
Análisis y diseño de un receptor coherente insensible a la polarización

TRABAJO DE FIN DE GRADO

AUTOR: JAVIER CEBOLLADA ORÚS

DIRECTOR: JUAN IGNACIO GARCÉS GREGORIO

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

2017

Mi más profundo agradecimiento a David Izquierdo y Jose Altabas.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Principios de la detección coherente	1
1.2. Contexto histórico del desarrollo de las comunicaciones coherentes .	1
1.3. Objetivos	2
2. Análisis	2
2.1. Esquemas	3
2.2. Generación de la señal	4
2.3. Demostración y comparativa	5
3. Diseño	7
3.1. Comparativa con el detector sensible	8
3.2. Sensibilidad a los parámetros del oscilador local	9
3.3. Curvas de sensibilidad	11
4. Desarrollo experimental	11
4.1. Balanceo de los detectores	11
4.2. Polarización del oscilador local	13
5. Resultados	13
5.1. Comparativo de los detectores sensible e insensible	13
5.2. Pérdidas adicionales	15
6. Conclusiones	18
B. Bibliografía	20
S. Glosario de siglas	20

1. Introducción

1.1. Principios de la detección coherente

El fundamento de la detección coherente es utilizar el producto de dos campos eléctricos: el de la señal portadora y el de un oscilador local (LO), utilizado para interferir y recuperar información sobre la fase y polarización. Existen dos técnicas, dependiendo de la longitud de onda empleadas: homodinaje, donde la longitud de onda de ambas señales es la misma y heterodinaje, donde son algo distintas. Se ha escogido un detector es heterodino, porque permite recuperar información sobre la fase y la polarización necesaria.

En un sistema heterodino el láser de la señal de datos y del LO están ligeramente separados en longitud de onda, con lo que al mezclar ambas señales en el acoplador se batan, obteniendo una señal de frecuencia intermedia. La potencia del LO es mayor en cerca de tres órdenes de magnitud respecto a la señal de datos, por lo que, además, sirve como amplificación.

Supongamos un campo eléctrico de la señal E_S y uno del oscilador local E_L . En la detección, se suman las intensidades, es decir:

$$(E_L + E_S)(E_L^* + E_S^*) = E_L E_L^* + E_S E_S^* + E_L E_S^* + E_L^* E_S = |E_S|^2 + |E_L|^2 + 2E_S E_L \cos \delta \quad (1)$$

Como la modulación es en fase, las amplitudes son constantes en el tiempo, por lo que los dos primeros términos son una componente de continua que no afecta a la señal (en circunstancias ideales). El coseno es la parte que llevará la información. Como $E_S \ll E_L$, la señal será mucho mayor que si solo estuviera la amplitud E_S .

1.2. Contexto histórico del desarrollo de las comunicaciones coherentes

La investigación y desarrollo de los sistemas de comunicaciones mediante fibra óptica comenzó a principios de los años setenta. Los primeros sistemas utilizaban láseres de semiconductor y modulación en intensidad y detección directa (IMDD).

Aunque la primera propuesta de detección coherente heterodina fue en 1970 por DeLange, este no tuvo relevancia debido a la prevalencia de los detectores IMDD.

Los sistemas IMDD son independientes del estado de polarización (SOP) y la fase, ya que la señal óptica pasa a eléctrica mediante el fotodiodo que sigue una ley cuadrática con el campo ($I \propto E^2$). Los detectores coherentes permiten recuperar toda la información de la señal (estado de polarización) pero con el inconveniente de que son sensibles a estos parámetros, fluctuantes en una señal real. Este problema se pudo resolver, pero requiere esquemas mucho más complejos que los de IMDD. Además, en ésta modulación los símbolos¹ están más separados que

¹Un símbolo es la unidad mínima de información transmitida. En este contexto, es la información contenida en cada modulación. El caso más común es que cada símbolo tenga dos estados, un 1 o un 0, es decir, un bit por símbolo.

en la de intensidad, lo que se traduce en una mayor sensibilidad, es decir, mayor distancia de comunicación sin necesidad de amplificación.

Las detección coherente presentó dificultades técnicas. El heterodinaje hace uso de frecuencias intermedias muy altas, además de necesitar un láser que tenga un espectro estable y estrecho. El invento del láser de GaAlAs permitió que la investigación en este campo continuara. La sensibilidad a la polarización se consiguió superar mediante un esquema similar al estudiado en este trabajo. Por otra parte, el homodinaje utiliza banda base (es decir, frecuencias bajas), por lo que no tenía las dificultades de la frecuencia del heterodino, pero seguía limitado por la complejidad de trabajar con señales en las que varía la polarización.

La llegada en los noventa del amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) minimizó la ventaja de la sensibilidad de los detectores coherentes, ya que permitía alcanzar largas distancias utilizando los detectores IMDD. Otras ventajas que ofrece la detección coherente no resolvían problemas relevantes en aquel momento, lo que llevó al abandono de esta línea de investigación durante casi dos décadas.

En los últimos años las comunicaciones coherentes han vuelto a despertar el interés de los investigadores debido a la posibilidad de la modulación QPSK, que permite llevar dos bits por símbolo en lugar de uno, duplicando el *bit rate* o reduciendo el ancho de banda necesario para transmitir la misma cantidad de información al mismo sitio.

1.3. Objetivos

El objetivo del trabajo es el desarrollo de un detector coherente insensible a la polarización de la señal de datos.

En primer lugar se desarrollará un análisis teórico con componentes ideales, obteniendo los límites teóricos de rendimiento. A continuación se realizarán simulaciones, todavía con idealidades, con el objetivo de comprobar la viabilidad del sistema y la sensibilidad a algunos parámetros, principalmente la polarización del LO. Por último, se medirán todos los resultados en el laboratorio, comprobando las características principales e identificando los principales causantes de la degradación de la señal. Todas las medidas se realizarán también con el detector coherente sensible a la polarización, para usarlo como referencia en las comparativas.

2. Análisis

En esta sección se realizará un análisis teórico del circuito propuesto y una comparativa entre el detector sensible (figura 1) y el insensible a la polarización (figura 2), siguiendo el esquema propuesto por Glance en su artículo de 1987^[1]. Estos esquemas tienen como objetivo el análisis del sistema ideal, por lo que se omiten los filtros y se usan componentes ideales.

2.1. Esquemas

En esta sección se muestran los esquemas de los detectores utilizados.

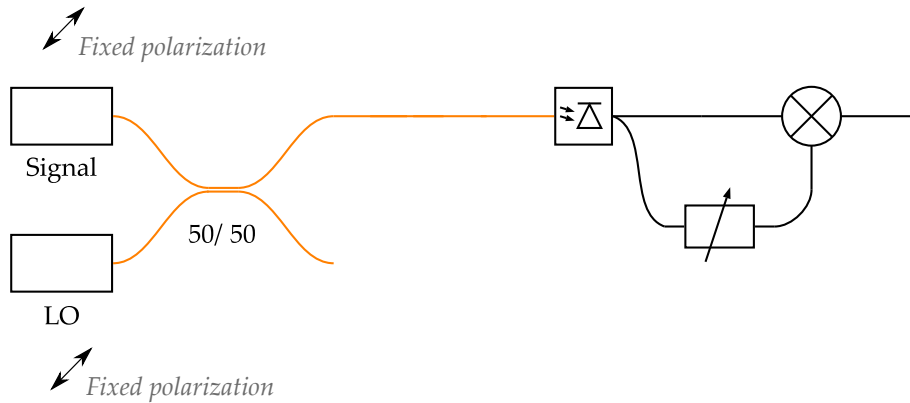


Figura 1: Esquema del detector coherente sensible a la polarización.

