

Fótonica en sistemas de microondas

Informe de proyecto integral de fin de curso

KENYI TAKAGUI-PEREZ

April 10, 2024

§1 Problema

Diseñar¹ un sistema que implemente un enlace de radio sobre fibra (*Radio-over-Fiber*, *RoF*) de 3 canales que emplee modulación de banda lateral única con portadora óptica. Emplear una técnica de filtrado pasivo para reducir la razón de portadora a banda lateral (*Carrier-to-Sideband Ratio*, *CSR*) de manera de mejorar el desempeño del enlace. Las frecuencias portadoras ópticas deben estar separadas 0.4nm (50GHz) y las portadoras de RF deben encontrarse en el rango de 18GHz a 28GHz y las tasas de transmisión de datos de cada canal deben ser de 2.5Gb/s con formato de modulación PAM-2 de tipo NRZ. El sistema corresponde a un enlace de fibra óptica de 20km.

- Analizar la respuesta espectral del sistema tanto en el dominio eléctrico como óptico.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema a partir del diagrama de ojo luego de la recepción (demodulación) eléctrica.
- analizar la respuesta del sistema cuando no se emplea ninguna técnica para reducir la CSR.¹

A continuación se expone qué se entiende del problema propuesto y conceptos generales de por qué se usan ciertos componentes.

§2 Radio sobre fibra y fotodetectores

En sistemas RoF, la información es llevada sobre fibras ópticas usando luz modulada (*optical carriers*). La modulación puede codificar señales RF en esta luz. En el receptor, el objetivo es recuperar esta información RF de la luz modulada y aquí lo hacemos por medio de un fotodetector. Ahora bien, los fotodetectores están diseñados para convertir señales ópticas a señales eléctricas. El mecanismo por el que ocurre esto es que estos absorben fotones y generan una corriente eléctrica.

Estos *optical carriers* serán generados a partir de un *CW laser*. Estos estarán en forma de luz a una específica longitud de onda (como 1550 nm en sistemas de telecomunicaciones). Usaremos estos *carriers* para transportar la información sobre la fibra óptica.

¹Se toman libertades sobre los parámetros dados tal que el sistema funcione y presente lo que se espera del ejercicio.

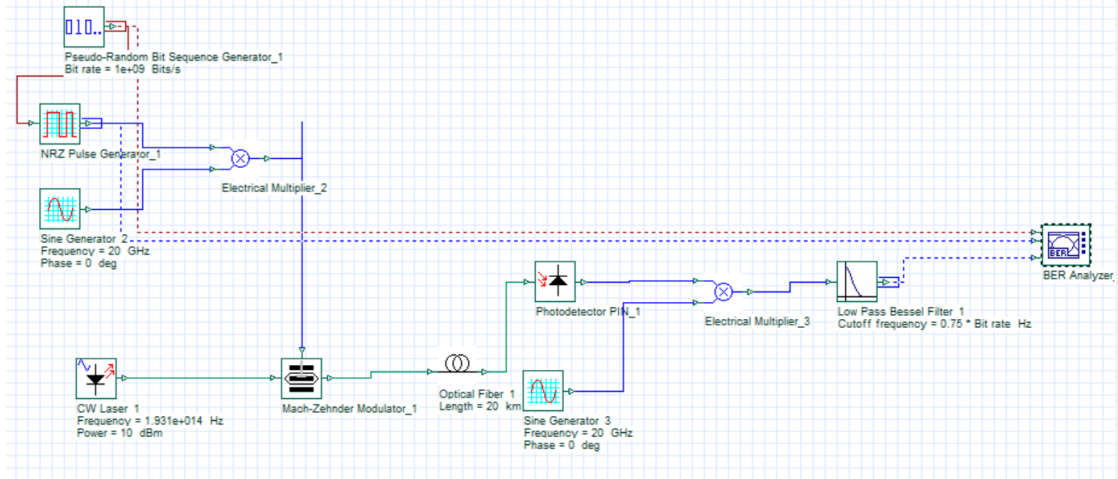


Figure 1: Esquema para obtener una señal RoF con *sidebands*

RF carriers, por otro lado, son señales electromagnéticas a frecuencias mucho más bajas (típicamente en el rango de los kilohertz a gigahertz). En los sistemas RoF, estas señales RF modulan a los *optical carriers*. La forma en la que esta modulación funciona es que la señal RF va a modificar ciertas propiedades de la *optical carrier* dejando una 'huella' en esta.

Un punto importante a notar es que los fotodetectores no detectan directamente a los *optical carriers*. Esto se debe a que no están diseñados para diferenciar entre frecuencias ópticas (longitudes de onda). Ellos simplemente convierten la luz incidente a un señal eléctrica. Además la frecuencia del *optical carrier* (en el orden de THz para luz infraroja) está mucho más allá de las capacidades de ancho de banda de los componentes electrónicos, incluyendo fotodetectores. Lo que es convertido y detectado a señales eléctricas es la modulación de la *optical carrier*, no la *carrier frequency* en sí misma. Finalmente, esta señal eléctrica del fotodetector contiene la modulación, que esencialmente es la señal *RF carrier*.

§3 Generación de subbandas

Modulación de amplitud de una señal portador usualmente resulta en dos *sidebands* reflejadas. Para lograr esto en el sistema planteado se usa un modulador Mach-Zehnder para la generación de *sidebands* en el dominio de frecuencia. Un esquema de *Optisystem* para lograr tal resultado se presenta en la figura 1. Utilizamos una portadora óptica de 1552.52 nm y una portadora RF de 20 GHz o ~ 0.14989 nm, entonces esperamos ver picos de frecuencia en $f_o \pm f_c = 1552.370, 1552.669$. En la figura 2 se ve que estos números se manifiestan muy cercanos a los valores de la simulación. Asimismo, notamos la diferencia en amplitud de la *optical carrier* y la amplitud de los *sidebands*, recordar que estamos en una escala logarítmica dBm.

