



Sistemas Ópticos Coherentes

Cristóbal Rodríguez

Fernando Cid

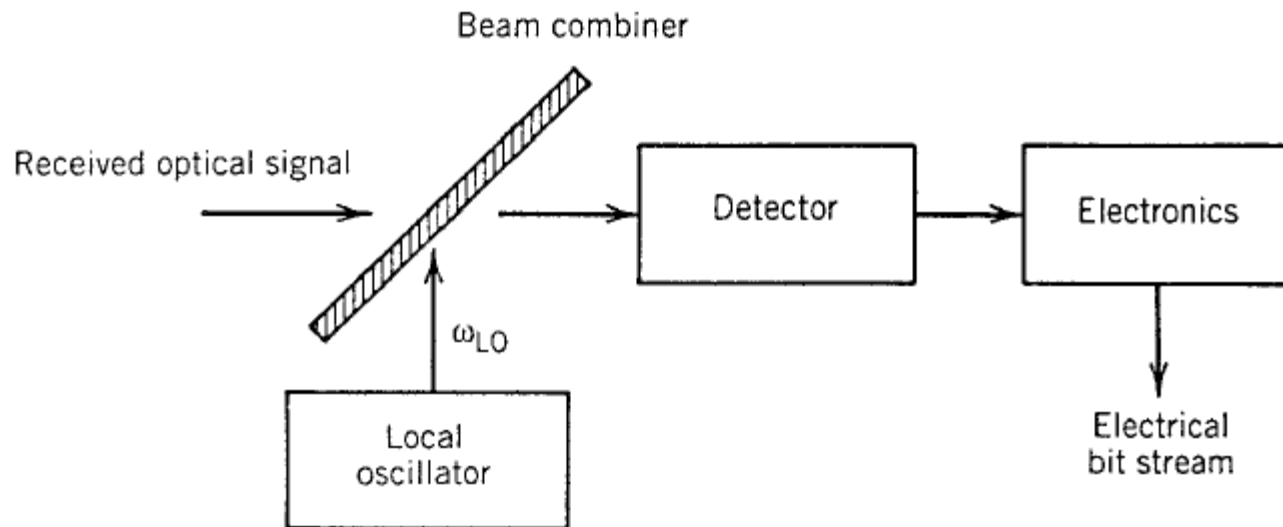
22/03/2012

Sistemas Coherentes

- Introducción.
- Detección Homodina y Heterodina.
- SNR.
- Esquemas de modulación.
- Esquemas de demodulación.
- BER en receptor sincrónico.
- BER en receptor asincrónico.
- Conclusiones.
- Preguntas.

Sistemas Coherentes

- Sistema en el cual el receptor conoce cierta información de la señal que recibe, como por ejemplo la frecuencia portadora y la modulación utilizada en la etapa de transmisión.
- Los sistemas ópticos en general no son coherentes, utilizan IM/DD.



Sistemas Coherentes



Ventajas

- Las técnicas de comunicación coherentes permiten una mejora en la sensibilidad de los detectores de hasta 20 dB, en comparación con IM/DD.
- Permiten un mejor uso del ancho de banda, mejorando la eficiencia de los sistemas WDM.

Sistemas Coherentes

- La señal recibida (E_S) se combina con el oscilador local (E_{LO})

$$E_S = A_S \exp[-i(\omega_0 t + \phi_s)]$$
$$E_{LO} = A_{LO} \exp[-i(\omega_{LO} t + \phi_s)]$$

- A la entrada del detector se tiene la señal $P(t)$

$$P(t) = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos(\omega_{IF} + \phi_s - \phi_{LO})$$

- Donde

$$\omega_{IF} = \omega_0 - \omega_{LO}$$

Detección Homodina

- No trabaja con frecuencia intermedia, dado la frecuencia del oscilador local es igual a la frecuencia de la señal portadora.
- La señal de OL es de una potencia significativamente superior a la de la portadora.
- Entonces a la salida de un fotodetector con responsividad R , se tiene una fotocorriente I_p .

$$I_p(t) = 2R\sqrt{P_s P_{LO}} \cos(\phi_s - \phi_{LO})$$

Detección Homodina

- Comparación entre la potencia recibida entre detección directa y homodina

IM/DD

$$I_p(t) = RP_s$$

$$P(t) \propto R^2 P_s^2$$

R. Homodina

$$I_p(t) = 2R\sqrt{P_s P_{LO}}$$

$$P(t) \propto 4R^2 P_s P_{LO}$$

$$\frac{P_{homodina}}{P_{IM/DD}} = \frac{4P_{LO}}{P_s}$$

Detección Homodina

- Eligiendo un valor apropiado de la potencia del oscilador local se puede lograr mejorar la sensibilidad del detector
- La principal desventaja de este método radica en la alta sensibilidad de la fase relativa de la portadora y el LO.
- Esto se puede solucionar mediante la implementación de un phase lock loop (PLL)

