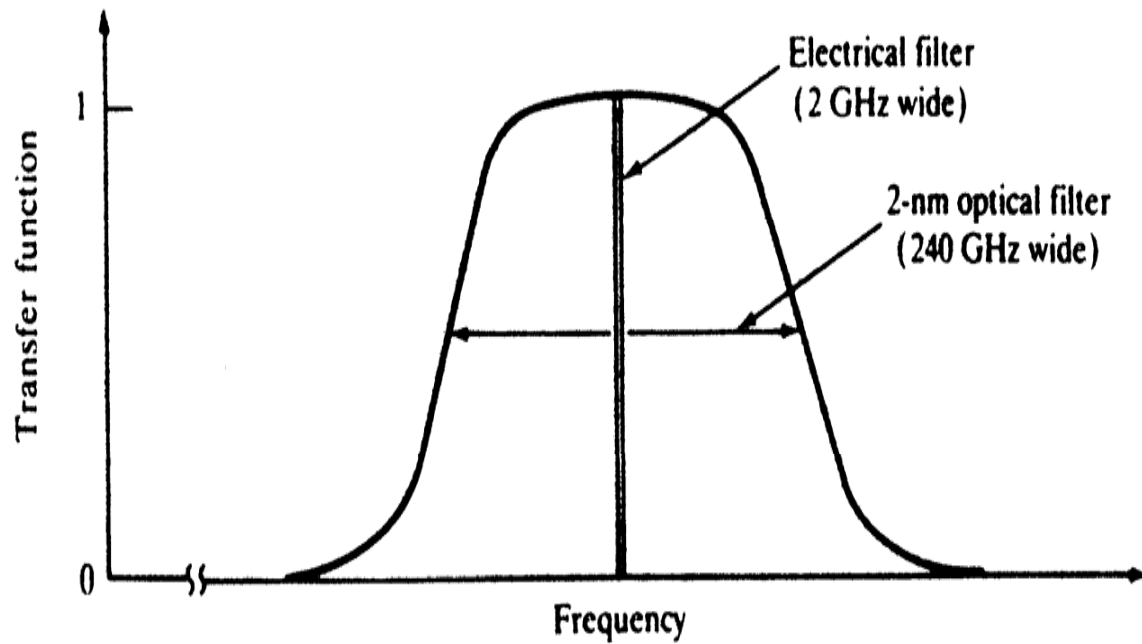


KOMUNIKASI KOHEREN

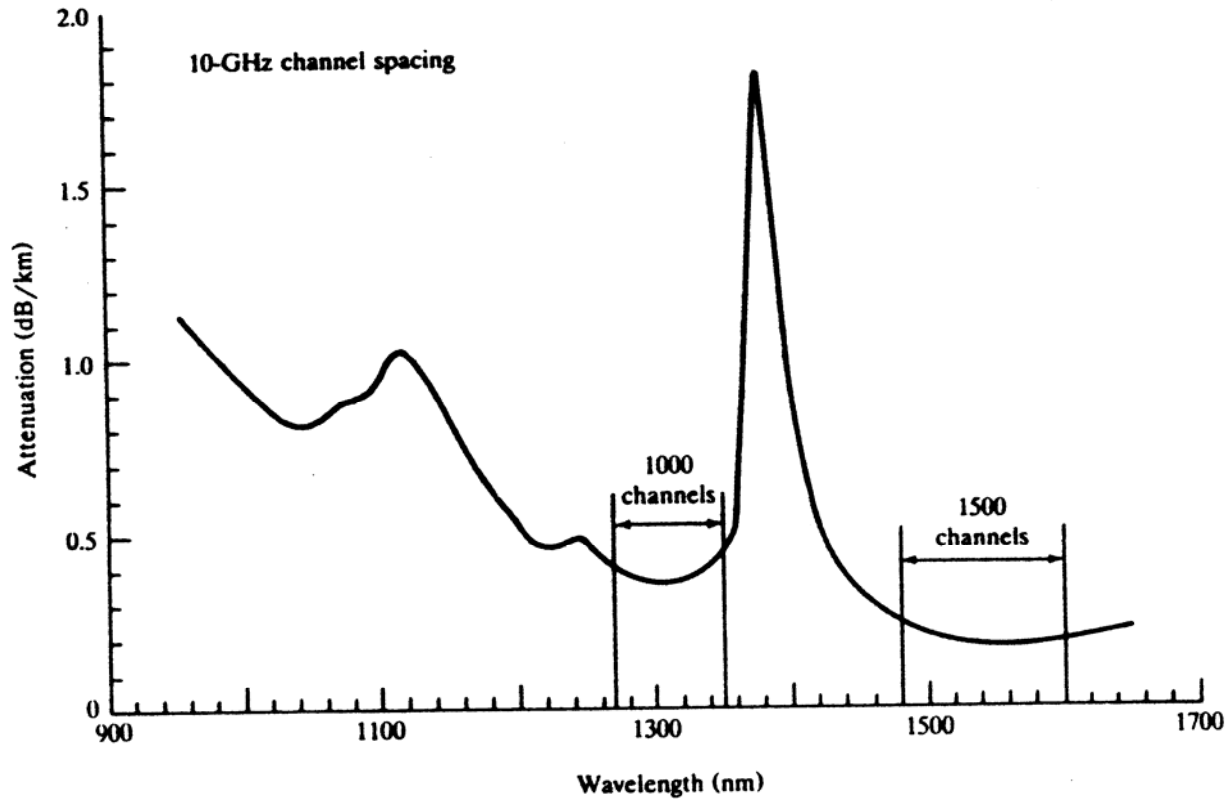
Ref : Keiser

Pengertian

- **Siskom optik koheren** : siskom yg menggunakan deteksi heterodyne atau homodyne yi cahaya diperlakukan sebagai media pembawa spt sistem radio gel mikro dpt menggunakan modulasi amplitudo, frek atau phasa.
- **Keuntungan** :
 - **Sensitifitas penerima mendekati sempurana (meningkat > 20 dB dibanding IM/DD)**
 - **Selektifitas frek sangat tinggi → kapasitas kanal meningkat.**
- **Wilayah pnj gel** :
 - **1270 s/d 1350 nm → 1000 kanal (channel spacing 10 GHz)**
 - **1480 s/d 1600 nm → 1500 kanal**



Filter optis passband 2 nm (240 GHz), filter elektrik 2 GHz



Asumsi 10 GHz Channel spacing window 1300 nm, ada 1000 kanal dan 1550 nm ada 1500 kanal