§4 Generación de subbanda única

En un sistema de modulación óptica utilizando un modulador Mach-Zehnder (MZM), es posible suprimir una de las bandas laterales generadas durante el proceso de modulación.

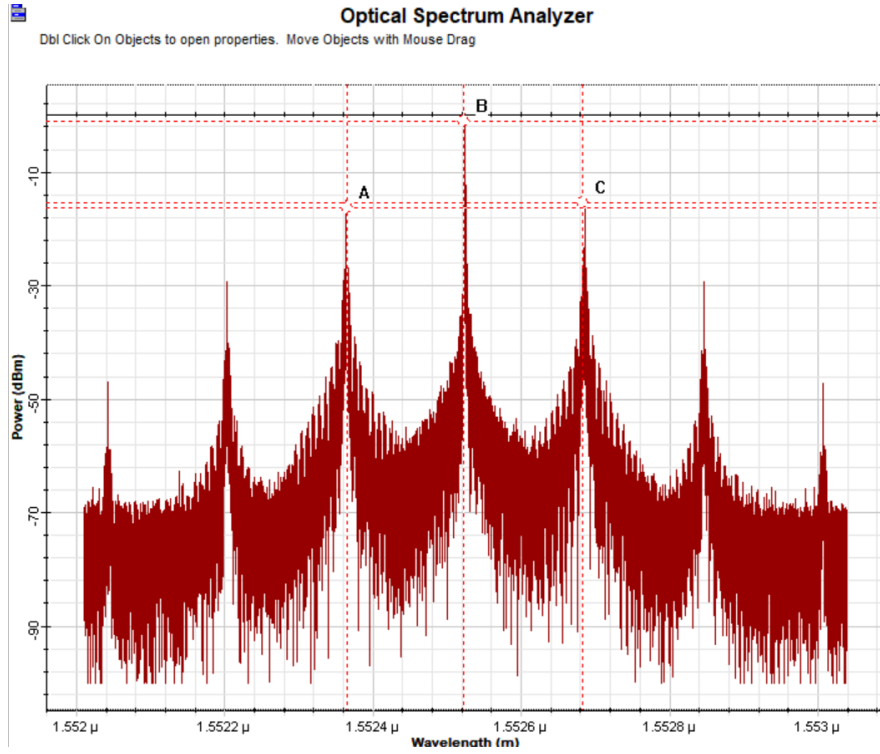


Figure 2: Sidebands para una $f_o = 1552.52$ nm y RF de 20 GHz. Punto A marca coordenadas $x = 1552.3641$ nm. Punto B $x = 1552.5227$. Punto C $x = 1552.6829$.

Esto se logra introduciendo un desplazamiento de fase específico en uno de los brazos del MZM. Normalmente, este desplazamiento de fase se establece en $\pi/2$ o $-\pi/2$ radianes.

El principio de operación del MZM se basa en la interferencia de dos ondas ópticas que pasan a través de sus dos brazos. Al aplicar una señal de radiofrecuencia (RF) al modulador, se altera el índice de refracción en uno o ambos brazos, lo que produce un cambio de fase en la luz que los atraviesa. Cuando estas ondas de luz se recombinan en la salida del MZM, el patrón de interferencia resultante varía en el tiempo, siguiendo el patrón de la señal RF. Esta variación es equivalente a modular la amplitud de la portadora óptica. En el esquema de la figura 3, desfasamos 90 una de las ramas que van de input en el modulador de Mach-Zehnder. Para observar los cambios abrimos el analizador de espectro óptico, ver figura 4. Notamos que la subbanda de $\lambda = 1552.669$ nm se atenuó en amplitud mientras que la *optical carrier* y la otra subbanda se ven poco afectadas.

§5 Demodulación

En un sistema de Radio sobre Fibra (RoF), después de que la señal óptica ha sido convertida a una señal eléctrica por el fotodetector, es esencial llevar a cabo un proceso de demodulación para recuperar la señal de radiofrecuencia (RF) original. Para esto, se utiliza un generador de pulso seno de la misma frecuencia que la señal RF utilizada en la etapa de modulación al inicio del sistema.

La razón de utilizar un generador de pulso seno de la misma frecuencia radica en el método de demodulación empleado, comúnmente conocido como mezcla o detección homodina. En este proceso, la señal eléctrica obtenida del fotodetector, que contiene la

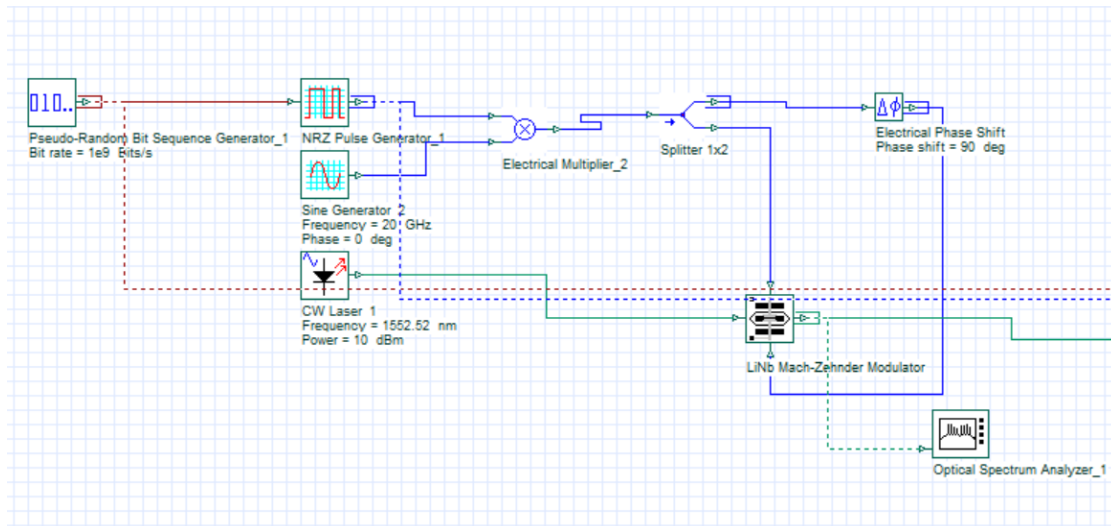


Figure 3: Esquema en *Optisystem* para obtener una subbanda única.

información de la señal RF modulada, se mezcla con una señal de referencia generada localmente que tiene la misma frecuencia que la señal RF original. Al mezclar estas dos señales, se produce una interferencia constructiva y destructiva que resulta en la extracción de la información de la señal RF modulada.