Detección Heterodina

- La frecuencia del oscilador local es diferente a la frecuencia portadora por lo que se tiene una frecuencia intermedia

$$I_p(t) = 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos(\omega_{IF}t + \omega_S - \omega_{LO})$$

$$P(t) \propto \frac{I_p^2}{2}$$

- El factor $1/2$ introduce una penalidad por detección heterodina.
- La ventaja está en que si bien se deben controlar las fluctuaciones de fase, no se requiere implementar un PLL.

SNR

En el detector se producen fluctuaciones de corriente por shot-noise y por ruido térmico. Con varianza igual a:

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2$$

Donde

$$\sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f$$

Para recepción heterodina, se tiene una SNR igual a

$$SNR = \frac{\langle I_p^2 \rangle}{\sigma^2} = \frac{2RP_S P_{LO}}{2q(I_p + I_d)\Delta f}$$

SNR

Si se elige un valor de P_{LO} lo apropiado, se puede aproximar

$$I_p = RP_{LO} \quad \sigma_S^2 \gg \sigma_T^2$$

$$SNR = \frac{RP_s}{q\Delta f} = 2\eta N_p \quad (\text{Recepción heterodina})$$

Donde

η : Eficiencia cuántica del receptor.

N_p : Número de protones recibidos en un bit.

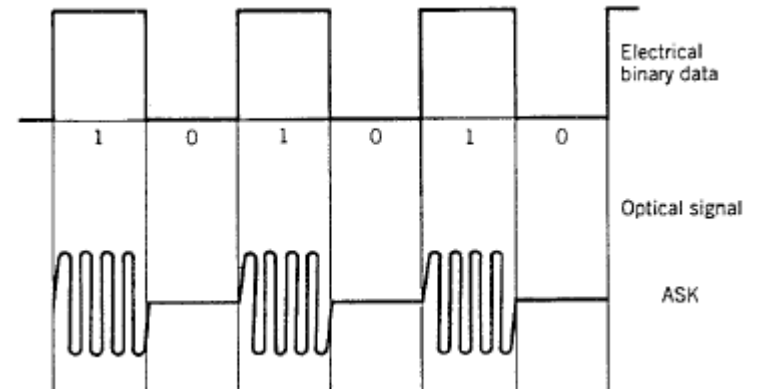
Modulaciones

ASK

- Se modula la amplitud de la señal portadora manteniendo constante su fase y frecuencia.

- El caso particular OOK es idéntico a IM/DD

- La Diferencia está en que la señal se genera externamente, y no modulando directamente la señal generada en el Laser o LED.



Modulaciones

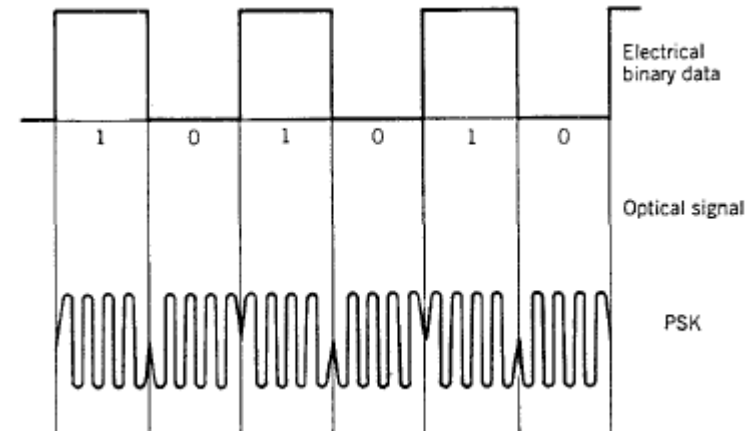
PSK

- Se modula la fase de la señal portadora manteniendo constante su amplitud y frecuencia.

- Es imprescindible un receptor coherente dado que la información está en la fase de la señal.