En el detector sensible (figura 1) se acoplan las señales de datos y la del LO ópticas, para luego ser convertidas en eléctricas mediante un fotodiodo. En el esquema que vamos a estudiar, para evitar receptores más complejos se utilizará una modulación diferencial en fase (DPSK). Para demodularla, se multiplica la señal consigo misma desplazada un bit, recuperando la información, que pasa a ser procesada. Este sistema requiere que la polarización del LO esté alineada con la de la señal, por lo que es necesario mantener un control sobre la polarización de ambos.

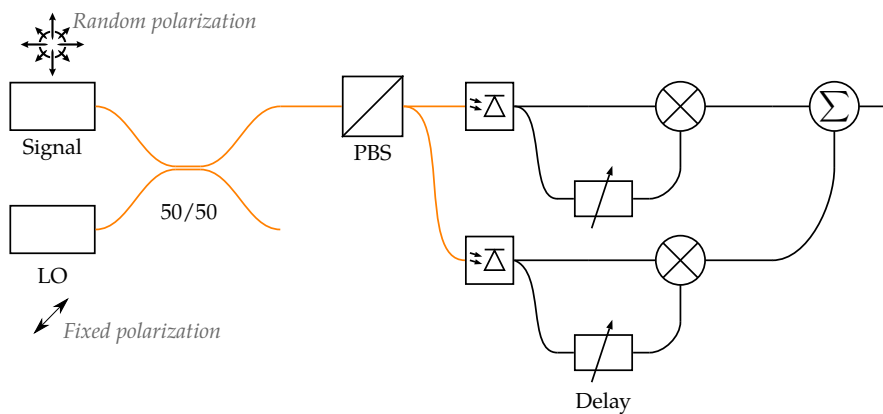


Figura 2: Esquema del detector coherente insensible a la polarización propuesto por Glance.

El funcionamiento del detector insensible es muy similar al del detector anterior. La diferencia radica en que, tras el acoplador, la señal se separa en dos polarizaciones

ortogonales mediante un divisor de haz en polarización (PBS)². El sistema debe estar balanceado, es decir, la potencia sea igual en ambas ramas. Para ello, el oscilador local debe estar a 45° con respecto al PBS. En caso contrario (que esté alineado con el PBS), se recupera el caso del detector sensible, como se verá más adelante. A la salida del PBS, cada una de las ramas es idéntica a la de la salida del acoplador del caso anterior. Tras la demodulación, se suman, obteniéndose la insensibilidad a la polarización, como se demostrará a continuación.

2.2. Generación de la señal

En la figura 3 se muestra una representación cualitativa de la señal utilizada. La información se genera en una señal como la de la parte superior de la figura y se modula sobre el láser que funciona como portadora de la señal.

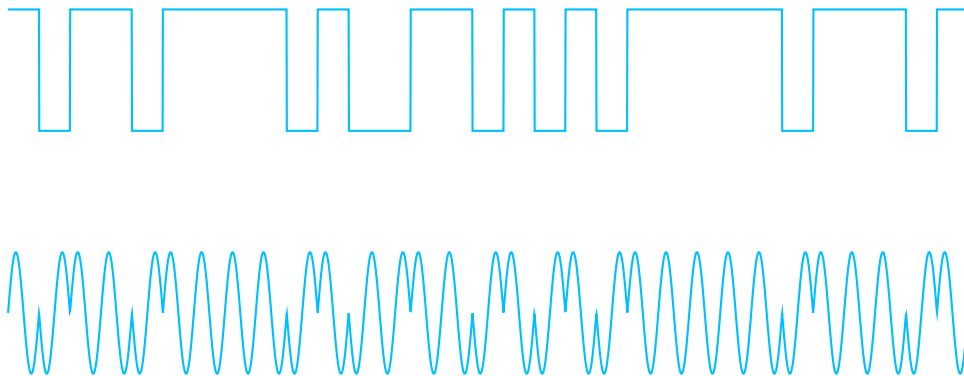


Figura 3: Señal binaria (arriba) NRZ y señal modulada en fase (abajo). Los pulsos son de distinta anchura dependiendo del número de 1 o 0 seguidos. Los cambios entre cadenas de 1 o 0 seguidos corresponden a un cambio de π en la fase.

El esquema del *setup* empleado se muestra en la figura 4. La información se genera como una secuencia de bits pseudoaleatorios (PRBS) en el generador. Esta información se modula en fase en el láser de la señal mediante el modulador Mach-Zehnder (MZM). A continuación se amplifica mediante un EDFA y pasa al controlador de polarización, que se usará para realizar el barrido en polarización. Tras él se tiene un atenuador, utilizado para los barridos en potencia. A partir de

²Un PBS es un dispositivo que divide un haz de luz en dos de polarizaciones lineales y ortogonales.

aquí, se acopla al LO y el esquema seguiría como se ha mostrado en las figuras 1 y 2.

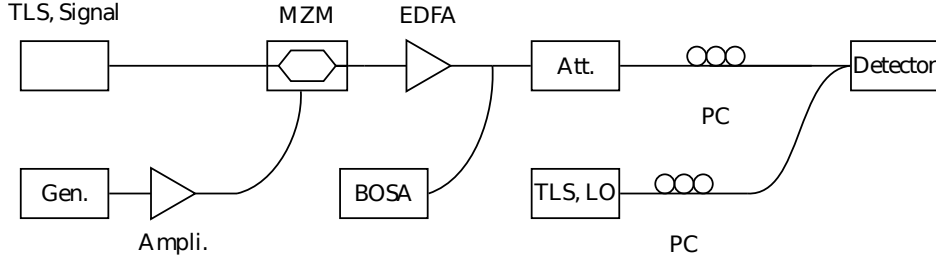


Figura 4: Setup utilizado para la generación de la señal.

2.3. Demostración y comparativa

En primer lugar, se realizará un análisis sobre el esquema de la figura 2, partiendo de las ecuaciones de campo de la señal y el oscilador local.

Antes de entrar al PBS, definimos la señal del LO con potencia P_L , frecuencia angular ω_L y ruido de fase $\theta_L(t)$ como:

$$E_L(t) = \sqrt{P_L} \cos [\omega_L t + \theta_L(t)] \quad (2)$$

Con el PBS a 45° , la potencia se divide a partes iguales en cada uno de los ejes de polarización del PBS. Bajo estas condiciones, el campo en cada uno de los fotodiodos es:

$$E_{LH}(t) = \sqrt{\frac{P_L}{2}} \cos [\omega_L t + \theta_L(t) + \alpha_H] \quad (3)$$

$$E_{LV}(t) = \sqrt{\frac{P_L}{2}} \cos [\omega_L t + \theta_L(t) + \alpha_V] \quad (4)$$

donde α_H y α_V representan dos fases arbitrarias independientes que dependen varios factores

La señal con la información antes del PBS se define como:

$$E_s(t) = \sqrt{P_s} M(t) \cos [\omega_s t + \theta_s(t)] \quad (5)$$

donde P_s es la potencia de la señal, ω_s la frecuencia angular y $\theta_s(t)$ el ruido de fase. El término $M(t) = \sum_k a_k Q(t - kT)$ representa la modulación DPSK, donde $a_k = \pm 1$ durante un tiempo T de un bit con forma del pulso $Q(t)$. Además, la polarización de la señal puede fluctuar aleatoriamente entre todos los estados de polarización.

En este caso, la señal recibida sumada a la del oscilador local mediante un acoplador se divide en los dos ejes de polarización del PBS. Las señales ópticas resultantes son:

$$E_{sH}(t) = \beta\sqrt{P_s}M(t) \cos[\omega_s t + \theta_s(t) + \delta_H] \quad (6)$$

$$E_{sV}(t) = \sqrt{1 - \beta^2}\sqrt{P_s}M(t) \cos[\omega_s t + \theta_s(t) + \delta_V] \quad (7)$$

donde $\beta\sqrt{P_s}$ y $\sqrt{1 - \beta^2}\sqrt{P_s}$ son las amplitudes del campo en cada uno de los ejes de polarización. La potencia se divide por igual en ambos ejes cuando $\beta = \sqrt{1/2}$. Los términos δ_H y δ_V dependen de las fases de las componentes de polarización de la señal detectada.