- **Faktor dlm implementasi :**
 - **Kemampuan mengembangkan laser koheren bw 30.000 GHz**
 - **Implementasi metode pengkodean yg tepat**
 - **Pengembangan metode pengendalian polarisasi di penerima**

Konsep dasar

Medan listrik sinyal transmisi memiliki gelombang bidang berbentuk :

$$E_s = A_s \cos[\omega_s t + \phi(t)]$$

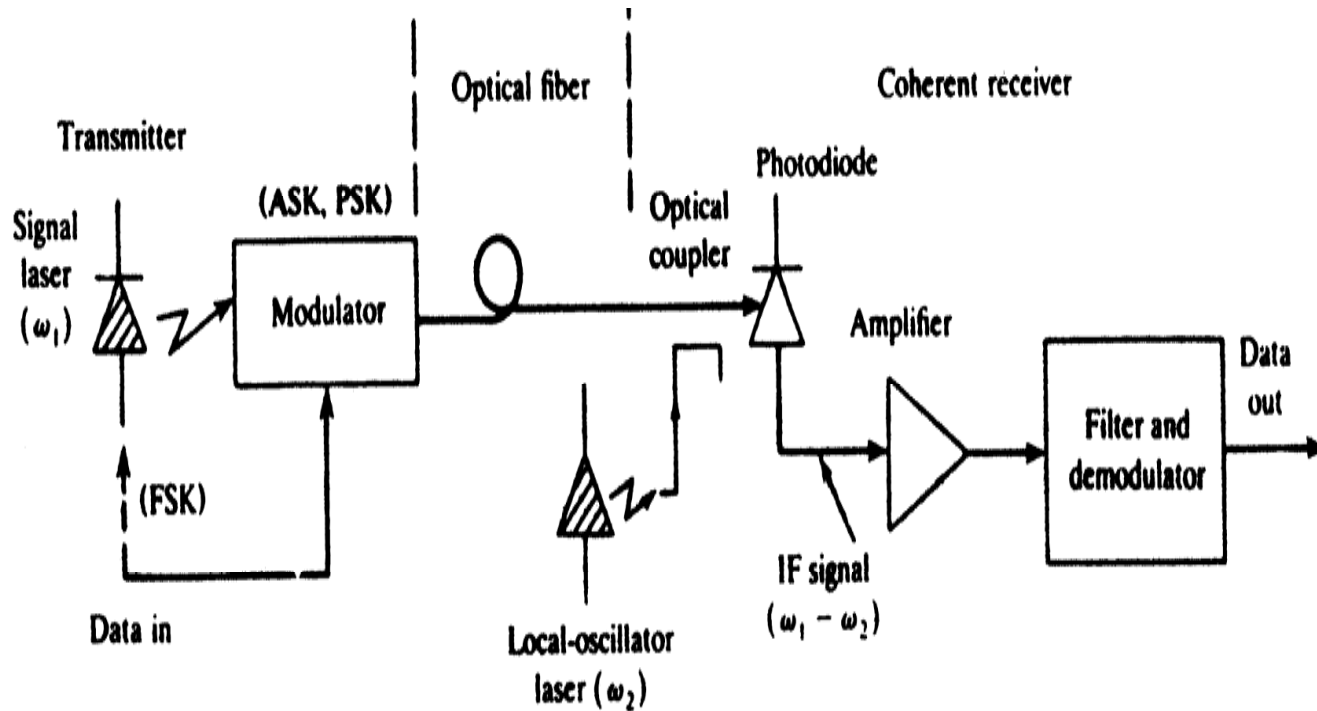
A_s : Amplitudo medan sinyal optis

ω_s : Frekuensi pembawa sinyal optis

$\Phi_s(t)$: Fasa sinyal optis

Teknik modulasi :

- **ASK atau OOK** → harga AS tergantung bit 1 atau 0
- **FSK** → $\Phi_s(t)$ berharga $\omega_1 t$ atau $\omega_2 t$
- **PSK** → $\Phi_s(t) = \beta \sin \omega_m t$, β : indeks modulasi, $\omega_m t$ frekuensi modulasi



Konsep dasar sistem gel cahaya koheren

Metode modulasi ada 3, demodulasi ada 4

Direct detection.

