

# Arquitectura de red óptica pasiva sobre GbE basada en modulación IM/FSK

Juan José Martínez, Alicia López, Asier Villafranca, María Ángeles Losada, Ignacio Garcés  
jjosemar@unizar.es, aliclope@unizar.es, asiervv@unizar.es, alosada@unizar.es, ngarcés@unizar.es  
Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF). Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón  
Parque Tecnológico Walqa, Ed.1 22197 Cuarte (Huesca) Tfno. +34 974215481

**Abstract-** In this paper we propose and report experimental results of a Passive Optical Network (PON) architecture over Gigabit Ethernet (GbE) frames. Our proposal is based on a colorless, cost-effective and reusable end-user terminal or Optical Network Unit (ONU). One single wavelength is used for communication with each ONU: downstream data is carried using Frequency Shift Keying (FSK) modulation, while upstream data is carried using conventional Intensity Modulation (IM). This is performed over the same optical carrier via an external modulator, thus simplifying the ONU, which does not require an additional return laser source. Error rates for down and upstream have been measured, showing the feasibility of our proposal and its performance for distances in the range of the access area.

## I. INTRODUCCIÓN

Los avances producidos en los últimos años en el campo de las comunicaciones ópticas han estado principalmente enfocados hacia el aumento de la capacidad de la red troncal. Simultáneamente, las necesidades de comunicación de los usuarios finales han aumentado de forma espectacular, lo cual ha evidenciado el cuello de botella entre la red troncal y las redes locales a las que están conectados. Es por eso que la investigación más reciente en redes ópticas intenta solucionar la falta de capacidad en redes metropolitanas y de acceso. Las arquitecturas de red óptica pasiva (*Passive Optical Network*, PON) están adquiriendo gran interés por su sencilla aplicación y ahorro de costes en el área de acceso local (*First Mile*) [1].

Una red PON está compuesta por un terminal de línea óptica (*Optical Line Terminal*, OLT) que representa el interfaz entre la red de acceso local y otra red de jerarquía superior y varias unidades de red óptica (*Optical Network Units*, ONUs), donde están conectados los usuarios finales. Como su propio nombre indica, las redes PON se caracterizan por eliminar cualquier componente activo entre OLT y ONUs de manera que el encaminamiento del tráfico se produce únicamente mediante componentes pasivos, como acopladores o divisores de potencia [2].

La tendencia actual de diseño de redes PON se centra en la simplificación del terminal de usuario. Además, debido a la reducción de costes implícita, los diseños de ONU más atractivos son aquellos que permiten prescindir de fuentes ópticas, lo cual las hace independientes de la longitud de onda de la portadora óptica [3-5].

En este trabajo, se propone y demuestra la viabilidad de una red PON basada en tramas Gigabit Ethernet (GbE). Ethernet es la tecnología predominante tanto en redes de área local como en metropolitanas y de área extensa. En nuestro diseño, la ONU está dotada de un modulador externo que permite la reutilización de la longitud de onda portadora de la información en el enlace descendente, evitando así la necesidad de una fuente óptica adicional para el enlace ascendente.

## II. METODOLOGÍA

En nuestro experimento pretendemos analizar las prestaciones de un enlace entre un OLT y una ONU en una arquitectura PON. El diseño propuesto es escalable a redes con un OLT sirviendo hasta 32 ONUs, situación considerada

