

Análisis de Formatos Coherentes de Modulación Avanzados para Redes Ópticas Metropolitanas y de Acceso

Jose A. Altabas¹, Paula Arribas¹, Felix Sotelo¹, David Izquierdo^{1,2}, Jose A. Lazaro³,
Ignacio Garces¹

¹Grupo de Tecnologías Fónicas (GTF), Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A),
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.
Tel. +34-976762968, e-mail: fsotelo@unizar.es

²Centro Universitario de la Defensa.

³Grupo de Comunicaciones Ópticas (GCO), Universitat Politècnica de Catalunya.

Abstract

Las Redes Ópticas Flexibles (FON) requieren una asignación dinámica de recursos a los usuarios. Para ello se han probado diversos binomios Conformado-Formato de modulación, los de mayor interés permiten obtener un canal de 1Tbps y 4Tbps mediante la combinación dinámica para un espectro óptico de 12nm de ancho.

Introducción

El crecimiento en la demanda del tráfico de Internet, genera un fuerte interés en las futuras redes ópticas. Se busca hacer un uso más eficiente del espectro óptico y de los recursos de la red [1]. Se han propuesto redes con multiplexación por división de longitud de onda ultradensa (udWDM) como una solución factible para aprovechar el espectro óptico [2]. En cuanto a la gestión eficientemente de los recursos se proponen las Redes Ópticas Flexibles (FON) [3].

En este trabajo se han analizado y comparado diferentes formatos y conformados de modulación. Los conformados implementados son tres: NRZ, Nyquist y OFDM. Entre los formatos de modulación se proponen desde binarios como BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), hasta multibit como 16QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*).

La Tasa de Error de Bit (BER) será la figura de mérito principal a la hora de comparar los diferentes binomios conformado-formato. Dicha comparación se centrará en tres aspectos principales: la sensibilidad del receptor, el aprovechamiento del espectro óptico y la separación mínima entre canales que garanticen un BER que alcance el límite *Forward Error Correction* (FEC) [4].

Entorno de simulación

El análisis de los binomios de modulación se ha llevado a cabo en un escenario de co-simulación con

MATLABTM y VPItransmissionMakerTM. La capa física, tanto eléctrica como óptica, ha sido modelada por VPItransmissionMakerTM mientras que el Transmisor Digital Flexible (TxDF) y el Receptor Digital Flexible (RxDF) se han implementado en MATLABTM.

El transmisor está basado en un modulador de fase y cuadratura (Mod.IQ) y controlado por el Transmisor Digital Flexible (TxDF). La señal óptica ya modulada se transmite a través de 50km de fibra y con un atenuador óptico variable (VOA) se ajusta el nivel de potencia óptica recibida en el receptor. En este sistema se ha implementado un receptor coherente homodino. Tras el detector, la señal se digitaliza y se procesa en el Receptor Digital Flexible (RxDF).

Resultados

El análisis comparativo de los distintos binomios conformado-formato se centrará en dos factores: la sensibilidad del receptor y la eficiencia espectral a través de la separación mínima entre canales. Para obtener la sensibilidad del receptor, se ha fijado un BER máximo de $2.2 \cdot 10^{-3}$ que se corresponde con el límite FEC de 7%.

Como se observa en la tabla 1, la sensibilidad del receptor para los formatos de modulación en fase empeoran al aumentar el orden de modulación. Además, destaca la mejor sensibilidad del conformado OFDM respecto al resto de conformados pero a costa de tener una menor tasa de transmisión efectiva por la información de redundancia introducida en la trama OFDM. En cuanto a la sensibilidad de los conformados temporales Nyquist y NRZ, apenas hay diferencia.

Para los formatos de modulación QAM, la sensibilidad empeora a media que el orden de modulación aumenta y el conformado OFDM tiene una mejora en la sensibilidad respecto al resto de

conformados de 5 dB para 8QAM y 3dB para 16QAM.

De estos resultados se puede extraer que el conformado OFDM es el que mejores sensibilidades tiene en todos los casos pero se produce un descenso en la tasa de transmisión. Además de la menor tasa de transmisión efectiva, cabe resaltar que este conformado requiere 10dB más de potencia del láser para obtener la misma potencia a la salida del transmisor.