La precisión de la frecuencia del generador de pulso seno es crucial para el éxito de la demodulación. Si la frecuencia del generador de pulso seno no coincide exactamente con la de la señal RF original, la interferencia no será óptima, lo que puede llevar a una recuperación ineficiente de la información y, en consecuencia, a una degradación de la señal demodulada. Si se hace la medición de diagrama de ojo, se verán diferencias grandes si utilizamos otras frecuencias que no coinciden exactamente, es decir, la demodulación no coincidirá con la señal originalmente enviada.

En la figura 5, se muestra los componentes que se usa para la demodulación **para un sistema de un solo canal**. El filtro pasabajos nos permite ignorar las más altas frecuencias dejándonos solo con el *envelope* de la señal. Finalmente, se hace la comparación a través del diagrama del ojo entre la señal demodulada y la señal originalmente enviada, ver figura 6.

§6 Sistema completo con 3 canales

Para construir el sistema de 3 canales multiplexamos tres bloques como en la figura 3. A la salida del multiplexor esperaremos, entonces, tres portadoras ópticas correspondiéndole a cada una dos subbandas donde una de ellas ha sido ya a sido atenuada, así que en términos de potencia esta se puede ignorar, ver figura 10. El esquema presentado en la figura 13 del sistema completo incluye la parte de generación de señales, filtros para la atenuación de la portadora óptica, y, finalmente, la demodulación de la señal eléctrica.

§6.1 Sistema con 2 canales

A modo de prueba se empezó con un sistema de dos canales. El esquema se presenta en la figura 7. Para ambos canales también se presenta el diagrama de ojo para corroborar que la señal está siendo demodulada correctamente, ver figura 8 y 9.

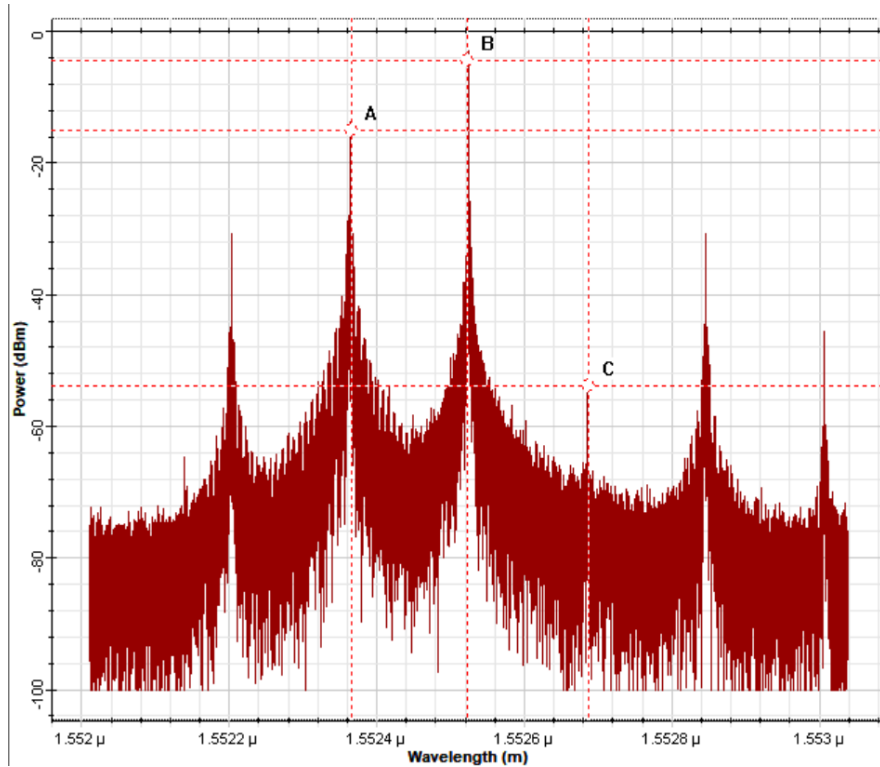


Figure 4: Analizador de espectro óptico para el caso de una subbanda única.

§6.2 Sistema con 3 canales

Parámetros de las señales:

- Canal 1:
 - CW laser: $\lambda = 1553.32 \text{ nm}$
 - Sine generator frequency: 36 GHz
- Canal 2:
 - CW laser: $\lambda = 1552.92 \text{ nm}$
 - Sine generator frequency: 28 GHz
- Canal 3:
 - CW laser: $\lambda = 1552.52 \text{ nm}$
 - Sine generator frequency: 20 GHz

Parámetros del *layout*:

- Bit rate: 10^9 Bits/s
- Sequence length: 128 Bits
- Samples per bit: 1024
- Number of samples: 131072