- La principal desventaja de utilizar esta modulación es la necesidad de tener una fase estable

- Para solucionar esto existe la variante DPSK



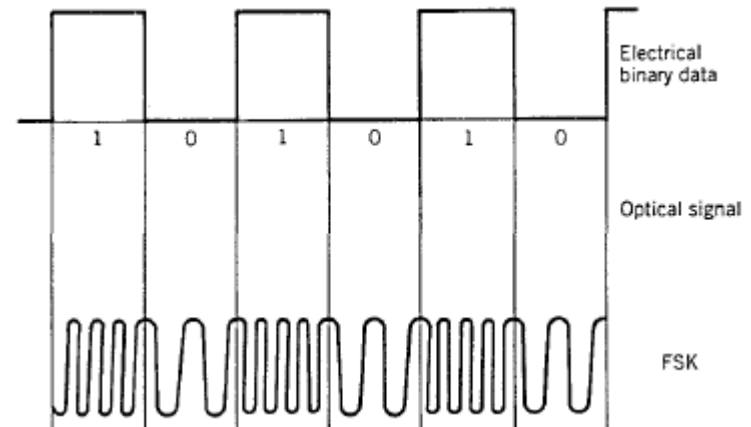
Modulaciones

FSK

- Se modula la frecuencia de la señal portadora manteniendo constante su amplitud y fase
- El ancho de banda está dado por el factor de modulación beta.

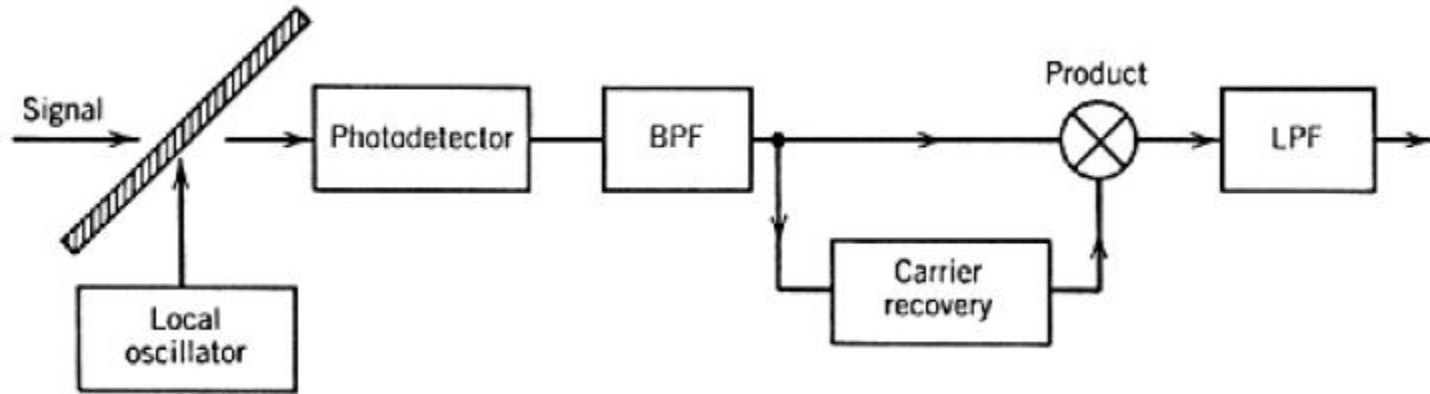
$$\beta = \frac{\Delta f}{B}$$

- Una de las formas más simples de modular es cambiar la corriente que alimenta al Laser, aprovechando el Chirping.