Amplitudo sinyal elektrik memodulasi daya optis dr sumber optik → daya optis sebanding dgn level arus sinyal.

Di penerima sinyal optis yg datang langsung diubah ke keluaran listrik yg dimodulasi.

Arus deteksi langsung sebanding dgn intensitas (kuadrat medan listrik) sinyal optis I_{DD}

$$I_{DD} = E_S E_S^* = \frac{1}{2} A_s^2 [1 + \cos(2\omega_s t + 2\phi_s)]$$

suku $\cos(2\omega_s t + 2\phi_s)$

dpt dieliminasi di penerima krn frek 2 x frek pembawa optis → pers tsb menjadi :

$$I_{DD} = E_S E_S^* = \frac{1}{2} A_s^2$$

Sistem gel optis koheren

Penerima mula2 menambah gel optis yg dibangkitkan di penerima pd sinyal yg datang dan mendeteksinya.

Metode deteksi tgt pd bgmn sinyal optis DICAMPUR dgn osilator lokal (homodyne atau heterodyne) dan sinyal listrik DIDETEKSI (sinkron dan asinkron):

PENCAMPURAN sinyal informasi optis dan sinyal osc lokal terjadi di permukaan detektor foto sebelum terjadi pendeteksian.

Medan osc lokal :

$$E_{LO} = A_{LO} \cos[\omega_{LO}t + \phi_{LO}(t)]$$

E_{LO} : Amplitudo LO

ω_{LO} : Frekuensi LO

$\phi_{LO}(t)$: Fasa LO

Hasil deteksi yi intensitas :

$$I_{coh}(t) = (E_S + E_{LO})^2$$

$$I_{coh}(t) = \frac{1}{2} A_S^2 + \frac{1}{2} A_{LO}^2 + A_S A_{LO} \cos[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi(t)] \cos \theta(t)$$

$$\phi(t) = \phi_s(t) - \phi_{LO}(t) \quad : \text{selisih fasa relatif sinyal informasi optis dan osc lokal}$$

$$\cos \theta(t) = \frac{E_S \cdot E_{LO}}{|E_S \parallel E_{LO}|} \quad : \text{Misalignment polarisasi antara gel sinyal dan gel osc lokal}$$

Tampak bhw detektor tidak mendeteksi $2\omega_s$

Karena daya $P(t)$ sebanding dng intensitas, maka di detektor foto :

$$P(t) = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi(t)] \cos \theta(t)$$

P_S : daya sinyal optis

P_{LO} : daya osc lokal, dengan $P_{LO} \gg P_S$

$\omega_s - \omega_{LO} = \omega_{IF}$: frekuensi intermediate

$\Phi(t)$: sudut phasa bervariasi thd waktu selisih level sinyal dan osc lokal

ω_{IF} : umumnya puluhan atau ratusan MHz

Deteksi Homodyne

Jika frek sinyal informasi optis dan osc lokal sama, maka $\omega_{IF} = 0$ mrpk kasus khusus disebut deteksi homodyne

$$P(t) = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos \phi(t) \cos \theta(t)$$

→ dpt digunakan :

- OOK : P_S bervariasi dgn menjaga $\Phi(t)$ tetap
- PSK : Phasa sinyal Φ_S bervariasi dgn menjaga P_S tetap

$P_{LO} \gg P_S$ dan P_{LO} tetap → L_O secara efektif sbg penguat sinyal yg berarti meningkatkan sensitifitas penerima dibandingkan deteksi langsung

Pd deteksi homodyne menghasilkan baseband langsung shg tdk perlu demodulasi elektrik.

Penerima homodyne menjadi sistem koheren paling sensitif, tetapi juga paling sulit utk dibuat krn osc lokal harus dikendalikan oleh PLL optis dan membutuhkan frek yg sama antara sinyal dan osc lokal → lebar spektral paling sempit dan wavelength tuneability sangat tinggi.

Deteksi Heterodyne

Jika $\omega_{IF} \neq 0$, maka terjadi deteksi homodyne dan tdk membutuhkan PLL optis → paling mudah diimplementasikan, tetapi kurang sensitif 3 dB thd homodyne.

Dpt digunakan modulasi OOK, FSK atau PSK.

Krn $P_S \ll P_{LO}$, maka :

$$P(t) \approx P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi(t)] \cos \theta(t)$$

Arus keluaran terdiri dr arus dc :

$$i_{dc} = \frac{\eta q}{hf} P_{LO}$$

dan IF bervariasi thd waktu :

$$i_{IF}(t) = \frac{2\eta q}{hf} \sqrt{P_S P_{LO}} \cos[\omega_{IF} + \phi(t)] \cos \theta(t)$$

Persyaratan Laser semikonduktor

Baik laser pembangkit sinyal maupun osc lokal perlu laser single mode yg memiliki :