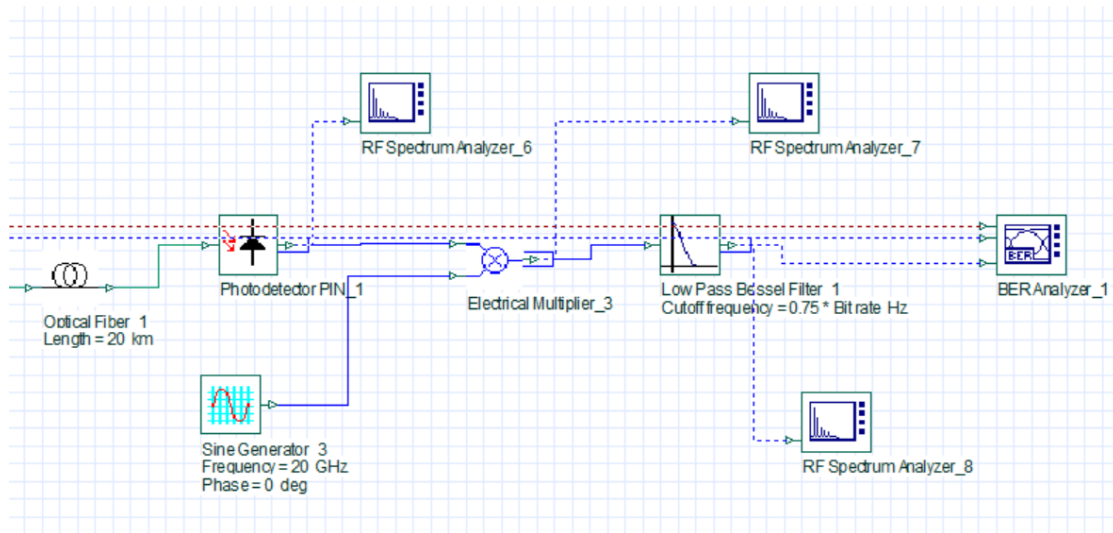


Figure 5: Continuación del esquema planteado en la figura 3. Se muestra el pulso eléctrico que se usa para la demodulación.

Se presentan los diagramas de ojo para el sistema completo en las figuras 14, 15 y 16. Inicialmente se pensó que podrían haber frecuencias eléctricas de alta potencia que no estaban siendo captadas por las propiedades del *layout*, pero luego de incrementar este rango no se vió un cambio apreciable por lo que la fuente de error debe provenir de otro lado. Sin embargo, la comparación con los resultados de un sistema de dos canales indicaría que la implementación para más canales precisaría de un filtrado más agresivo.

§6.3 Otras ideas de implementación

Otra forma de enviar la señal de manera más óptima sería aprovechando mejor el ancho de banda. Es decir, correr las portadoras RF a la izquierda tal que acaben dentro del rango $[f_{o,1} - f_{c,1}, f_{o,1}]$, mientras que las portadoras ópticas son dejadas intactas. El *overlapping* que podría haber entre las portadoras RF es algo que se tendría en cuenta tal que las frecuencias de más alta potencia no estén tan cerca y se pueda demodular correctamente.

§7 Reducción del CSR (Carrier-to-Sideband Ratio)

Lo expuesto en esta sección es en el contexto del sistema de 3 canales

Las FBG funcionan reflejando selectivamente ciertas longitudes de onda y permitiendo que otras pasen. Esto se logra mediante la creación de un patrón periódico de variaciones de índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica.

En un sistema RoF, donde se utiliza un modulador Mach-Zehnder para generar señales moduladas en amplitud, las FBG pueden ser implementadas para filtrar eficazmente uno de los lados de la banda (ya sea la banda superior o la inferior) cerca del portador óptico. Esto ayuda a reducir el CSR al atenuar o eliminar una de las bandas laterales, mientras que la otra banda lateral, que lleva la información, se mantiene. En el esquema de la figura 11. En la figura 10 vemos que la diferencia en potencia entre los *sidebands* y la portadora es de alrededor de 12 dBm. Esto es antes de pasar por las FBG. Una vez que la señal pasa a través de estos, vemos en la figura 12 que la diferencia de potencia se reduce a ~ 2 dBm.

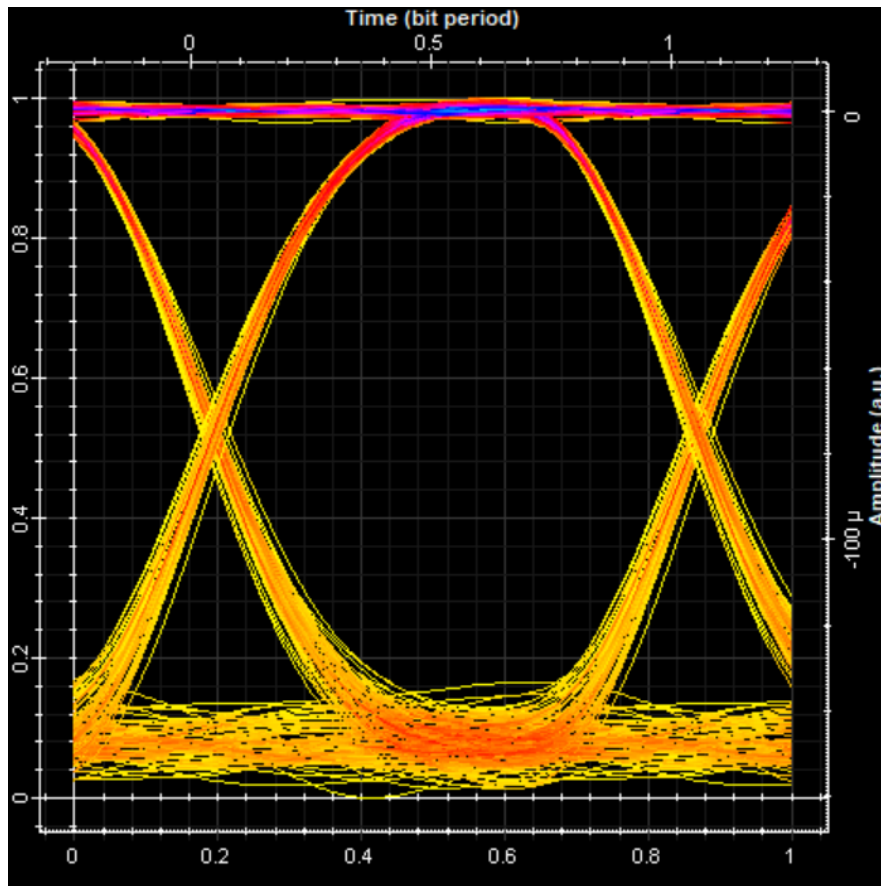


Figure 6: Analizador BER para el sistema planteado en 3.