Esquemas de demodulación

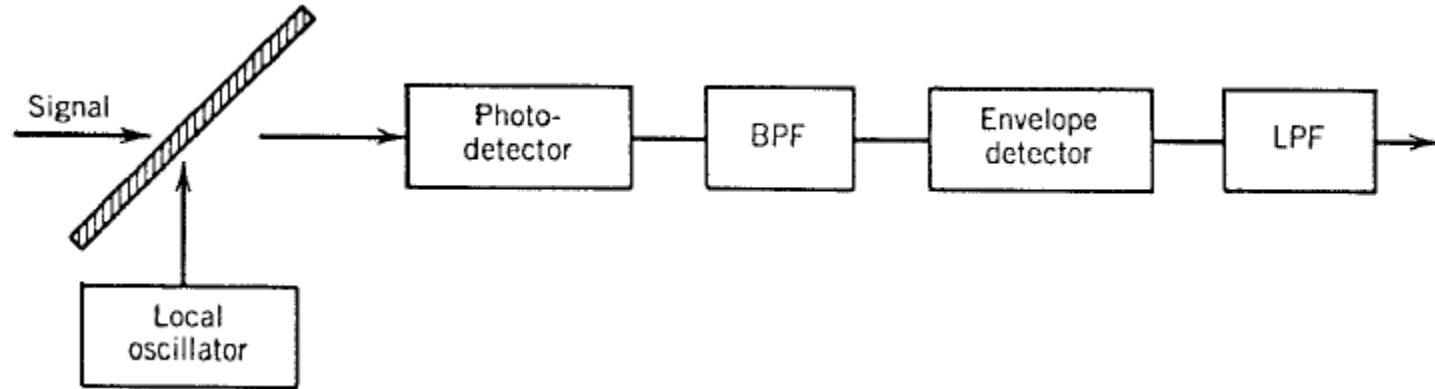
Demodulador Sincrónico Heterodino



- La demodulación se lleva a cabo mediante recuperación de la portadora (frecuencia intermedia)
- Se combina con la señal para ser llevada a banda base, por lo que se deben filtrar las componentes de frecuencia 2 veces la frecuencia intermedia

Esquemas de demodulación

Demodulador Asincrónico Heterodino



- La demodulación se realiza mediante detección de envolvente.
- Para el caso FSK se utilizan dos osciladores locales sintonizados a los distintos tonos correspondientes a los bit “1” y “0”.

Tasa de error de bits

- Análisis en receptores sincrónicos.
- Análisis en receptores asincrónicos.

Tasa de error de bits

- Receptor ASK sincrónico.

Señal de decisión:

$$I_d = 1/2(I_p + i_c)$$

Donde $I_p \equiv 2r(P_S P_{LO})^{1/2}$

I_p puede tomar valor I_1 y $I_0 = 0$ (para ASK)

Para este caso

$$BER = 1/2 \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

Donde $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \approx \frac{I_1}{2\sigma_1} = 1/2(SNR)^{1/2}$

Tasa de error de bits

- Receptor ASK sincrónico.

Es útil dejar la expresión de BER en función del número de fotones que llegan en un bit.

Se usa $SNR = 2\eta N_p$ para caso de receptor heterodino y $SNR = 4\eta N_p$ para caso de receptor homodino, con lo que se obtiene.

$$BER = 1/2 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\eta N_p}{4}} \right)$$

ASK heterodino.

$$BER = 1/2 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\eta N_p}{2}} \right)$$

ASK homodino.

También se puede calcular la sensibilidad.

$$\bar{P}_{rec} = \frac{2Q^2 h\nu \Delta f}{\eta} = \frac{72 h\nu \Delta f}{\eta}$$

ASK heterodino.

$$\bar{P}_{rec} = \frac{Q^2 h\nu \Delta f}{\eta} = \frac{36 h\nu \Delta f}{\eta}$$

ASK homodino.

Tasa de error de bits

- Receptor PSK sincrónico.

Señal de decisión:

$$I_d = 1/2(I_p \cos(\phi) + i_c)$$

ϕ puede tomar valor de 0 o π . Por otro lado, $I_p \equiv 2r(P_s P_{LO})^{1/2}$ y sus valores pueden ser I_1 e $I_0 = -I_1$.

Se puede usar

$$BER = 1/2 \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$$

Donde $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \approx \frac{I_1}{2\sigma_1} = (SNR)^{1/2}$

Tasa de error de bits

- Receptor PSK sincrónico.

Es útil dejar la expresión de BER en función del número de fotones que llegan en un bit.

Se usa $SNR = 2\eta N_p$ para caso de receptor heterodino y $SNR = 4\eta N_p$ para caso de receptor homodino. Con esto se obtiene.

$$BER = 1/2 \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta N_p})$$

ASK heterodino.

$$BER = 1/2 \operatorname{erfc}(\sqrt{2\eta N_p})$$

ASK homodino.

Tasa de error de bits

- Receptor FSK sincrónico.

El receptor FSK sincrónico utiliza un esquema de filtro dual, el cual actúa como dos receptores heterodinos trabajando en paralelo. Uno deja pasar los bits 1 y el otro los bits 0. se consigue una mejora en la SNR, en comparación al caso ASK, en un factor de 2, debido a que en el caso FSK se recibe potencia en un bit 0, a diferencia del caso ASK.