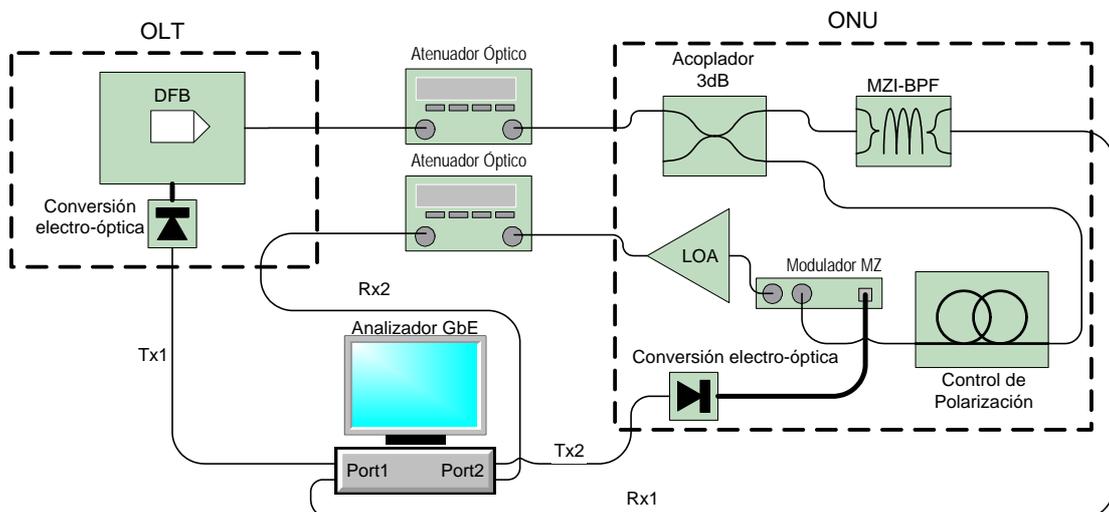


Fig. 1. Esquema de montaje del experimento

como la máxima en entornos EPON. Lo cual se puede conseguir simplemente añadiendo dos acopladores 1:N (siendo N el número de ONUs), uno de los acopladores para el enlace descendente (de OLT a ONUs) y otro para el ascendente (de ONUs a OLT). En el experimento la información enviada son tramas GbE generadas por un analizador de tráfico. En el enlace descendente, el OLT transmite la información mediante modulación en frecuencia FSK, lo cual permite que la ONU reutilice la señal recibida para insertarle las tramas GbE del enlace ascendente mediante modulación en intensidad IM. De esta forma se puede abaratar mucho el coste de la ONU, ya que como los elementos dentro de la ONU funcionan para un gran rango de longitudes de onda, los costes se reducen aún más, al poder utilizar la misma ONU en redes a diferentes longitudes de onda (incluso se podría utilizar para modulaciones WDM). Otro de los elementos que reducen potencialmente el coste de la ONU es el hecho de trabajar en ambos enlaces en una única longitud de onda eliminando la presencia de un conversor. La desventaja es que el trabajar en una única longitud de onda debemos evitar posibles problemas de reflexiones y efectos no lineales que podrían aparecer si transmiéramos a la misma longitud de onda por una misma fibra en diferentes sentidos, por lo que en este trabajo se ha optado por dividir los canales ascendente y descendente en dos fibras separadas físicamente para realizar el estudio de forma independiente.

El esquema del experimento realizado se representa en la figura 1, donde evaluamos el equivalente a una comunicación en una red PON entre el terminal (OLT) y una unidad de red (ONU). En el esquema, el canal 1 (asociado al mismo puerto del analizador de tráfico GbE) corresponde al canal descendente, donde las tramas GbE ópticas generadas son convertidas a señales eléctricas y utilizadas para modular directamente la corriente de bias de un láser DFB. Esto provoca una desviación en frecuencia a causa del chirp adiabático del propio láser [6], haciendo que la señal GbE se transmita como una modulación FSK sobre el enlace. Para conseguir la excursión de corriente deseada, la señal generada por el analizador GbE es atenuada adecuadamente en la conversión electro-óptica. La corriente de bias del láser DFB ha sido situada en torno a los 58mA y la modulación de las tramas GbE introduce una desviación en torno a este punto de unos  $\pm 4\text{mA}$  produciendo una desviación en frecuencia aproximada de 1.2GHz. La señal así obtenida es la salida del OLT al enlace descendente.

La señal proveniente del OLT pasa por un atenuador óptico encargado de simular las pérdidas asociadas a la fibra óptica. Se han realizado pruebas reales con hasta 50 km de fibra SMF (distancia superior a las típicas en redes de acceso) y no se han observado pérdidas apreciables atribuibles a la dispersión a pesar de estar modulando directamente el láser. Por ello consideramos que la influencia de la dispersión es despreciable para las condiciones de nuestro enlace y que éste puede ser aproximado únicamente con el atenuador.

En la entrada de la ONU hay un acoplador 3dB que divide la señal. En una de las salidas del acoplador las tramas GbE del enlace descendente, que se encuentran moduladas en frecuencia, son pasadas por un filtro paso banda óptico lo suficientemente estrecho como para ser capaz de eliminar

uno de los dos tonos FSK. De esta forma, las variaciones en frecuencia ópticas son convertidas en variaciones de amplitud que pueden ser detectadas perfectamente por el receptor óptico convencional del puerto 1 del Analizador GbE. Esto se podrá realizar siempre y cuando la modulación directa del DFB y las características del filtro estén adecuadamente sintonizadas. En nuestro caso utilizamos un filtro basado en un interferómetro diferencial Mach-Zehnder (MZDI) que hemos diseñado específicamente y está fabricado únicamente con fibra.