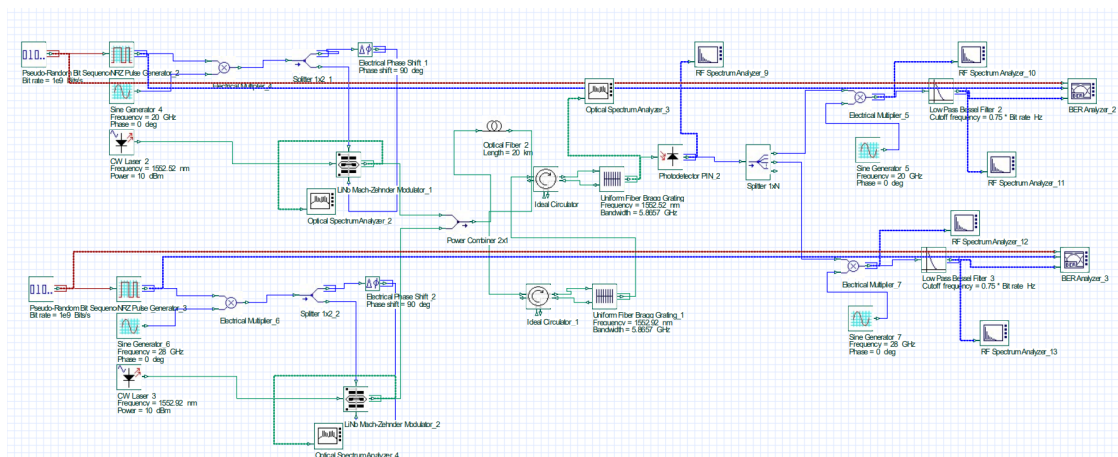


Figure 7: Esquema para un sistema de dos canales. A ambos canales se le hace una modulación de banda única y un filtrado pasivo para atenuar las portadoras ópticas.

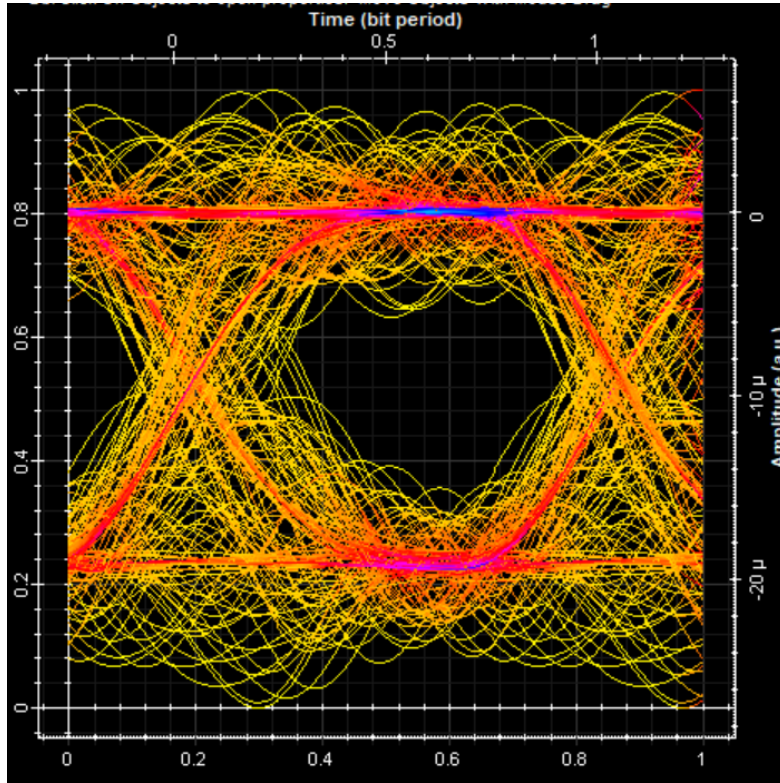


Figure 8: Sistema de dos canales: Diagrama de ojo para el primer canal.

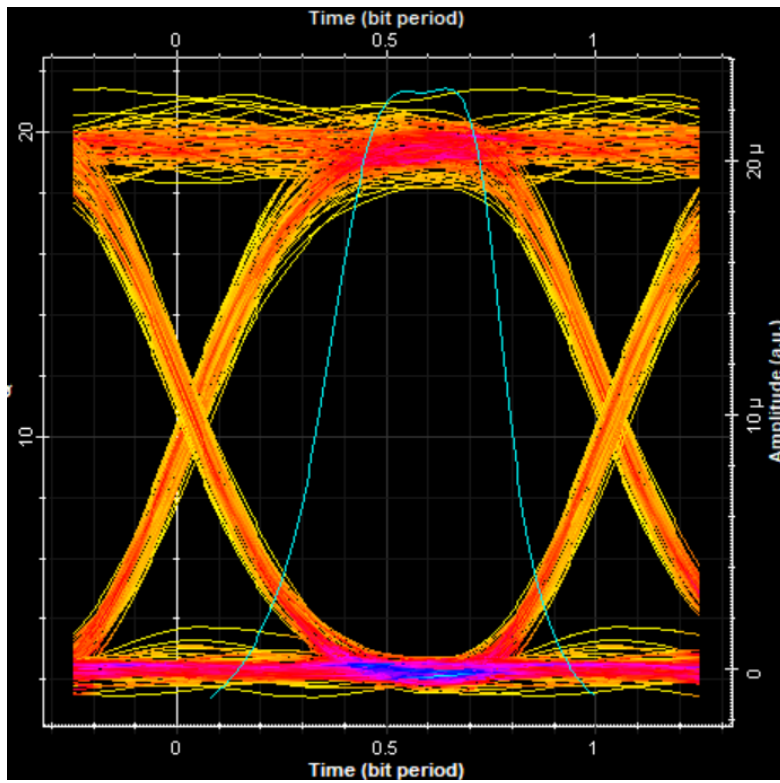


Figure 9: Sistema de dos canales: Diagrama de ojo para el segundo canal.