- Lebar spektral sempit
- Frekuensi stabil
- Kemampuan wave-length tuning

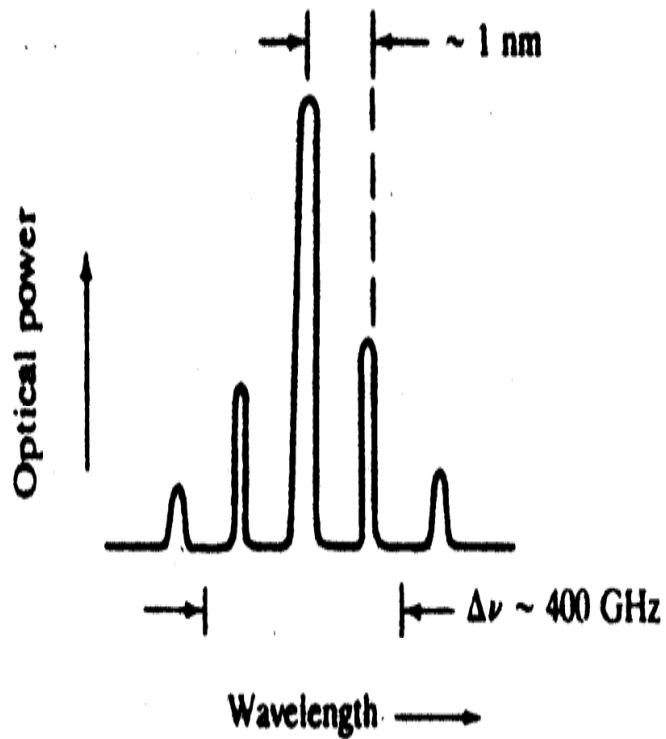
Lebar spektral sumber :

Hub Δf dan $\Delta \lambda$:

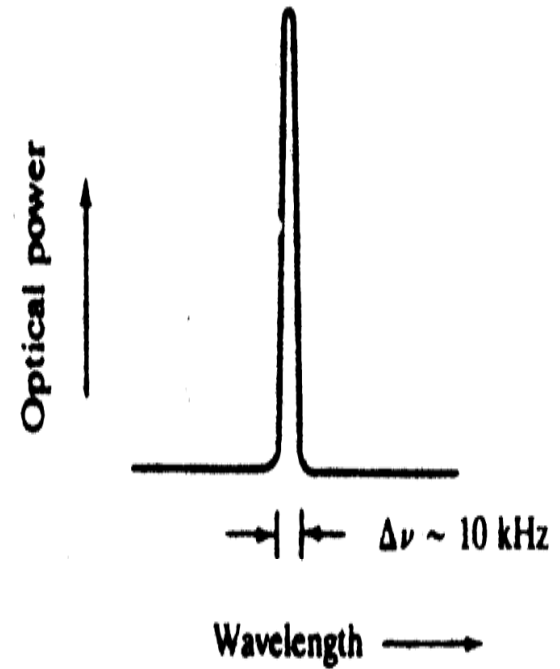
$$\Delta f = \frac{c \Delta \lambda}{\lambda^2}$$

Laser FP bekerja pd 1550 nm dgn $\Delta \lambda = 3 \text{ nm} \rightarrow$

$$\Delta f = \frac{(3 \times 10^8 \text{ m / s})(3 \times 10^{-9} \text{ m})}{(1,55 \times 10^{-6} \text{ m})^2} = 500 \text{ GHz}$$



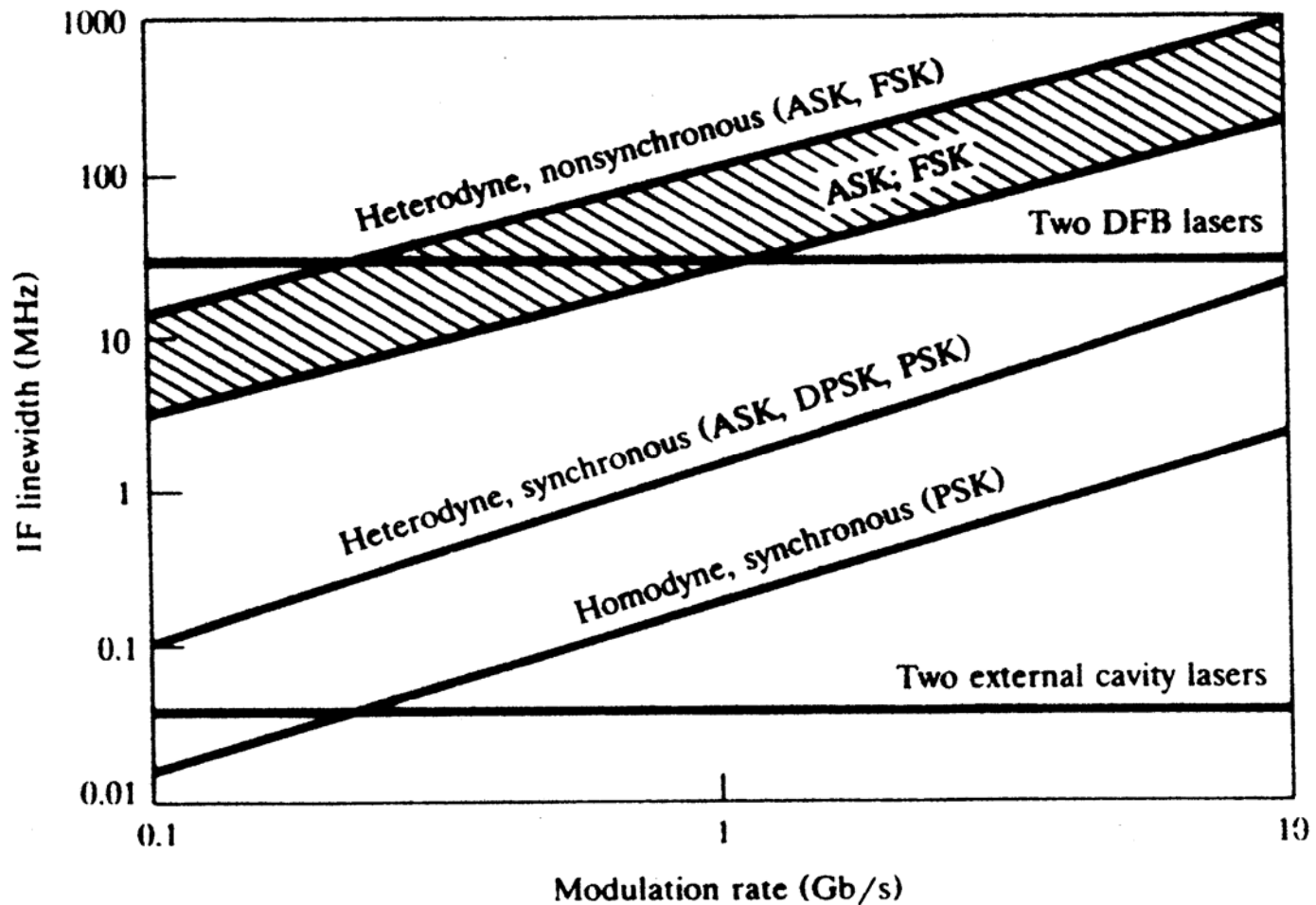
(a)