Para el enlace ascendente utilizamos la otra salida del acoplador. Pasamos dicha señal por un controlador de polarización, para eliminar las pérdidas asociadas a este fenómeno. Este proceso es necesario para no introducir pérdidas adicionales en el enlace de retorno, ya que este enlace es el que limita en potencia debido a la reutilización de la portadora óptica por parte de la ONU. A continuación, la señal entra en el modulador Mach-Zehnder donde es modulada en intensidad con las tramas GbE emitidas por el puerto 2 del analizador. En dicha modulación tendremos un pequeño residuo asociado a la modulación FSK utilizada en el enlace descendente. De todos modos, este efecto es mínimo gracias a la pequeña separación entre tonos FSK y a la optimización del voltaje de bias del modulador. Antes de ser transmitida hacia el OLT, y para compensar las pérdidas de los concentradores de subida, esta señal es amplificada mediante un amplificador de semiconductor (SOA) con 14 dB de ganancia. El enlace ascendente está representado por otro atenuador óptico con la misma atenuación que la del enlace descendente (puesto que representan la misma distancia). Puesto que aquí tenemos la señal modulada externamente y en amplitud, el efecto de la dispersión nos afecta aún menos que en el enlace descendente. Finalmente la señal llega al OLT, y es detectada directamente por el puerto de recepción 2 del analizador GbE.

### III. RESULTADOS

Para evaluar el comportamiento de la red propuesta se han realizado diversas medidas en ambos enlaces (ascendente y descendente), teniendo en cuenta que la modulación del DFB, la anchura del filtro MZDI y el voltaje del modulador MZ están optimizados específicamente para el tráfico GbE y para las características de nuestro montaje.

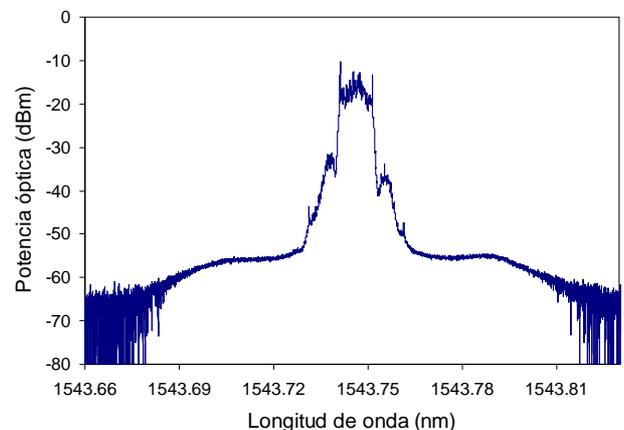


Fig. 2. Espectro de la señal presente en el enlace descendente, modulación fsk.

En la figura 2 podemos ver el espectro óptico de la señal GbE modulada en FSK tal y como es enviada por el enlace descendente. Para la captura de esta imagen hemos usado un analizador de espectros ópticos de alta resolución (BOSA de Aragón Photonics Labs [7]). Se pueden apreciar los dos tonos principales de la modulación FSK, con una separación entre ambos de 1.2 GHz aproximadamente.

El ojo de la señal tras la demodulación FSK lo podemos ver en la figura 3. Observamos que a pesar de que el ojo no es ideal, sigue encajando perfectamente con la máscara de señal GbE, por lo que el analizador no tendrá ningún problema para identificarla.

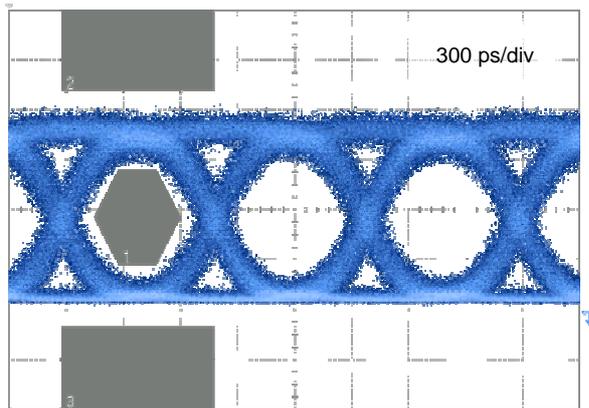


Fig. 3. Ojo de la señal recibida por la ONU (enlace descendente)

Por otra parte, en el enlace ascendente, el espectro de la señal presenta un aspecto muy diferente ya que ahora realizamos una modulación en intensidad mediante un modulador externo. Podemos apreciar su espectro de alta resolución en la figura 4. En esta figura se representan dos espectros, por una parte el de una señal GbE únicamente con modulación IM y por otra el de la señal del enlace ascendente, con modulación combinada IM/FSK.