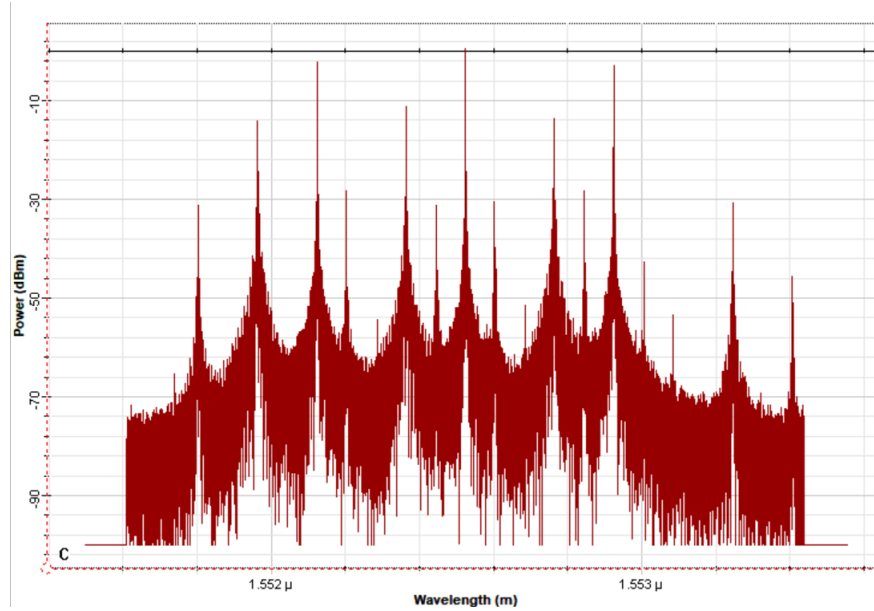


Figure 10: Espectro a la salida del multiplexor para el sistema de 3 canales.

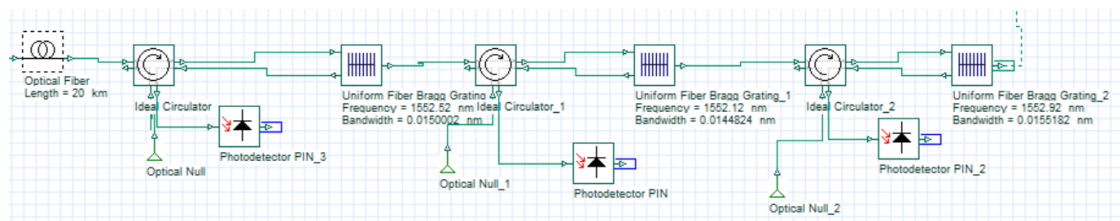


Figure 11: FBGs en cadena cada uno con frecuencias centradas cerca de las frecuencias de las portadoras ópticas.

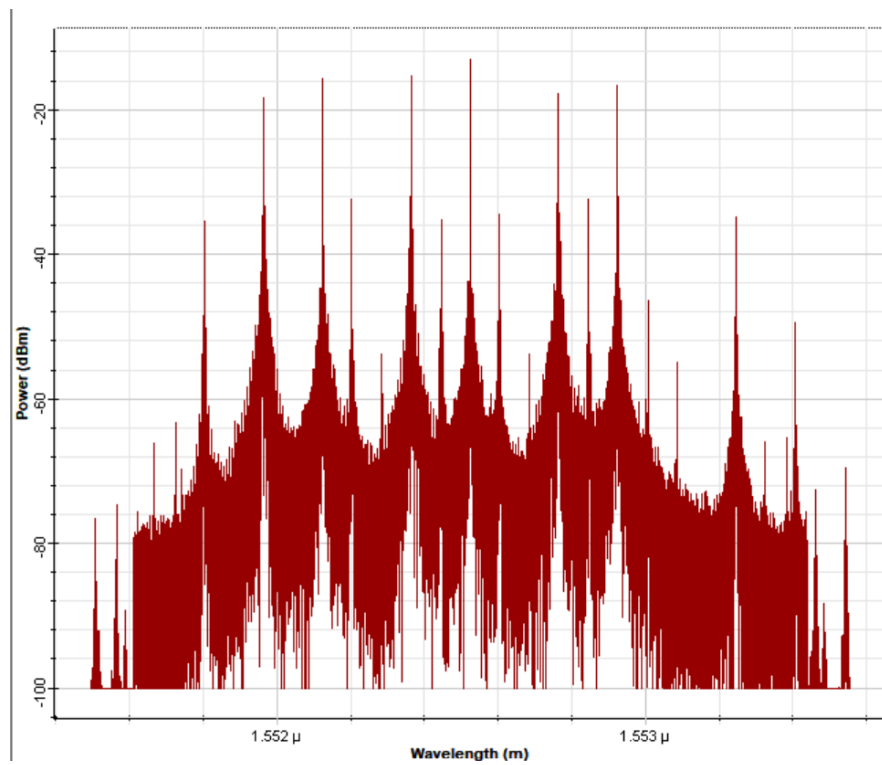


Figure 12: Espectro de frecuencias una vez la señal pasa por la cadena de FBGs.