(b)

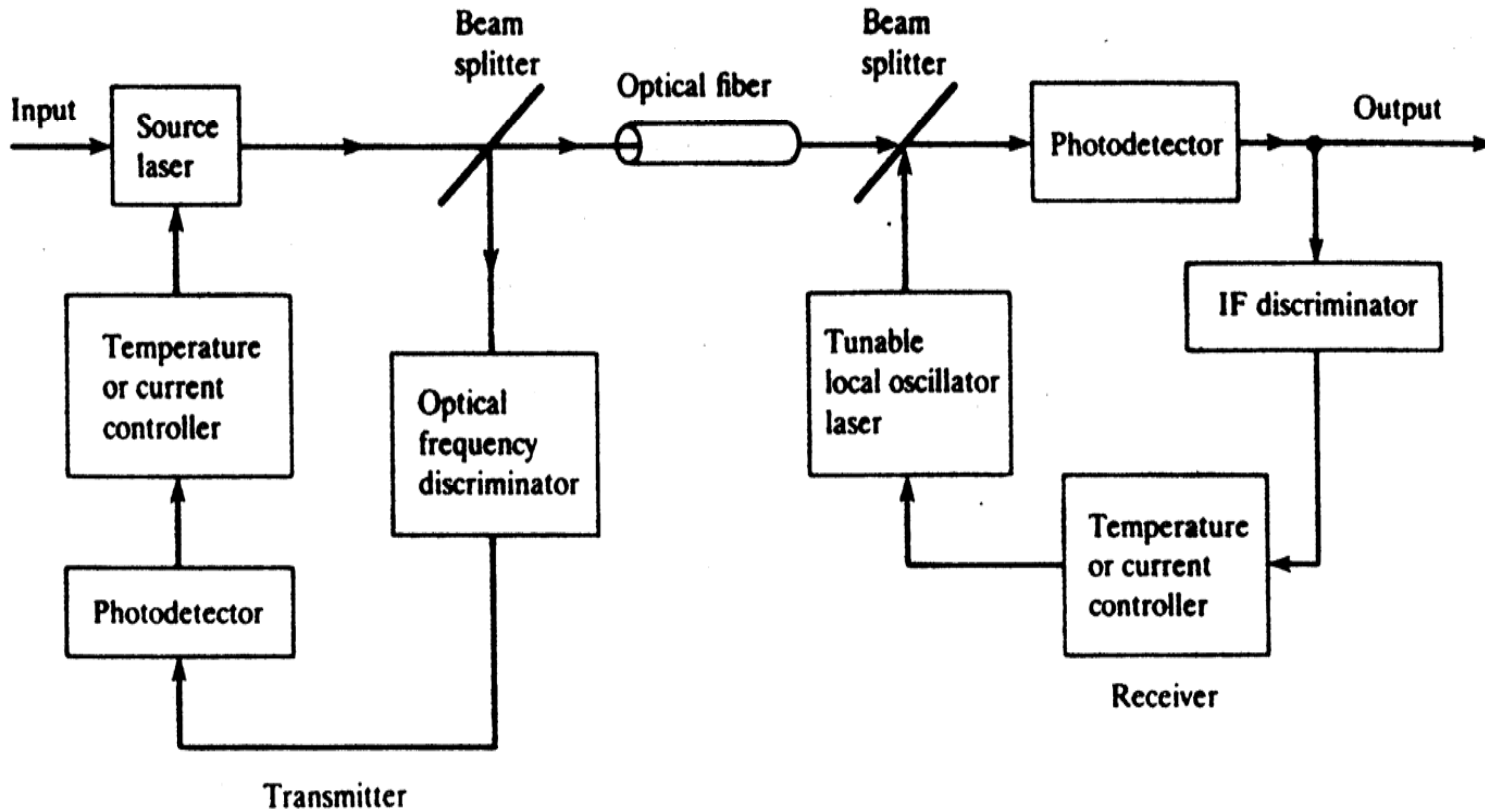
(a) Laser FP lebar spektral 3 nm (400 GHz pd 1550 nm)