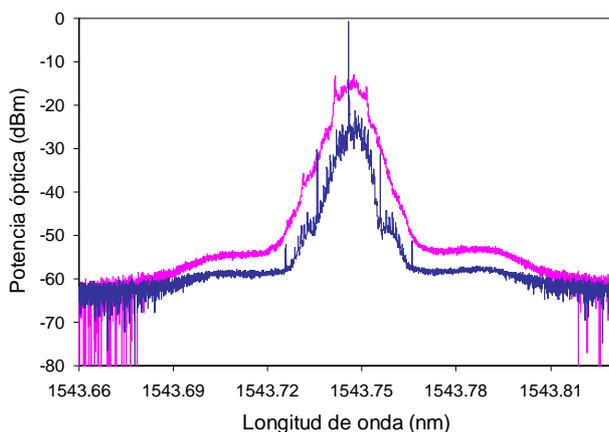


Fig. 4. Espectros de una señal GbE IM pura y la señal presente en el enlace ascendente, GbE con combinación de FSK

Al igual que en el espectro anterior, en la señal recibida en el OLT también se puede apreciar el residuo de la modulación FSK utilizada en el enlace descendente sobre el ojo de la señal modulada en intensidad (Fig. 5). El efecto de esta sobremodulación en el nivel del 1 está minimizado gracias al adecuado ajuste del voltaje de bias en el modulador MZ. Consiguiéndose una relación de extinción de 8.6dB, más que suficiente para ajustarse perfectamente a la máscara de GbE.

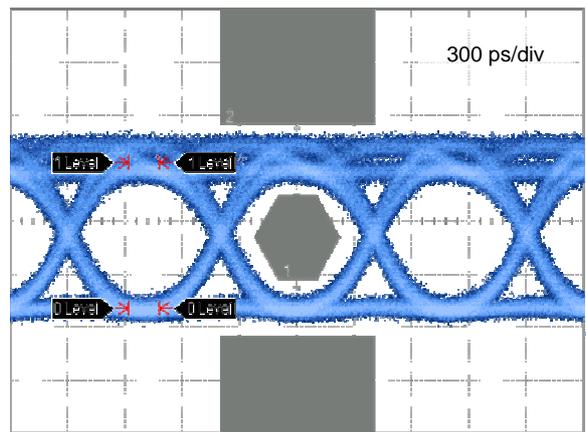


Fig. 5. Ojo de la señal del enlace ascendente.

Finalmente, con el analizador de tráfico GbE hemos medido el BER en términos de tasa de errores FCS frente a la potencia en recepción. Obteniendo los resultados mostrados en las figuras 6 y 7 para ambos sentidos de comunicación.

Para el enlace descendente (Fig. 6), con valores de potencia recibida mayores de los mostrados en la gráfica (superiores a -27 dBm) se puede considerar que tenemos una transmisión libre de errores. Hemos realizado el balance de potencias de este enlace considerando la potencia emitida por el DFB, las condiciones de polarización en las que trabajamos, y las pérdidas en las que incurrimos. Para estar en zona libre de errores podemos tolerar unas pérdidas adicionales (power budget) de 28 dB,. Teniendo en cuenta que los enlaces típicos en redes de acceso tienen longitudes en torno a 20 km, estos resultados nos indican que nuestra arquitectura puede escalarse para dar servicio a varias ONUs. Considerando las pérdidas de un acoplador 1:32, sería viable una red de 32 ONUs con enlaces de 39.4 km.

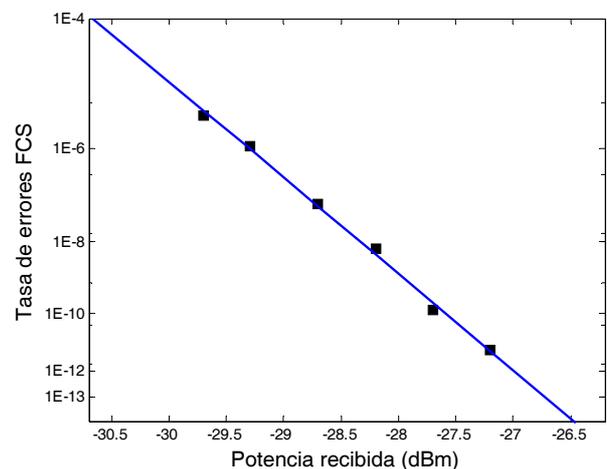


Fig. 6. Prestaciones del enlace descendente, tasa de errores FCS frente a potencia en recepción del analizador de tráfico GbE.