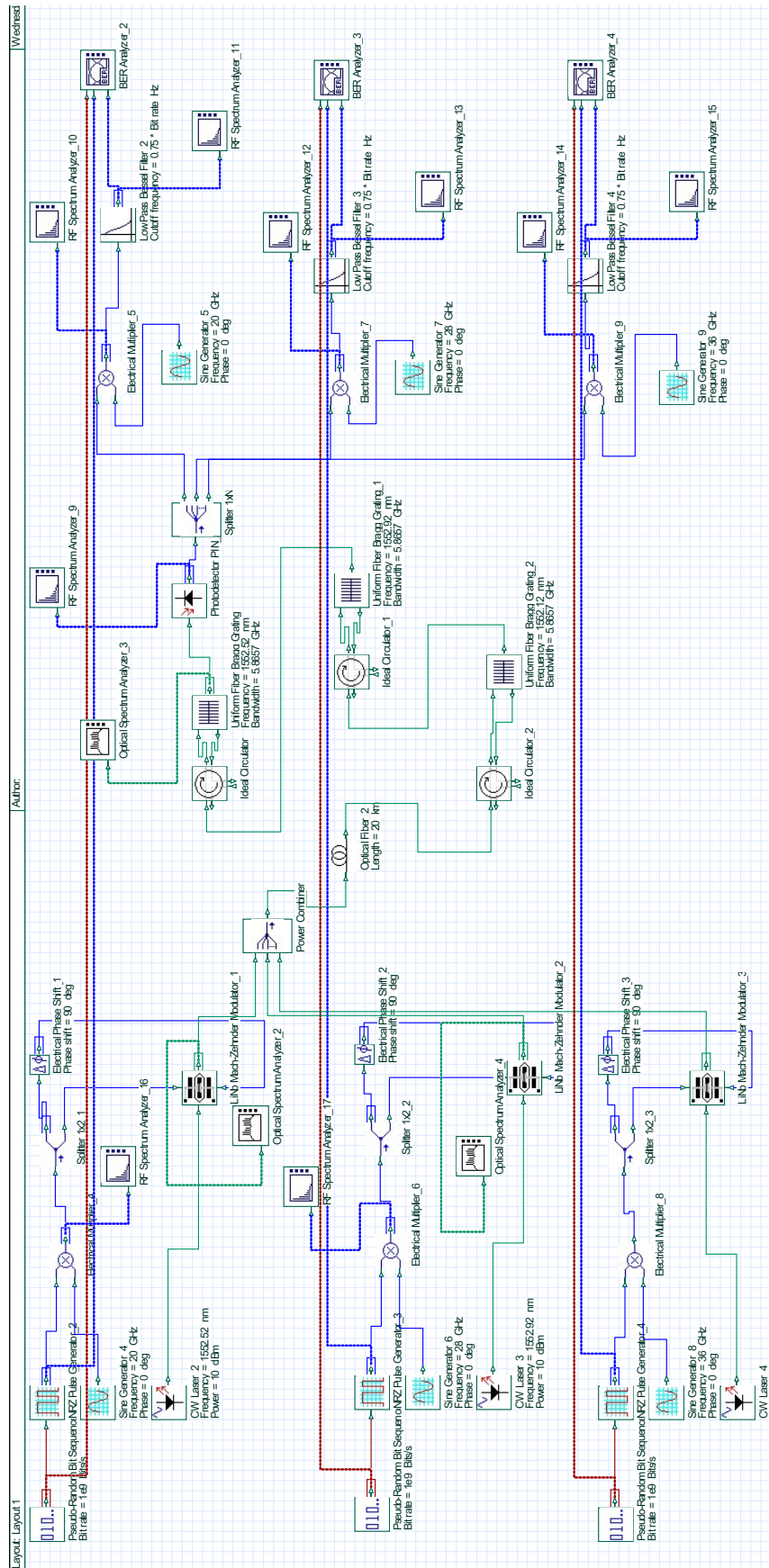


Figure 13: Esquema para sistema con 3 canales.

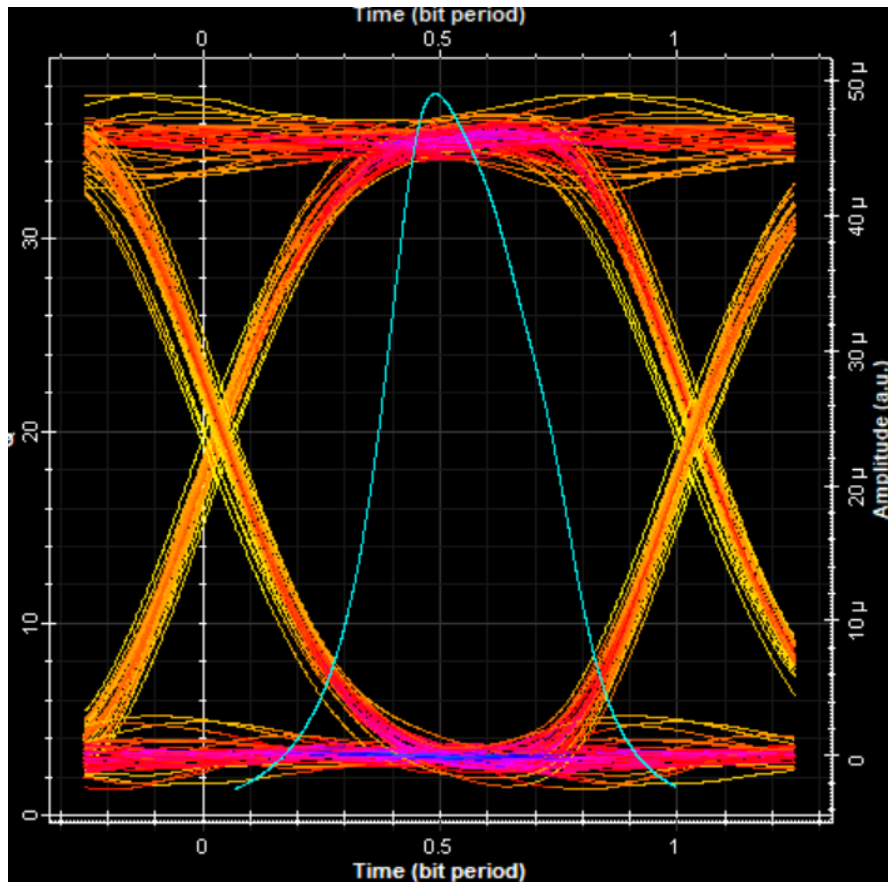


Figure 14: Diagrama de ojo para la portadora óptica de $\lambda = 1553.32$ y portadora RF de 36 GHz.

