejorar la discriminación de símbolos.

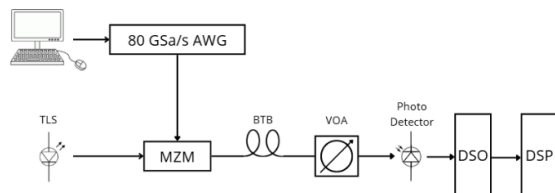


Figura 1. Diagrama de bloques del entorno físico implementado para la transmisión y recepción de la señal PAM-4.

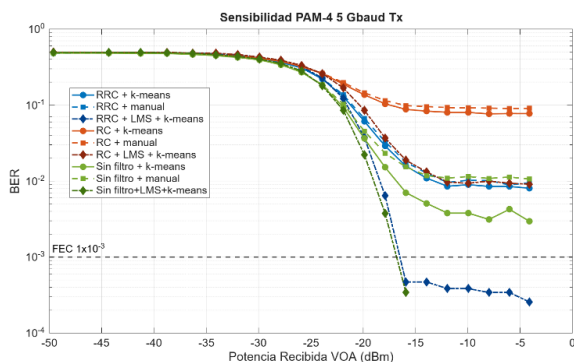


Figura 3. Curvas de sensibilidad de BER para una tasa de transmisión de 2 Gbaudios.

Referencias

- [1]. NAGARAJAN, Radhakrishnan, LYUBOMIRSKY, Ilya y AGAZZI, Oscar, 2021. Low Power DSP-Based Transceivers for Data Center Optical Fiber Communications (Invited Tutorial). *Journal of Lightwave Technology*. 15 agosto 2021. Vol. 39, no. 16, pp. 5221-5231. DOI 10.1109/JLT.2021.3072551.
- [2]. BACHTIAR, Y.A.; ADIONO, T. PAM-4 Modulator-Demodulator Design Modeling for Visible Light Communication (VLC). In: 2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices. Bandung, Indonesia, 2019. IEEE. pp. 1–5.
- [3]. PARK, Henry, ABDULLATIF, Mohammed, CHEN, Ehung y ALI, Tamer, 2024. 112-Gb/s DSP-Based PAM-4 Transceivers for Large-Scale Ethernet Switching Systems. *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society*. 16 diciembre 2024. Vol. 4, pp. 276-288. DOI 10.1109/OJSSCS.2024.3488654.
- [4]. GARCÍA LÓPEZ, Iria, RITO, Pedro, ULUSOY, A. Cagri, AWNY, Ahmed y KISSINGER, Dietmar, 2016. PAM-4 Receiver with Integrated Linear TIA and 2-bit ADC in 0.13 μm SiGe:C BiCMOS for High-Speed Optical Communications. En: 2016 IEEE Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). Austin, TX, USA, 25-27 enero 2016. IEEE, pp. 58-61. DOI 10.1109/SIMIC.2016.7431671.
- [5]. CUBUKCU, E. Root Raised Cosine (RRC) Filters and Pulse Shaping in Communication Systems. In: AIAA Conference. Houston, TX, United States, 18 May 2012. Report No.: JSC-CN-26387.

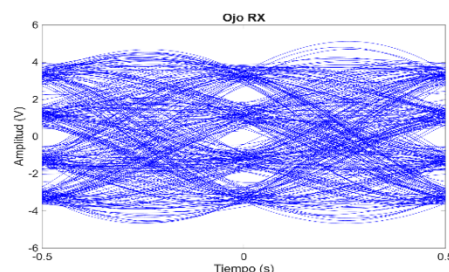


Figura 2. Diagrama de ojo de la señal PAM-4 transmitida

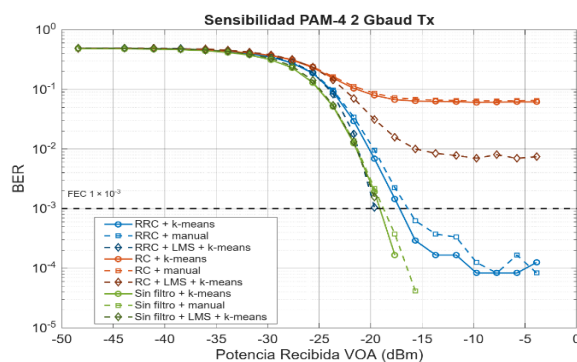


Figura 4. Curvas de sensibilidad de BER para una tasa de transmisión de 5 Gbaudios.