(b) Laser cavity eksternal lebar spektral 10^{-7} nm (10 KHz pd 1550 nm)



Persyaratan lebar spektral berbagai sistem gel cahaya koheren

Wavelength tuning



Skema penstabilan frekuensi sistem gel cahaya koheren

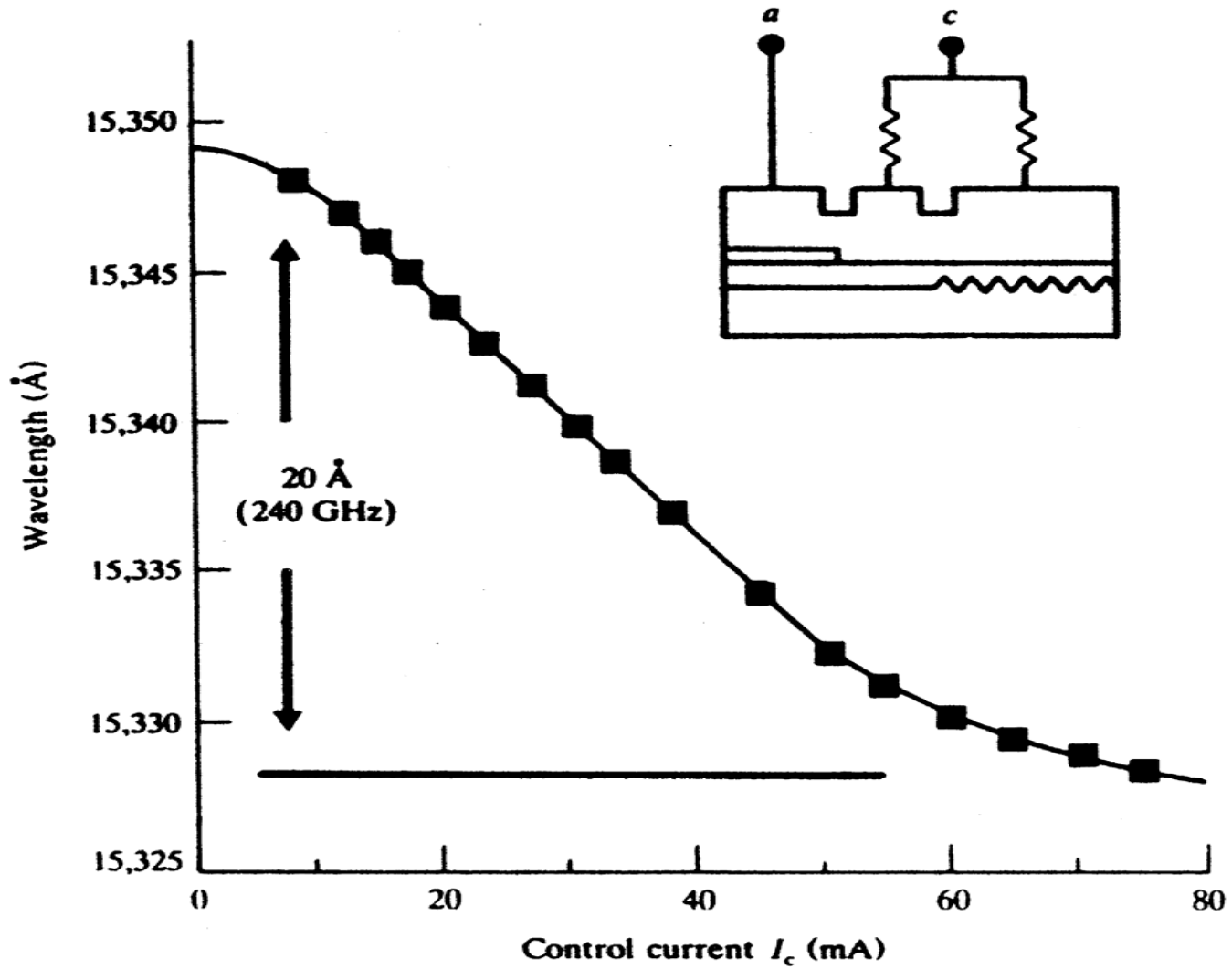
Nilai ketergantungan frek laser thd perubahan suhu

10 s/d 20 GHz/°C

Nilai ketergantungan frek laser thd perubahan arus

1 s/d 5 GHz/mA

→ Stabilitas frek tengah laser dpt dilakukan dgn injeksi arus atau perubahan suhu.



Contoh wavelength tuning 2 nm dgn laser DBR

OOK deteksi langsung

 \bar{N}

Asumsi probabilitas pulsa 1 dan 0 sama.