En general, la intensidad en un fotodiodo por la suma de dos señales, E_1 y E_2 , será:

$$I \propto |E_1 + E_2|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2 \operatorname{Re}(E_1 E_2^*) \quad (8)$$

donde no se tendrán en cuenta los dos primeros términos por ser una componente de continua constante (ya que se modula en fase) sobre la que va montada la señal (tercer término). Otras componentes se pueden eliminar mediante un filtro paso baja (ya que la frecuencia de heterodinaje es alta). Reescribiendo I como este término y desarrollándolo:

$$\begin{aligned} I(t) &\propto 2 \operatorname{Re}(E_1 E_2^*) = 2 \operatorname{Re} \left(\sqrt{P_1} e^{i(\omega_1 t + \theta_1(t))} \sqrt{P_2} e^{-i(\omega_2 t + \theta_2(t))} \right) \\ &= 2 \operatorname{Re} \left(\sqrt{P_1} \sqrt{P_2} e^{i(\omega_1 t + \theta_1(t) - \omega_2 t - \theta_2(t))} \right) \\ &= 2 \operatorname{Re} \left(\sqrt{P_1 P_2} e^{i(\omega_1 - \omega_2 + \theta_1(t) - \theta_2(t))} \right) \\ &= 2\sqrt{P_1 P_2} \cos(\omega_1 - \omega_2 + \theta_1(t) - \theta_2(t)) \end{aligned} \quad (9)$$

Volviendo al caso particular de E_s y E_L , se define la frecuencia intermedia $\Omega = \omega_L - \omega_s$. Cuando (3)+(6) y (4)+(7) llegan a los respectivos fotodiodos, las corrientes obtenidas son:

$$I_H(t) = R\sqrt{2P_s P_L} \left[\beta M(t) \cos(\Omega t + \phi_H) + x_1(t) \cos(\Omega t + \phi_H) + y_1(t) \sin(\Omega t + \phi_H) \right] \quad (10)$$

$$I_V(t) = R\sqrt{2P_s P_L} \left[\sqrt{1 - \beta^2} M(t) \cos(\Omega t + \phi_V) + x_2(t) \cos(\Omega t + \phi_V) + y_2(t) \sin(\Omega t + \phi_V) \right] \quad (11)$$

donde $R = \eta e / \hbar \omega$ y η es la eficiencia cuántica del fotodiodo. Se considera igual en ambos. Los términos de fase se agrupan como:

$$\phi_H := \theta_L(t) - \theta_s(t) + \delta_H - \alpha_H \quad (12)$$

$$\phi_V := \phi_L(t) - \theta_s(t) + \delta_V - \alpha_V. \quad (13)$$

La señal después de la demodulación se puede escribir como el producto de ella por sí misma desfasada T , el tiempo de un bit. Se define $\Delta\phi(t)$ como la diferencia entre las fases de las dos señales:

$$\Delta\phi(t) := [\theta_L(t) - \theta_s(t)] - [\theta_L(t - T) - \theta_s(t - T)] \quad (14)$$

y las señales en cada eje son:

$$V_H(t) = 2R^2P_S P_L \{ \beta^2 M(t)M(t - T) \cos [\Delta\phi(t)] + n_1(t) \} \quad (15)$$

$$V_V(t) = 2R^2P_S P_L \{ (1 - \beta^2) M(t)M(t - T) \cos [\Delta\phi(t)] + n_2(t) \} \quad (16)$$

donde los $n_i(t)$ son los términos de ruido. Sumando (15) y (16) se obtiene:

$$V_{\text{PBS}}(t) = 2R^2P_S P_L \{ M(t)M(t - T) \cos [\Delta\phi(t)] + n_1(t) + n_2(t) \} \quad (17)$$

que es independiente del término de del ángulo de polarización entre el PBS y la señal β .

Mediante un proceso análogo, se puede obtener la señal recibida para el sistema mostrado en la figura 1, suponiendo las polarizaciones de la señal y del LO alineadas. El fotodiodo, al no tener las dos ramas, recibe directamente (2)+(5). La señal tras la demodulación es:

$$V_{\text{single}}(t) = 4R^2P_S P_L \{ M(t)M(t - T) \cos [\Delta\phi(t)] + n_1(t) + n_2(t) \} \quad (18)$$

Comparando las señales se observa que la del detector insensible tiene una potencia menor. Comparándolas:

$$\Delta P = 10 \log_{10}(V_{\text{PBS}}/V_{\text{single}}) = 3 \text{ dB} \quad (19)$$

Es decir, al utilizar el detector insensible a la polarización se tiene una penalización de 3 dB (la mitad de potencia).

3. Diseño

En esta sección se muestran los resultados de las simulaciones, realizadas con *VPIphotonics*. Se realizará una comparativa de los detectores en condiciones óptimas de sensibilidad a la polarización y potencias requeridas para obtener la misma calidad de la señal.

3.1. Comparativa con el detector sensible

La primera simulación mostrará una comparativa entre los detectores sensible e insensible. Para ello, se utilizará el BER (*bit error ratio*, el número de bits erróneos, es decir, ceros identificados como unos y viceversa, entre el número total de bits), como medida de la calidad de la señal en recepción.

La simulación se realiza con una cadena de 1×10^5 bits, por lo que el BER mínimo o fondo es $1/1 \times 10^5 = 1 \times 10^{-5}$.

Cada estado de polarización viene definido por dos ángulos, azimutal (θ) y elipticidad (ε). Por tanto, es posible representar todos los estados de polarización, utilizando coordenadas esféricas, en la llamada esfera de Poincaré, de radio constante. Para que el barrido sea representativo de todos los estados posibles, se realiza sobre toda la esfera barriendo de 5 en 5 grados para cada uno de los ángulos. Notar que, si bien se obtienen una muestra suficiente de los diversos SOP, el barrido no es homogéneo.

El detector sensible tiene un máximo y un mínimo, correspondientes a polarizaciones ortogonales. Con el LO en la posición $\varepsilon = 0^\circ$ y $\theta = 45^\circ$ (figura 5), si la señal está en el mismo SOP, la información se recupera obteniendo el mínimo BER, mientras que para la polarización ortogonal, la información no se pudo recuperar ($\text{BER} \approx 0.5$).

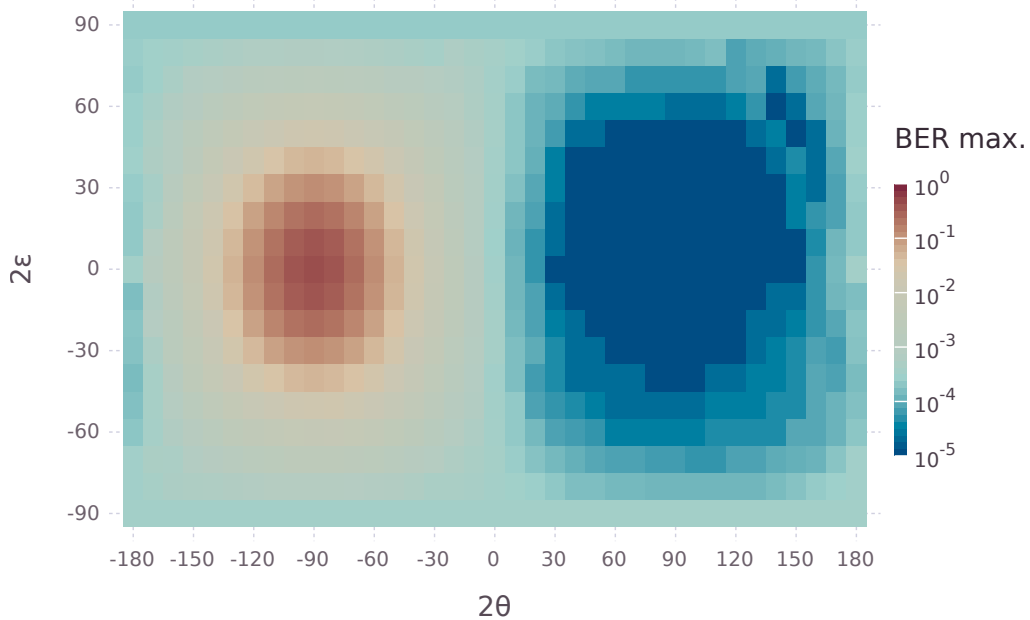


Figura 5: Detector sensible. Oscilador local: $\theta = 45^\circ$, $\varepsilon = 0^\circ$.