Esto implica que

$$SNR = 4\eta N_p$$

$$\therefore BER = 1/2 \operatorname{erfc} \left(\frac{\eta N_p}{2} \right)$$

FSK heterodino

Tasa de error de bits

Modulation Format	Bit-Error Rate	N_p	\bar{N}_p
ASK heterodyne	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta N_p / 4})$	72	36
ASK homodyne	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta N_p / 2})$	36	18
PSK heterodyne	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta N_p})$	18	18
PSK homodyne	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{2\eta N_p})$	9	9
FSK heterodyne	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta N_p / 2})$	36	36
Direct detection	$\frac{1}{2} \exp(-\eta N_p)$	20	10

Tabla: Sensibilidad de receptores sincrónicos

Tasa de error de bits

- Receptor ASK asincrónico.

Señal de decisión:

$$I = \left((I_p + i_c)^2 + i_s^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

A diferencia de i_c e i_s , I no tiene una FDP (función de densidad de probabilidad) Gaussiana, por lo que el análisis es más complejo. Su FDP se puede calcular de la siguiente manera

$$p(I, I_p) = 1/\sigma^2 \exp\left(-\frac{I^2 + I_p^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{I_p I}{\sigma^2}\right)$$

La ecuación anterior representa una distribución Rice. I solo tiene valores positivos. Si I_p es 0, la distribución será Rayleigh.

Se debe obtener

$$BER = 1/2[P(0/1) + P(1/0)]$$

Tasa de error de bits

- Receptor ASK asincrónico.

Donde

$$P(0/1) = \int_0^{I_D} p(I, I_1) dI$$

$$P(1/0) = \int_{I_D}^{\infty} p(I, I_0) dI$$

Para desarrollar las integrales, se define

$$Q(\alpha, \beta) = \int_{\beta}^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + \alpha^2}{2}\right) I_0(\alpha x) dx$$

$$\therefore BER = 1/2 \left[1 - Q\left(\frac{I_1}{\sigma}, \frac{I_D}{\sigma}\right) + Q\left(\frac{I_0}{\sigma}, \frac{I_D}{\sigma}\right) \right]$$

Es complejo determinar una expresión analítica para I_D , que minimice el valor de BER para valores dados de I_1 , I_0 y σ . Sin embargo se puede aproximar I_D a $I_1/2$, con lo que da

$$BER \approx \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{I_1^2}{8\sigma^2}\right) = \frac{1}{2} \exp(-SNR/8)$$

Tasa de error de bits

- Receptor ASK asincrónico.

Usando $SNR = 2\eta N_p$ se obtiene BER

$$BER = 1/2 \exp\left(-\frac{\eta N_p}{4}\right)$$

Tasa de error de bits

- Receptor FSK asincrónico

- El receptor FSK usa un filtro dual, compuesto por dos receptores ASK.
- Se considera que las corrientes de decisión generadas son I_p e $-I_p$, por lo que el umbral de decisión es $I_D = 0$.

Sean I' e I las corrientes generadas en cada sección del filtro dual. Para un bit 1 se tiene

$$I = \left((I_p + i_c)^2 + i_s^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(distribución Rice)}$$

$$I' = \text{noise} \quad \text{(distribución Rayleigh)}$$

Probabilidad de error para bit 1

$$P(0/1) = \int_0^{\infty} p(I, I_1) \left[\int_I^{\infty} p(I', 0) dI' \right] dI$$

Tasa de error de bits

- Receptor FSK asincrónico

- Debido a la característica dual del filtro se puede demostrar que

$$P(0/1) = P(1/0)$$

- También se puede desarrollar analíticamente la expresión de BER, obteniendo

$$BER = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{I_1^2}{4\sigma^2}\right) = \frac{1}{2} \exp(-SNR/4)$$

$$BER = 1/2 \exp(-\eta N_p/2)$$

Tasa de error de bits

- Receptor DPSK asincrónico

- La demodulación PSK asincrónica no es factible, pero se puede usar para DPSK.
- La corriente filtrada se divide en dos y una de las partes se retrasa en un tiempo igual al periodo de un bit. Estas dos corrientes se multiplican.
- El cálculo es más complicado, por tratarse de dos corrientes multiplicadas. Sin embargo el resultado es sencillo y se muestra a continuación.

$$BER = 1/2 \exp(-\eta N_p)$$

Tasa de error de bits

Modulation Format	Bit-Error Rate	N_p	\bar{N}_p
ASK heterodyne	$\frac{1}{2} \exp(-\eta N_p/4)$	80	40
FSK heterodyne	$\frac{1}{2} \exp(-\eta N_p/2)$	40	40
DPSK heterodyne	$\frac{1}{2} \exp(-\eta N_p)$	20	20
Direct detection	$\frac{1}{2} \exp(-\eta N_p)$	20	10