Krn pd OOK arus data hanya on bila setengah rata2 waktu, jumlah photon yg dibutuhkan setiap bit informasi adalah setengah jumlah yg dibutuhkan satu pulsa. Shg jika \bar{N} pasangan elektron-hole dibangkitkan selama pulsa 1 dan 0 pasangan elektron-hole dibangkitkan selama pulsa 0, maka rata2 jumlah photon per bit \bar{N}_p untk efisiensi kuantum $\eta = 1$:

$$\bar{N}_p = \frac{1}{2} \bar{N} + \frac{1}{2} (0)$$

$$\bar{N} = 2\bar{N}_p$$

Sehingga peluang terjadi error : $\frac{1}{2} P_r(0) = \frac{1}{2} e^{-2\bar{N}_p}$

Berarti dibutuhkan 10 photon tiap bit utk mendapatkan BER 10^{-9}

Dlm praktek sangat sulit dgn kuantum limit utk penerima deteksi langsung

Sistem homodyne OOK

Jika diterima pulsa 0 selama T, rata2 $\overline{N_0}$ pasangan elektron hole yg dibangkitkan oleh osilator lokal :

$$\overline{N_0} = A_{LO}^2 T$$

Jika diterima pulsa 1 selama T, rata2 $\overline{N_1}$ pasangan elektron hole yg dibangkitkan oleh osilator lokal :

$$\overline{N_1} = (A_{LO} + A_S)^2 T \approx (A_{LO}^2 + 2A_{LO}A_S)T$$

karena $A_{LO}^2 \gg A_S^2$

Keluaran LO \gg level sinyal terima, tegangan V di dekoder selama diterima pulsa 1 :

$$V = \overline{N_1} - \overline{N_0} = 2A_{LO}A_S T$$

Associated rms noise : $\sigma \approx \sqrt{\overline{N_1}} \approx \sqrt{\overline{N_0}}$

BER :

$$P_e = BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{V}{2\sqrt{2}\sigma} \right) \right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{V}{2\sqrt{2}\sigma} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{A_s \sqrt{T}}{\sqrt{2}\sigma} \right)$$

Erfc (x) = 1 – erf(x) : komplemen fungsi error

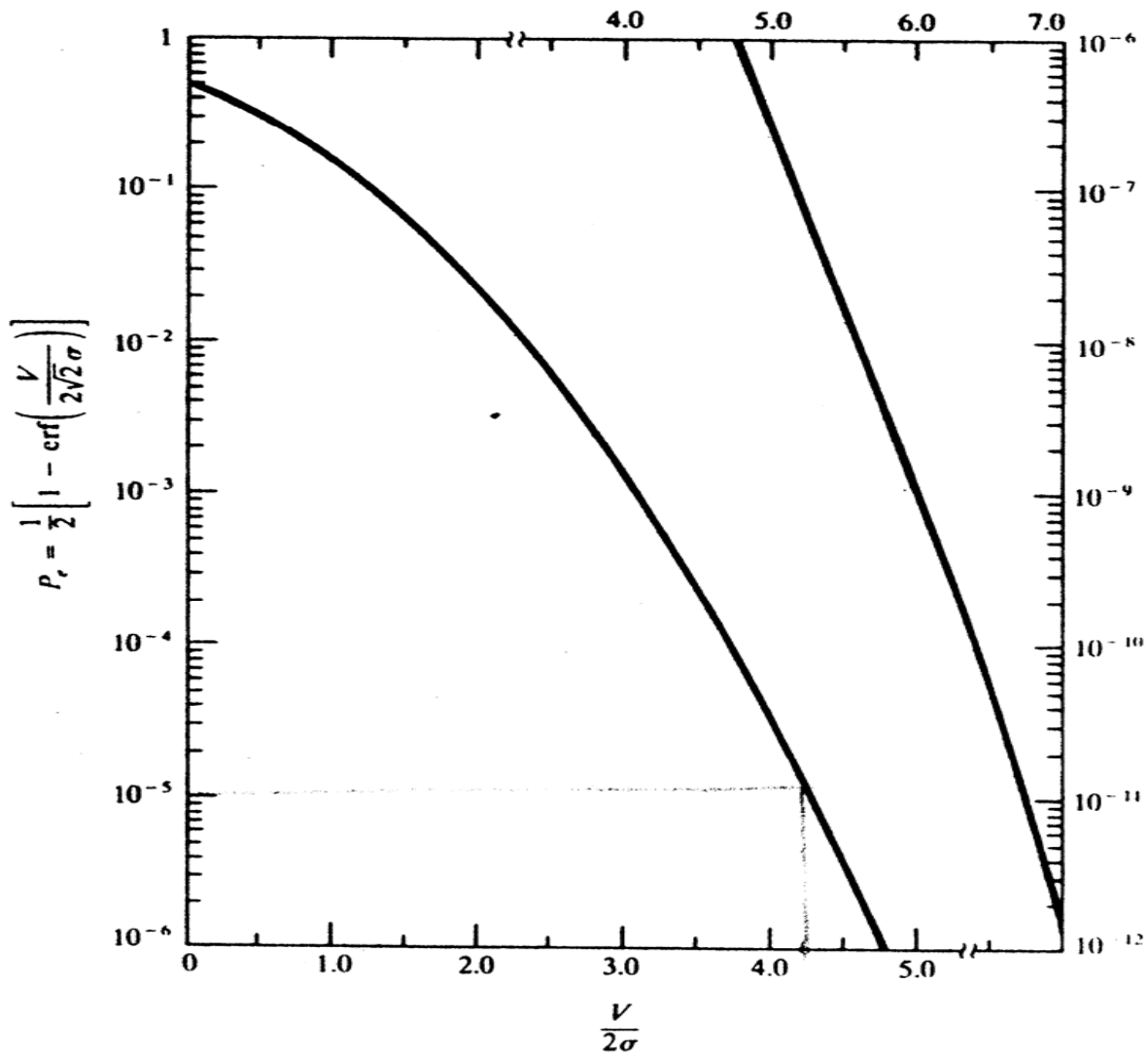
Pd BER 10^{-9} dr grafik $\rightarrow V/\sigma = 12$

sehingga $A_s^2 T = 36$: jumlah photon dibangkitkan sinyal tiap pulsa diharapkan.