En el detector insensible, con el LO en la posición $\varepsilon = 0^\circ$ y $\theta = 45^\circ$ (como se ha visto antes, la necesaria para su funcionamiento), (figura 6), se observa que el mapa

es aproximadamente plano y en cualquier caso es menor que 1×10^{-3} . Esto quiere decir que es posible recuperar la información en cualquier caso, independientemente del SOP de la señal. Se puede observar cierta dependencia con la polarización, mucho más patente en las medidas experimentales, que se estudiará en esa sección.

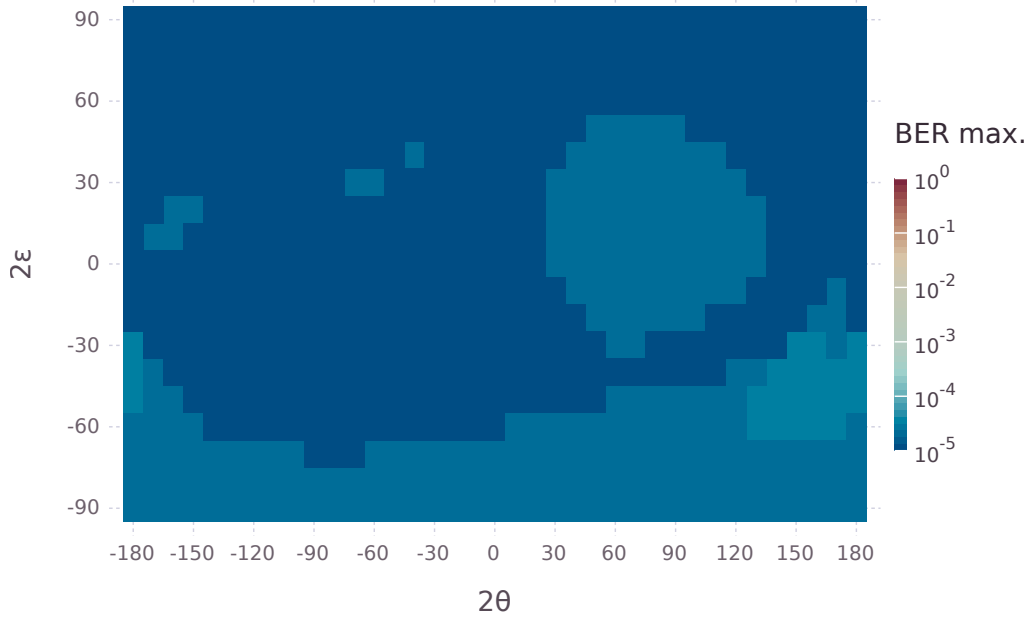


Figura 6: Detector insensible. Oscilador local: $\theta = 45^\circ$, $\varepsilon = 0^\circ$.

El desplazamiento del SOP del LO tiene un efecto distinto en cada caso. Para el detector sensible, cambiando la posición del LO a, por ejemplo, $\varepsilon = 0^\circ$ y $\theta = 0^\circ$, se obtiene el mismo resultado pero desplazado (figura 7). Es decir, se tiene la misma dependencia que se tenía en el caso anterior, y se puede seguir recuperando la señal mientras se alineen los dos láseres.

Realizando el mismo cambio en el detector insensible (8), se observa que, como se ha visto al analizar los esquemas, se recupera el caso sensible, ya que toda la potencia va por una de las ramas. Dado que los componentes son ideales e iguales, se recupera una situación casi idéntica.

En conclusión, la posición del LO afecta a la insensibilidad: en la posición ideal se obtiene la insensibilidad a la polarización, mientras que, en los casos $\theta_{LO} = 0^\circ$ o $\theta_{LO} = 90^\circ$ (son simétricos), se recupera la situación del insensible.

3.2. Sensibilidad a los parámetros del oscilador local

Como se ha visto en las figuras anteriores, la detección depende de los ángulos del LO. De cara a conocer la viabilidad en un sistema real (pues la polarización puede fluctuar ligeramente) se realiza una simulación para obtener el deterioro de

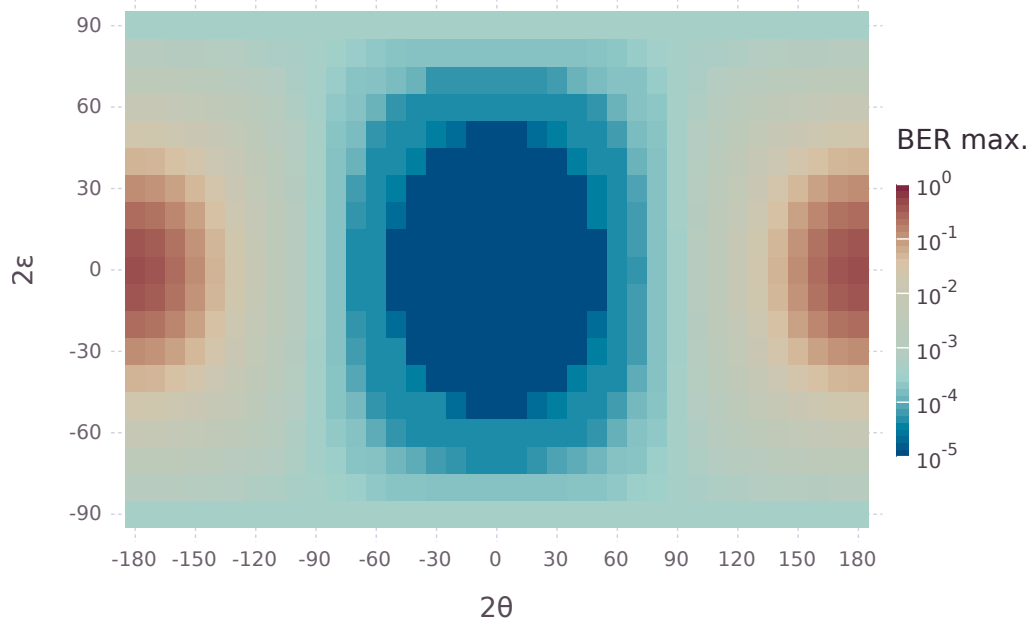


Figura 7: Detector sensible. Oscilador local: $\theta = 0^\circ$, $\varepsilon = 0^\circ$.