Por otra parte, en la figura 7 se representa la medida de prestaciones correspondiente al enlace ascendente. El rango de potencias recibidas óptimo para un correcto funcionamiento es similar al obtenido en el enlace descendente, ligeramente penalizado por el ruido adicional introducido por el SOA. Esto nos indica que ambos enlaces están bastante equilibrados. En el caso del enlace descendente los errores son inducidos por el filtrado no ideal de la señal FSK. En el enlace ascendente, esos errores se

deben a la modulación residual en amplitud que tenemos sobre la señal IM y que está originada por la modulación FSK. Hemos realizado el balance de potencias también en el enlace ascendente, obteniendo una restricción de 18.75 dB de pérdidas en el enlace (teniendo en cuenta que la señal de este enlace debe atravesar el doble de longitud de fibra). Según las limitaciones impuestas por este enlace, también se podrían servir varias ONUs con la arquitectura propuesta. En este caso, sería viable una red de 32 ONUs con enlaces de 11.36 km. No obstante, el uso de SOAs con ganancias del orden de 20dB, nos permitiría obtener enlaces superiores a 20 km.

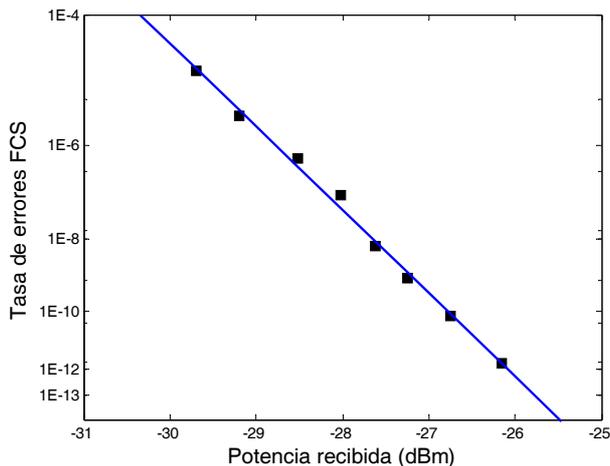


Fig. 7. Prestaciones del enlace ascendente, tasa de errores FCS frente a potencia en recepción del analizador de tráfico GbE.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado una arquitectura PON que opera sobre tráfico GbE y está basada en el formato de modulación IM/FSK y la reutilización de la portadora óptica. Se ha realizado un montaje experimental para evaluar la comunicación entre OLT y ONU. Las prestaciones de los enlaces descendente y ascendente han sido evaluadas en términos de tasa de errores FCS. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del esquema propuesto. Adicionalmente, se han realizado balances de potencia en ambos enlaces indicando que aún en el peor de los casos la arquitectura presentada podría aplicarse en redes de acceso local dando servicio a varias ONUs. En concreto, introduciendo acopladores en los enlaces descendente y ascendente se podrían implementar redes de hasta 32 ONUs con una distancia entre OLT y ONUs que sobrepasaría los 20 km. Se han podido conseguir estas longitudes en el enlace ascendente gracias a la inclusión de un amplificador SOA a la salida de las ONUs.

Dada la independencia en longitud de onda de la ONU, la arquitectura propuesta es aplicable a una red PON basada en WDM sin necesidad de modificar los terminales de usuario.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por la Diputación General de Aragón, por medio de los proyectos PIP108/2005 y los fondos para el desarrollo de la investigación en el Parque Tecnológico Walqa, y por la CICYT a través del proyecto TEC2005-03060.

#### REFERENCIAS

- [1] Y. Mochida, "Technologies for Local-Access Fiber", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 32, pp. 64-73 (1994).
- [2] G. Kramer, "Ethernet Passive Optical Networks", *McGraw-Hill Communication Engineering Series*, 2005, Chap. 1-2.
- [3] W. Hung, C.-K. Chan, L.-K. Chen, F. Tong, "An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream remodulated OOK data using injection-locked FP laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, n. 10, pp. 1476-1478 (2003).
- [4] J. Prat, V. Polo, C. Bock, C. Arellano, J. J. Vegas Olmos, "Full-Duplex Single Fiber Transmission Using FSK Downstream and IM Remote Upstream Modulations for Fiber-to-the-Home", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 702-704 (2005).
- [5] N. Genay, P. Chanclou, R. Brenot, M. Moignard, F. Payoux, "Colourless ONU modules in TDM-PON and WDM-PON architectures optical carrier remote modulation", in *Proc. ECOC 2005*, Glasgow, Scotland, Sept. 2005, vol.2, pp. 147-148.
- [6] S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito, T. Kimura, "Direct Frequency Modulation in AlGaAs Semiconductor Lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, n. 4, pp. 582-595 (1982).
- [7] [www.aragonphotonics.com](http://www.aragonphotonics.com)