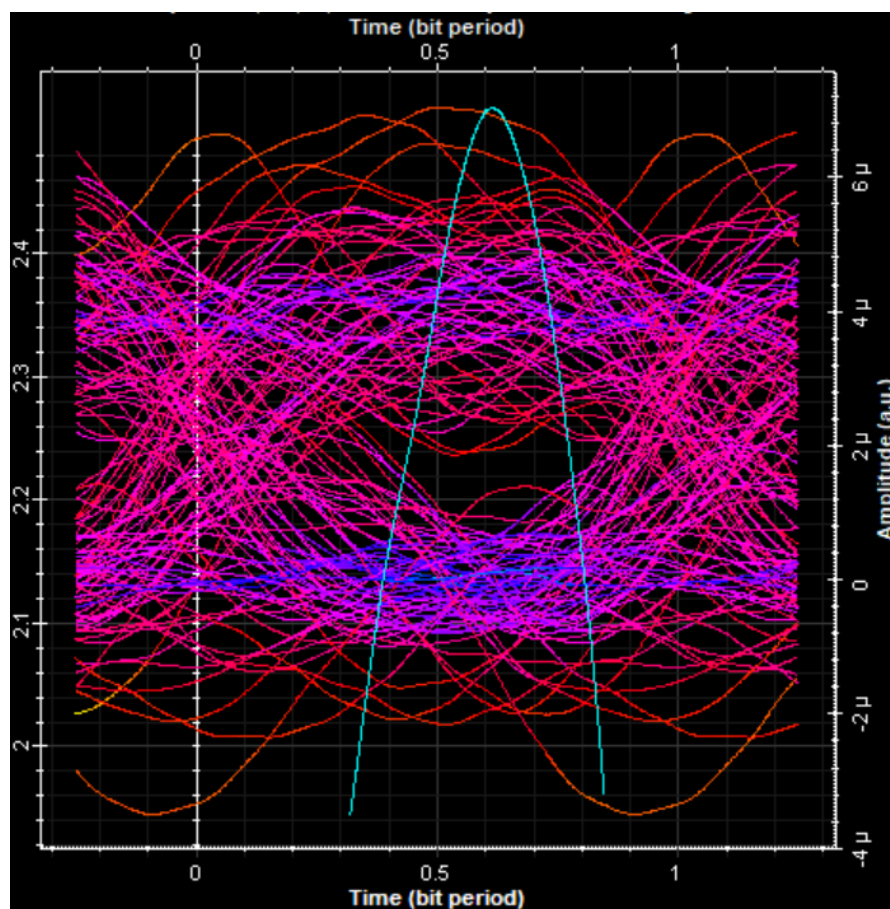


Figure 15: Diagrama de ojo para la portadora óptica de $\lambda = 1552.92$ y portadora RF de 28 GHz.

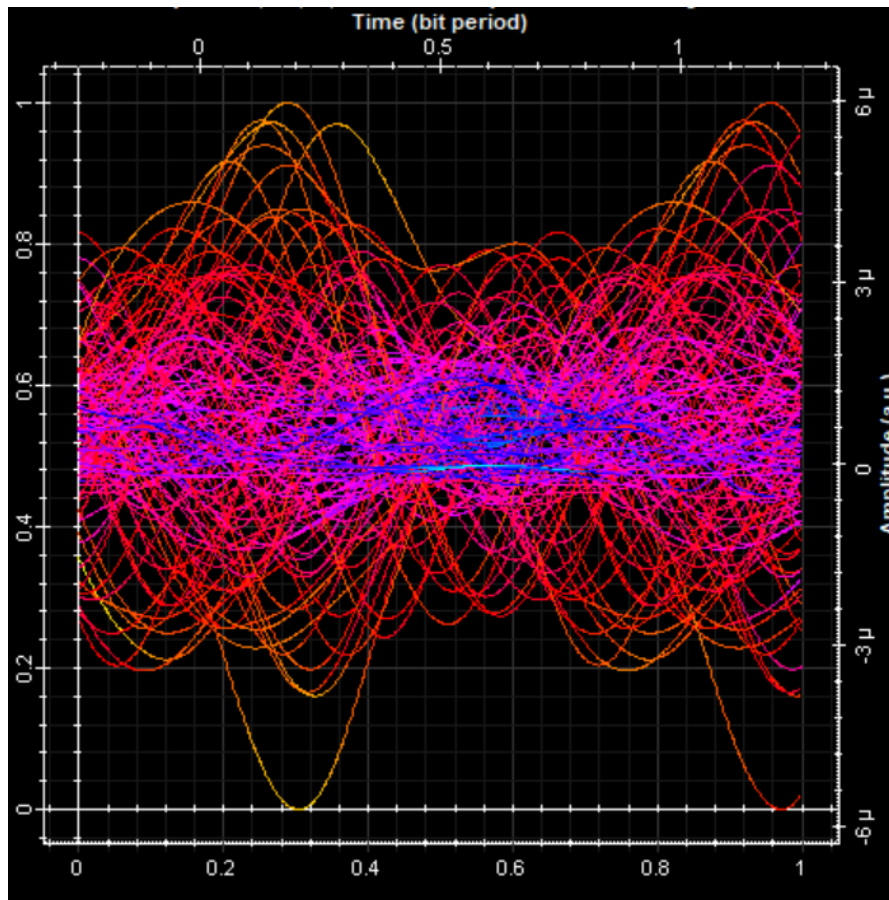


Figure 16: Diagrama de ojo para la portadora óptica de $\lambda = 1552.52$ y portadora RF de 20 GHz.