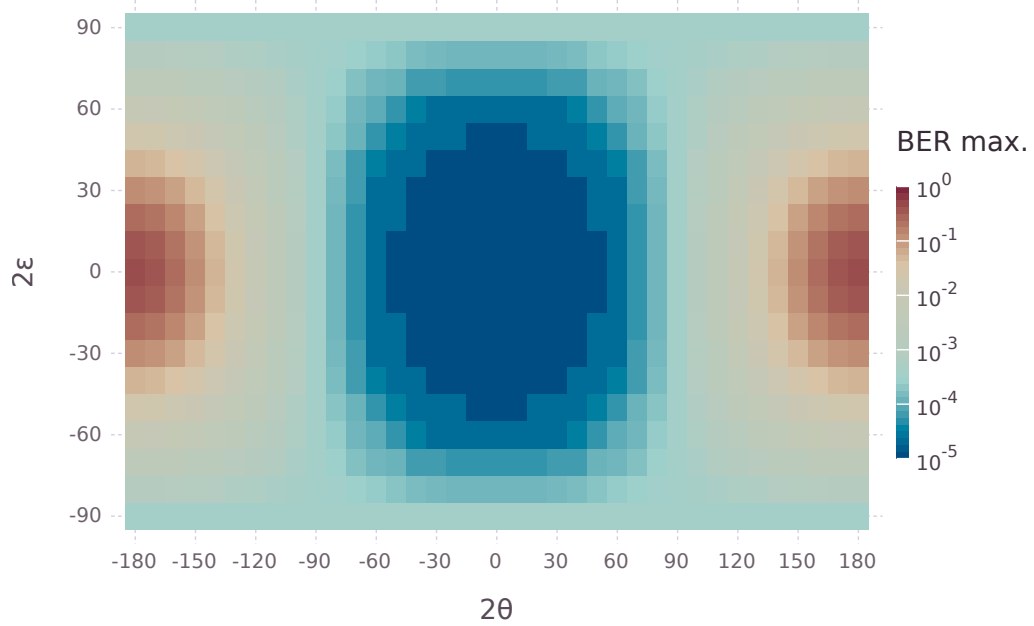


Figura 8: Detector insensible. Oscilador local: $\theta = 0^\circ$, $\varepsilon = 0^\circ$.

la señal en función a este parámetro. Para cada SOP del LO, se realiza un barrido en toda la esfera de Poincaré para la señal y se representa el máximo BER obtenido.

De esta forma, un valor bajo indica que con independencia del SOP de la señal se puede recuperar la información (es decir, insensibilidad a la polarización), mientras que un valor alto indica que no se puede garantizar que la información se pueda recuperar en caso de que la polarización de la señal sea aleatoria. La simulación se realiza de nuevo con una cadena de 1×10^5 bits y con un barrido de 5 en 5 grados.

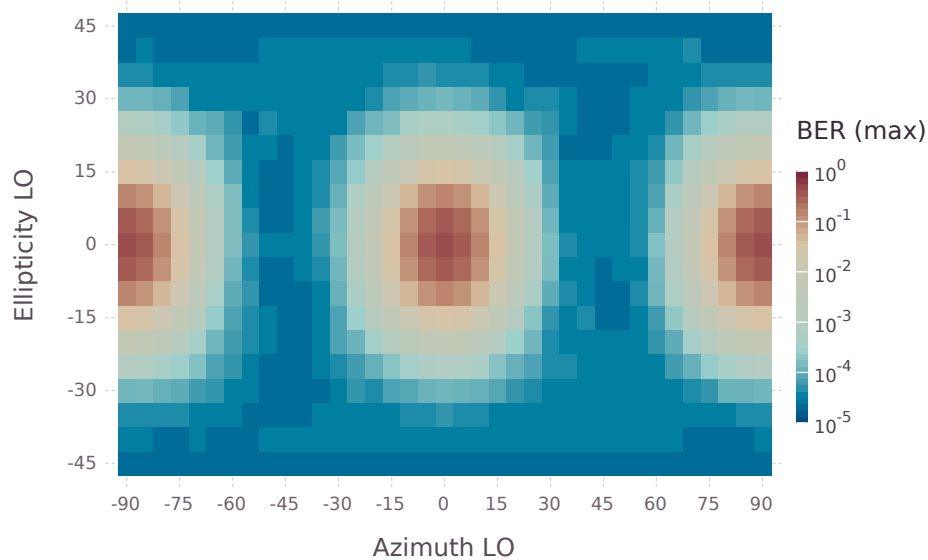


Figura 9: Máximo BER obtenido en el barrido de la polarización de la señal, en función de la polarización del LO. Detector insensible.

La figura 9 muestra los resultados de la simulación. Aunque el sistema no es insensible a la polarización del LO, permite cierto desplazamiento en la polarización sin que la calidad de la señal se reduzca drásticamente.

3.3. Curvas de sensibilidad

Para una comparación numérica entre ambos detectores, utilizan las curvas de sensibilidad. Se representa la calidad de la señal detectada (como en casos anteriores, mediante el BER) frente a la potencia de entrada (figura 10). En ella se puede comprobar el resultado obtenido en la ecuación (19), ya que para obtener el mismo BER con el detector insensible se requieren 3 dB más que en el sensible.

4. Desarrollo experimental

4.1. Balanceo de los detectores

Los fotodiodos no tienen por qué tener responsividades iguales como se ha supuesto en la sección de análisis. Estos efectos se traducen en que, en la ecuación

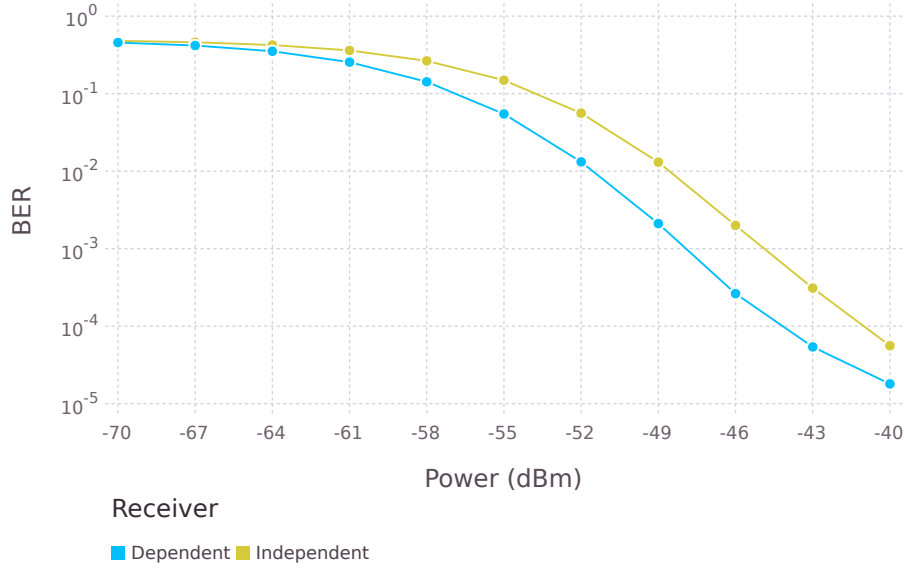


Figura 10: Curvas de sensibilidad de ambos detectores. El insensible se encuentra en $\theta_{LO} = 0^\circ$ y el sensible alineado con la señal.

(17), cada uno de los sumandos tiene un peso distinto por lo que el término β no se anula y se sigue teniendo sensibilidad a la polarización.

Partiendo de (15) y (16) pero suponiendo que cada una tiene una R distinta, R_1 y R_2 , ignorando los términos de ruido y redefiniendo las R_i para incluir los factores constantes, la ecuación (17) queda como:

$$\begin{aligned}
 V'_{\text{PBS}}(t) &= R_1^2(1 - \beta^2) \cos [\Delta\phi(t)] + R_2^2\beta^2 \cos [\Delta\phi(t)] \\
 &= R_1^2 \cos [\Delta\phi(t)] + \beta^2(R_2^2 - R_1^2) \cos [\Delta\phi(t)] \\
 &= R_1^2 \cos [\Delta\phi(t)] + \beta^2\Delta R^2 \cos [\Delta\phi(t)] \\
 &= (R_1^2 + \beta^2\Delta R^2) \cos [\Delta\phi(t)] \\
 &= R_1^2 \left(1 + \frac{\beta^2\Delta R^2}{R_1^2} \right) \cos [\Delta\phi(t)]
 \end{aligned} \tag{20}$$

donde $\Delta R^2 = R_2^2 - R_1^2$. Este resultado es dependiente del término de la polarización β , que desaparece si $R_1 = R_2$ y se recupera el resultado de (17).