Tabla: Sensibilidad de receptores sincrónicos

Tasa de error de bits

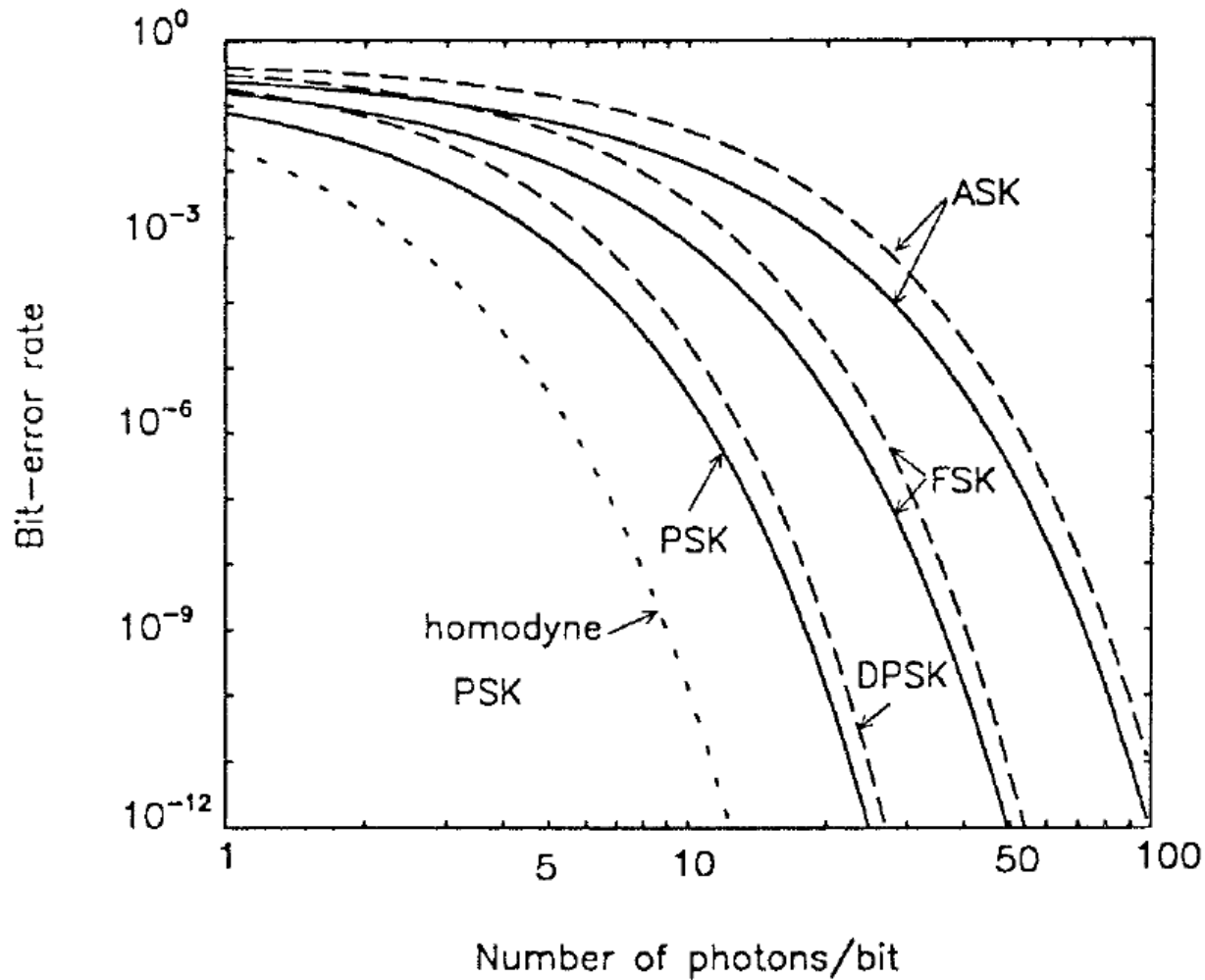


Gráfico: Comparación de VER, casos sincrónicos y asincrónicos

Estado de la tecnología (2002)

- No hay uso comercial de sistemas ópticos coherentes, solo uso experimental, llegando a la tasa de transmisión de 10Gbps.
- Entre las principales razones se encuentra el éxito de la tecnología WDM y la llegada de los amplificadores EDFA.

Conclusiones

- Los sistemas coherentes presenta ventajas sobre los de modulación de intensidad y detección directa. (Ancho de banda y sensibilidad).
- Su principal desventaja está en que las etapas de transmisión y recepción se hacen más complejas (moduladores y demoduladores).