Tabla 1: Sensibilidad de los diferentes binomios para un FEC del 7%

Sensibilidad \ Tasa [dBm/Gbps]		Conformado de pulso		
		NRZ	Nyquist	OFDM
Formato de modulación	BPSK	-47.0 \ 1.25	-48. \ 1.25	-52.0 \ 0.96
	QPSK	-44.0 \ 2.50	-45.0 \ 2.50	-49.0 \ 1.90
	8PSK	-38.7 \ 3.75	-39.2 \ 3.75	-43.5 \ 2.86
	8QAM	-38.9 \ 3.75	-39.0 \ 3.75	-44.0 \ 3.75
	16QAM	-35.9 \ 5.00	-36.9 \ 5.00	-39.8 \ 3.82

Para la determinación de la separación mínima entre canales, se estudiará la dependencia del BER de un canal en función de la separación frecuencial del canal adyacente. La separación propuesta entre canales, Tabla 2, se ha hecho en base a fijar esta separación entre canales en múltiplos de 625MHz que es la mitad del ancho de banda para los conformados Nyquist y OFDM. Además se muestra la eficiencia espectral de un canal, definida como la tasa de datos transmitida entre el espacio total ocupado del espectro incluida la guarda.

Tabla 2: Separación entre canales (GHz) y eficiencia espectral (bps/Hz) de los distintos binomios conformado-formato.

Separación \ eficiencia [GHz/bps/Hz]		Conformado de pulso		
		NRZ	Nyquist	OFDM
Formato de modulación	BPSK	2.5 \ 0.5	1.875 \ 0.67	1.875 \ 0.5
	QPSK	3.75 \ 1	1.875 \ 1.33	1.875 \ 1.01
	8PSK	3.75 \ 1	1.875 \ 2	1.875 \ 1.53
	8QAM	3.75 \ 1	1.875 \ 2	1.875 \ 1.53
	16QAM	3.75 \ 1.33	1.875 \ 2.67	1.875 \ 2.04

Esta separación entre canales hace posible adecuar la tasa de transmisión total de la red udWDM entre 1Tbps y 4Tbps en un canal óptico de 12nm según la

demanda de los usuarios. En el caso de que se quieran alcanzar estas mismas tasas de transmisión total usando la modulación OFDM el canal óptico tendrá que ser de 16nm debido a la menor eficiencia espectral de este conformado como ya se ha comentado anteriormente.

Conclusión

En este trabajo, se han analizado cinco formatos de modulación (BPSK, QPSK, 8PSK, 8QAM y 16QAM) y tres conformados de pulso (NRZ, Nyquist y OFDM). La separación de canales y los resultados de sensibilidad muestran la viabilidad de una red óptica flexible, que permita la gestión de una tasa total variable de entre 1Tbps y 4Tbps ocupando un espectro óptico de 12nm. Para alcanzar estas tasas de transmisión totales se requiere la transmisión 800 canales espaciados 1.875GHz, empleando el binomio 1.25Gbps Nyquist-BPSK para la transmisión total de 1Tbps; 2.5Gbps Nyquist-QPSK para 2Tbps; 3.75Gbps Nyquist-QAM para 3Tbps y 5Gbps Nyquist-16QAM para 4Tbps, así como todas las combinaciones posibles de estos formatos obteniendo tasas totales intermedias

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado en parte por la Diputación General de Aragón bajo el proyecto T25 y los proyectos MINECO, muCORE (TEC2013-46917-C2-2-R) y SUNSET (TEC2014-59583-C2-1-R).

Referencias

- [1] GERSTEL O., JINNO M., LORD A., and YOO S.J.B., Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?, *IEEE Communications Magazine* [on line]. 2012, 50 (2), s12-s20. Available from doi:10.1109/MCOM.2012.6146481
- [2] SHAHPARI A., REIS J. D., FERREIRA R., NEVES D.M., LIMA M. and TEIXEIRA A. L., Terabit+ (192x10Gb/s) Nyquist Shaped UDWDM Coherent PON with Upstream and Downstream over a 12.8nm Band, *en Proceedings de OFC/NFOEC-2013* [on line]. 2013, PDP5B.3, [viewed: 7 may 2015]. Available from doi:10.1364/OFC.2013.PDP5B.3
- [3] SAMBO N., CASTOLDI P., CUGINI F., BOTTARI G., and IOVANNA P., Toward High-Rate and Flexible Optical Networks, *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50, 66-72. Available from doi:10.1109/MCOM.2012.6194384
- [4] International Telecommunication Union, Recommendation G.975.1: Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems, 2004. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.975.1-200402-1/en>