Esto demuestra que el efecto de la descompensación es similar al de tener el LO fuera de la polarización deseada, es decir, $\beta^2 \neq 0.5$, por lo que basta con calcular el peso de cada una de las polarizaciones, y partir de ellas calcular el factor k tal que $(kR_1^2 - R_2^2) = 0$.

El ruido no es insensible a la polarización, de forma que incluso en el mejor caso se tendrá cierta sensibilidad a la polarización, como se verá en las medidas.

Otros efectos que contribuirán a serán la directividad del PBS (cantidad de luz no deseada introducida por cada una de las ramas) y las pérdidas dependientes de la polarización del controlador de polarización (PC).

Para el cálculo de k , se realiza un barrido sobre la esfera de Poincaré, midiendo la potencia a la salida de cada uno de los detectores. La relación entre los máximos será la relación que se usará durante la suma pesada de las dos polarizaciones. Aunque los mínimos teóricamente deberían dar la misma relación, están más afectados por el ruido, por lo que no son tan convenientes para el cálculo.

4.2. Polarización del oscilador local

En el detector insensible es necesario buscar el estado donde el LO está a 45° del PBS. Para ello, se busca el punto donde la potencia de salida en una de las ramas (correspondientes a las polarizaciones x e y) es máxima (y la otra mínima), y se mueve hasta encontrar el punto donde estas potencias se ha reducido a la mitad.

Para hallar la k , se realiza un barrido en potencia y se comparan los máximos de cada una de las ramas.

Para el detector sensible, basta con maximizar la potencia en función de la polarización de la señal o del LO.

Tras capturar la trama y digitalizarla, se compara con el PRBS original para obtener el BER.

5. Resultados

5.1. Comparativo de los detectores sensible e insensible

La señal empleada es un PRBS de orden 15 ($2^{15} - 1$ bits), NRZ con modulación DPSK. La potencia de entrada de la señal es de -20 dB y la del LO 0 dB. Los esquemas de los montajes son los mostrados en las figuras 1, 2 y 4.

La primera medida se realiza con el detector sensible, para tener como referencia su resultado.

El resultado (figura 11) es el esperado: se obtiene aproximadamente la misma forma que en las simulaciones. El BER oscila entre 0 y 0.5. Notar que la figura los ejes de la figura no tienen que corresponder exactamente con los de la simulación, ya que los estados de polarización son relativos. Sí que se asegura que el barrido en la esfera es completo.

A continuación se realiza la misma medida para el insensible. Para ello, se realiza un barrido en la polarización de la señal de entrada y se representa el BER para cada SOP.

El resultado se muestra en la figura 12. La variación de BER es pequeña, (el color negro representa los puntos de BER= 0), y va entre 0.0073 y 0. El resultado se corresponde aproximadamente con el visto en las simulaciones, pero parece haber

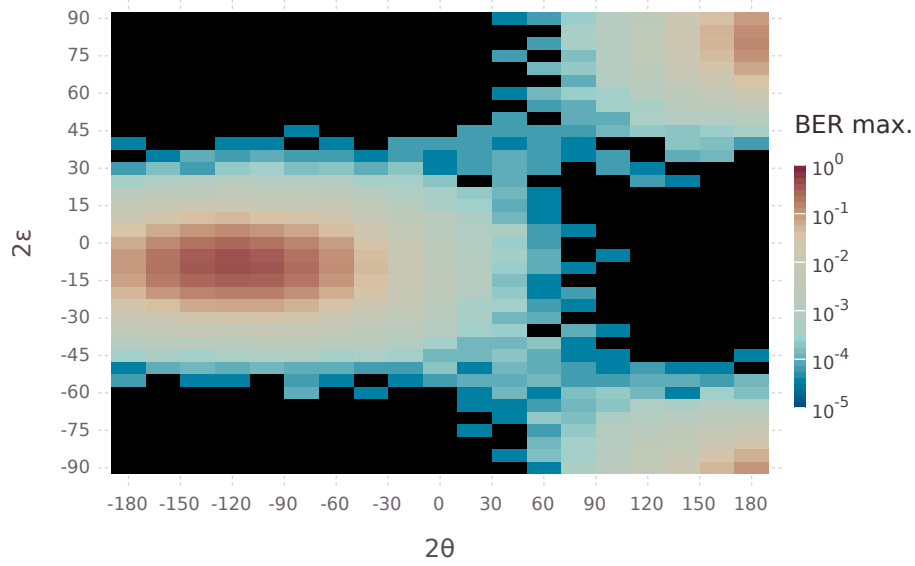


Figura 11: Detector sensible, experimental. Oscilador local alineado con la señal. Barrido en la polarización de la señal.

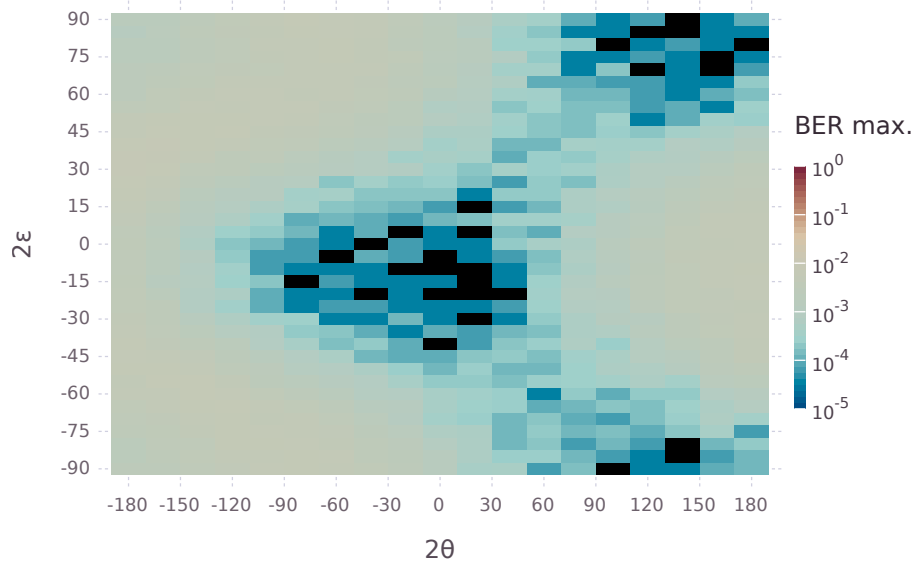


Figura 12: Detector insensible, experimental. Oscilador local: $\theta = 45^\circ$, $\varepsilon = 0^\circ$ respecto al PBS. Barrido en la polarización de la señal.

una dependencia mucho más fuerte con la polarización, a pesar de la compensación mencionada anteriormente.

Se miden y representan las curvas de sensibilidad de los detectores sensible e insensible, como se muestra en la figura 13.

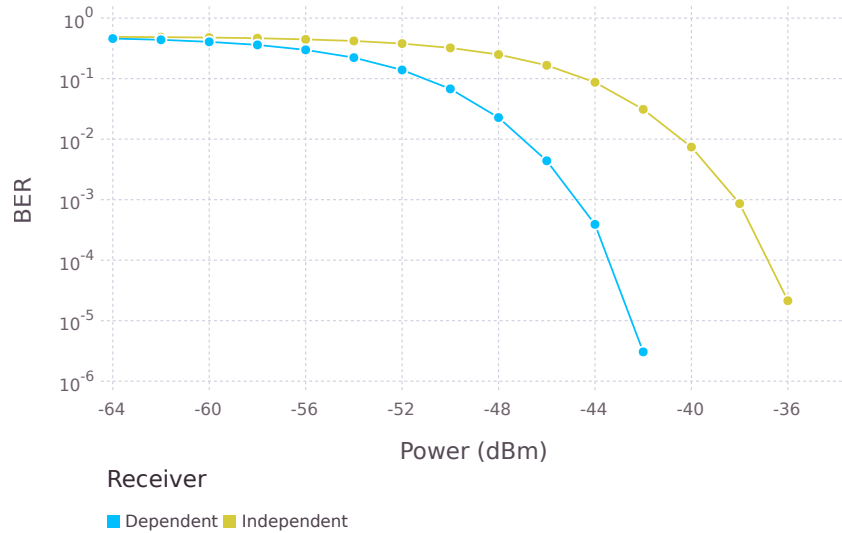


Figura 13: Comparativa de las curvas de sensibilidad de los dos detectores. La señal del dependiente está alineada y la del insensible tiene polarización aleatoria.

El valor teórico de la diferencia entre ambas curvas es, como ya se ha establecido anteriormente, es 3 dB para componentes ideales. Sabiendo que el PBS tiene, según el fabricante, unas pérdidas de < 0.9 dB más las pérdidas de un conector extra (≈ 0.3 dB) deberían diferenciarse, como máximo, en unos 4.2 dB, aproximadamente. Sin embargo, se observa una diferencia de aproximadamente 7 dB. Esto quiere decir que hay unas pérdidas adicionales de 2.8 dB. A continuación se tratarán de identificar las fuentes de estas pérdidas.

5.2. Pérdidas adicionales

Se ha podido observar que existe una pequeña sensibilidad con la polarización, por lo que se tratará de analizar este efecto. Para ello, se estudiarán las ramas del detector insensible individualmente, poniendo el oscilador local con $\theta = 0^\circ$ y 90° .

Las figuras 14 y 15 muestran estas medidas, realizadas con una señal generada bajo las mismas condiciones. En primer lugar, se puede ver que son complementarias, es decir, los máximos de una corresponden a los mínimos de otra, como cabría esperar, además de seguir la forma aproximadamente del resultado obtenido para el insensible, mostrado en la figura 12. Además, una tiene una potencia mayor que la otra (es decir, sus mínimos son más bajos y amplios y sus máximos más bajos y en zonas más pequeñas). Esto indica que parte de la sensibilidad remanente tiene su origen en las diferencias entre ambas ramas, dada por las distintas responsabilidades y ganancias de los fotodiodos. Para analizar los efectos de la potencia de cada

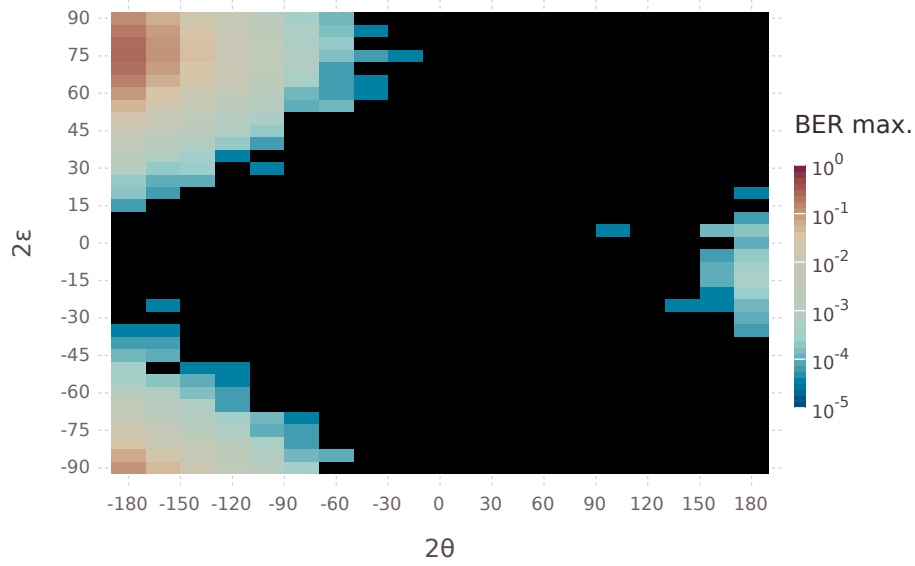


Figura 14: Detector insensible, experimental. Oscilador local: $\theta = 0^\circ$, $\varepsilon = 0^\circ$ respecto al PBS. Barrido en la polarización de la señal.

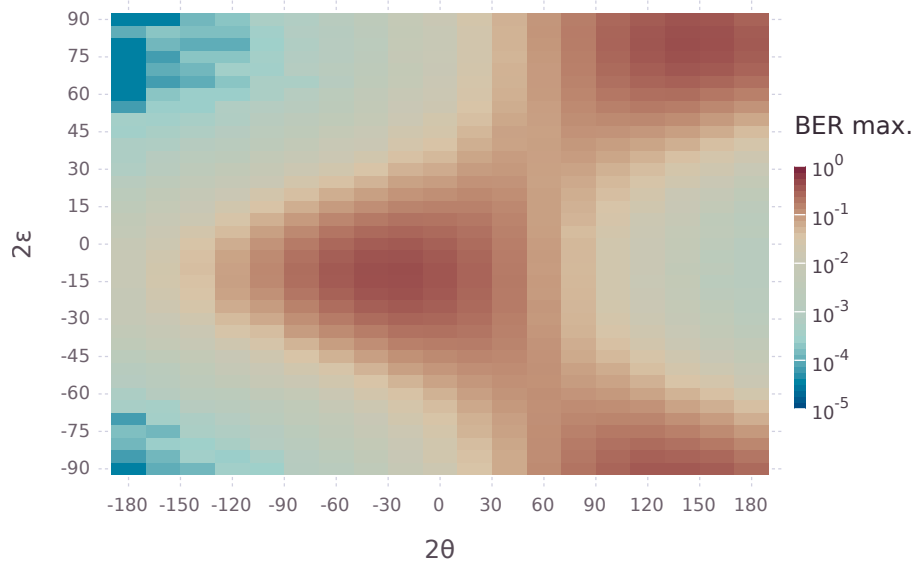


Figura 15: Detector insensible, experimental. Oscilador local: $\theta = 90^\circ$, $\varepsilon = 0^\circ$ respecto al PBS. Barrido en la polarización de la señal.

polarización se representan las potencias medidas en cada SOP del LO y la suma pesada (con el factor k) de ambas.

Se observa en la figura 16 que la suma de potencias compensada tiene fluctuaciones en función del SOP. Esto confirma que queda una pequeña dependencia

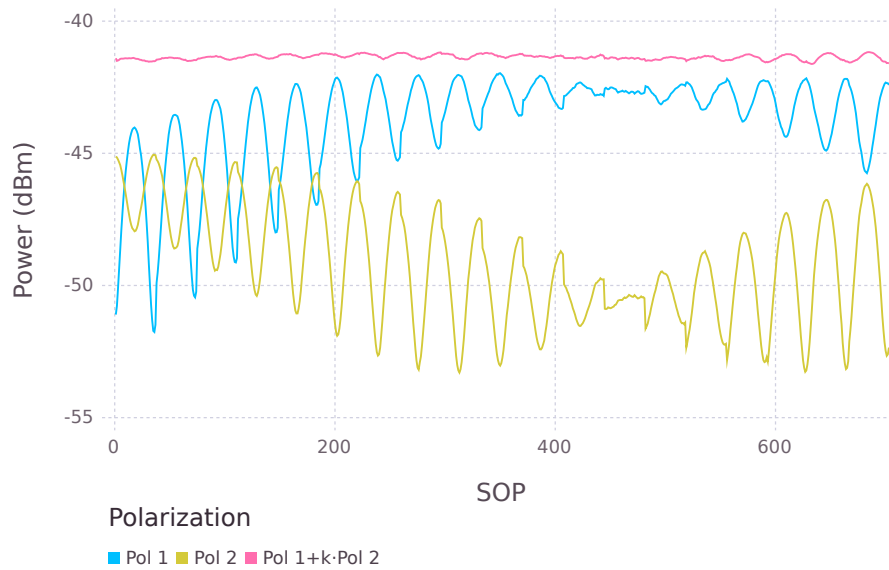


Figura 16: Potencia de salida de cada uno de los detectores en función de la polarización de la señal en el detector insensible y suma pesada de ambas. El eje x no corresponde a ningún parámetro físico, sino al número de la iteración de la medida, cada uno correspondiente a una combinación de θ y ε única.

con la polarización de la señal. Como el ruido tiene aproximadamente el mismo nivel en ambas polarizaciones, el SNR es mejor en la señal que tiene más potencia. Cuando domine esta polarización, la señal será más limpia. Cuanta más potencia hay en la polarización 2, menor SNR, y por tanto más ruido. Notar que, en la suma pesada, una mayor potencia no implica un mejor SNR. Emplear fotodiodos con características más similares debería mejorar la insensibilidad.

Otros efectos que contribuyen son la no idealidad del PBS (parte de la polarización 1 puede ir por el canal 2 y viceversa) y las pérdidas dependientes de la polarización del controlador de polarización.

Para una comparación en potencia de todos los sistemas, se representan las curvas de sensibilidad de los cuatro. El barrido en potencia es el mismo para todos los detectores: desde -64 dBm a -36 dBm, en intervalos de 2 dB.

A diferencia de los otros resultados, en estos se realizan diez trazas en cada punto y se promedian. Las curvas del dependiente, Pol. 1 y Pol. 2 se realizan con la señal alineada y el independiente con polarización aleatoria.

La figura 17 muestra las distintas curvas de BER obtenidas. En el caso ideal, las curvas del dependiente, Pol. 1 y Pol. 2 estarían superpuestas y la del insensible 3 dB a la derecha de ellas. Sin embargo, sabemos que, debido a las pérdidas del PBS, existe una separación de al menos 1 dB extra.

Las curvas de ambas ramas, Pol. 1 y Pol. 2 deben su separación de 2 dB a las

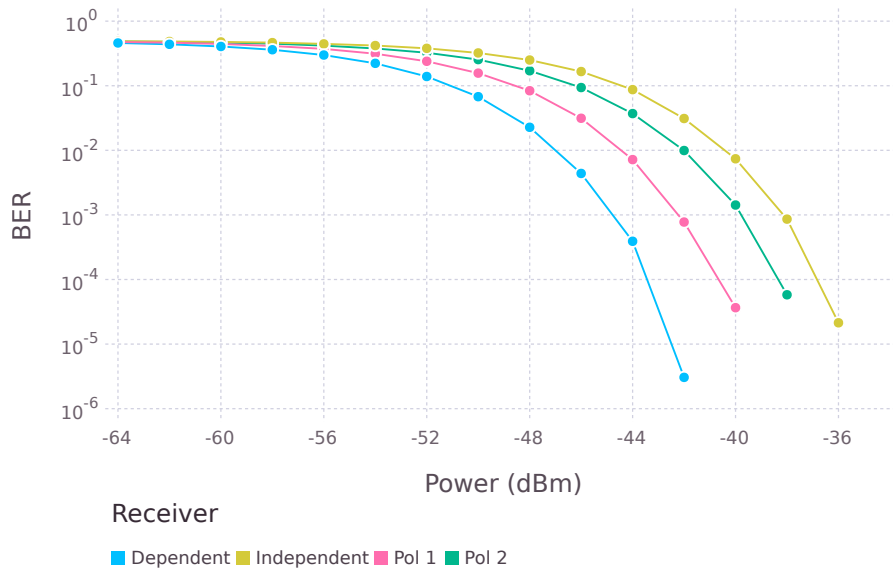


Figura 17: Curvas medidas de sensibilidad de ambos detectores en condiciones óptimas. Dependient es el sensible a la polarización, Independent el insensible y Pol. 1 y Pol. 2, el insensible utilizando el LO a 0 y 90° respectivamente.

diferencias en las características de los fotodiodos empleados. La degradación de la señal debida a esto ya se ha comprobado en las figuras 14, 15 y 16. La diferencia con la curva dependiente se debe también a la diferencia de su fotodetector y a las pérdidas de inserción del PBS.

Finalmente, la curva del detector independiente a la polarización se encuentra a 3 dB del centro de las curvas Pol. 1 y Pol. 2, que es el resultado esperado.

En conclusión, las pérdidas teóricas corresponden con las obtenidas en el análisis y las esperadas por las pérdidas de inserción adicionales. Para obtener una comparación más precisa, se deberían emplear detectores lo más similares posible de forma que las pérdidas se puedan caracterizar respecto a las diferencias del montaje y se minimice el efecto de las diferencias entre las características de los dispositivos.

6. Conclusiones

Se ha comprobado que es posible construir un detector insensible a la polarización, aunque conlleva una pérdida de sensibilidad de al menos 4 dB en la práctica (utilizando un PBS como el empleado en este trabajo).

Existen numerosas mejoras que se pueden aplicar al diseño estudiado. Al quitar el controlador de polarización del montaje, se perdería su contribución al ruido dependiente de la polarización. El uso de fotodiodos de características más similares

eliminaría los problemas observados en el estudio de la figura 16, disminuyendo los efectos de dependencia de la polarización al emplear una k más pequeña.

Por último, de cara al futuro se puede estudiar la implementación de este detector con una modulación DQPSK, que permitiría duplicar la tasa de bits manteniendo la insensibilidad.

Anexos y bibliografía

B. Bibliografía

- [1] Glance, B. *Polarization Independent Coherent Optical Receiver*. Journal of Lightwave Technology 5.2 (1987): 274-76.
- [2] Kikuchi, Kazuro. *Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications*. Journal of Lightwave Technology 34.1 (2016): 157-79. Web.
- [3] Peláez, Justiniano Casas. *Óptica*. Zaragoza: S.n., 2008. Print.
- [4] Keiser, Gerd. *Optical Fiber Communications: Gerd Keiser*. Tercera edición. Auckland: McGraw-Hill, 1984. Print.
- [5] Gowar, John. *Optical Communication Systems*. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2004. Print.

S. Glosario de siglas

A continuación se listan, por orden alfabético, las siglas utilizadas en el texto, su origen (en inglés) y su traducción al español.

- BER - *Bit error ratio*, tasa de error de bits.
- BOSA - *Brillouin optical spectre analyzer*, analizador de espectros ópticos por efecto Brillouin.
- DPSK - *Differential phase shift keying*, modulación diferencial en fase.
- DQPSK - *Differential quadrature phase shift keying*, modulación diferencial en cuadratura.
- EDFA - *Erbium doped fiber amplifier*, amplificador de fibra dopada con erbio.
- IMDD - *Intensity modulated direct detection*, modulación en intensidad y detección directa.
- LO - *Local oscillator*, oscilador local.
- MZM - *Mach-Zehnder modulator*, modulador Mach-Zehnder.
- NRZ - *Non return to zero*, codificación sin retorno a cero.
- OOK - *On-off keying*, modulación on-off.
- PBS - *Polarization beam splitter*, divisor de haz de polarización.

- PC - *Polarization controller*, controlador de polarización.
- PRBS - *Pseudo random bit string*, cadena de bits pseudoaleatoria.
- SNR - *Signal-noise ratio*, relación señal-ruido.
- SOP - *State of polarization*, estado de polarización.
- TLS - *Tunable laser source*, láser sintonizable.