Shg pd deteksi homodyne OOK, energi rata2 harus menghasilkan 36 pasangan elektron-hole.

Pd kondisi ideal kuantum efisiensi =1, BER 10^{-9} dpt dicapai dgn energi optis diterima rata2 36 photon tiap pulsa

Dgn asumsi jml pulsa 1 dan 0 sama, maka jumlah rata2 photon diterima tiap bit informasi $\overline{N_p} = 18$.



BER sbg fungsi S/N

Shg pd deteksi homodyne OOK besarnya BER :

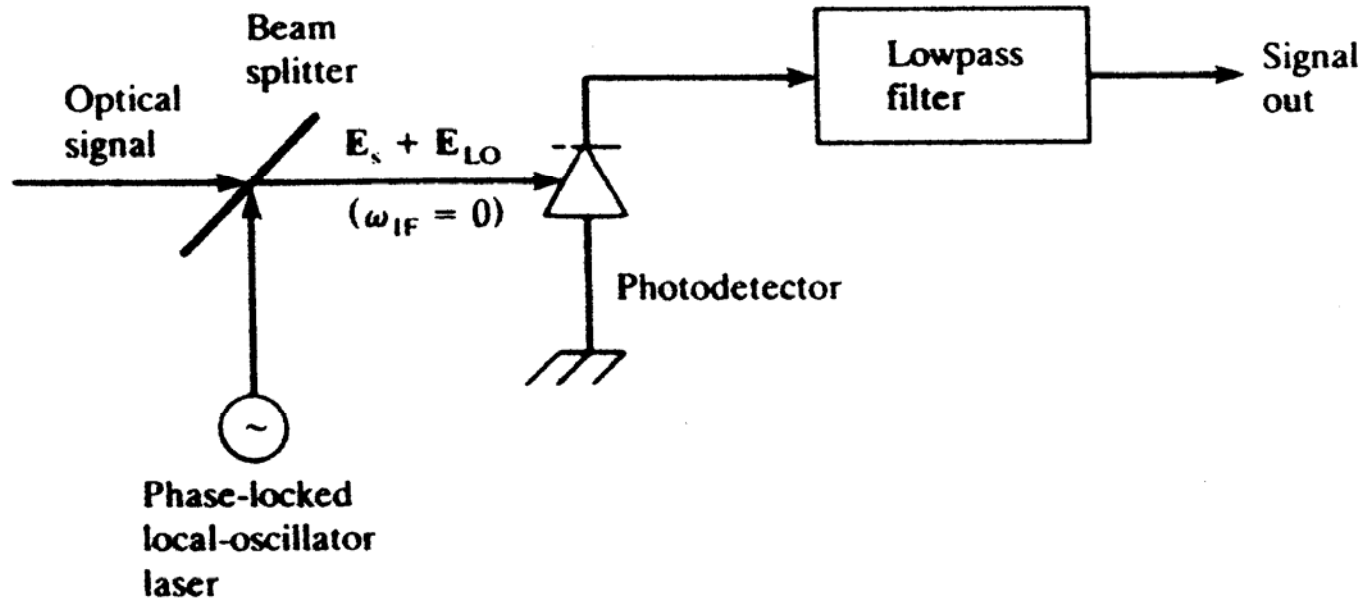
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\eta \overline{N_P}}\right)$$

Utk penyederhanaan pd $x \geq 5$: $\operatorname{erfc}\left(\sqrt{x}\right) \approx \frac{e^{-x}}{\sqrt{\pi x}}$

Shg pd deteksi homodyne dgn : $\eta \overline{N_P} \geq 5$

$$BER \approx \frac{1}{2} \frac{e^{-\eta \overline{N_P}}}{\sqrt{\pi \eta \overline{N_P}}}$$

Sistem homodyne PSK



Penerima homodyne

Deteksi homodyne modulasi PSK secara teori menghasilkan sensitifitas penerima terbaik, tetapi paling sulit diimplementasikan.

Utk pulsa 0, sinyal dan osilator lokal tidak sephasa, shg resultan jumlah pasangan elektron-hole yg dibangkitkan :

$$\overline{N}_0 = (A_{LO} - A_S)^2 T$$

Serupa dgn itu, jika pulsa 1 maka sinyal dan osilator lokal sephasa shg resultan jumlah pasangan elektron-hole yg dibangkitkan :

$$\overline{N}_1 = (A_{LO} + A_S)^2 T$$

Akibatnya teg di dekoder penerima :

$$V = \overline{N}_1 - \overline{N}_0 = (A_{LO} + A_S)^2 T - (A_{LO} - A_S)^2 T = 4A_{LO}A_S T$$

Associated rms noise : $\sigma = \sqrt{A_{LO}^2 T}$

Pd BER 10^{-9} dr grafik $\rightarrow V/\sigma = 12$

sehingga $A^2_{LO}T = 9$

Pd kondisi ideal kuantum efisiensi =1, BER 10^{-9} dibutuhkan rata2 9 photon tiap bit.

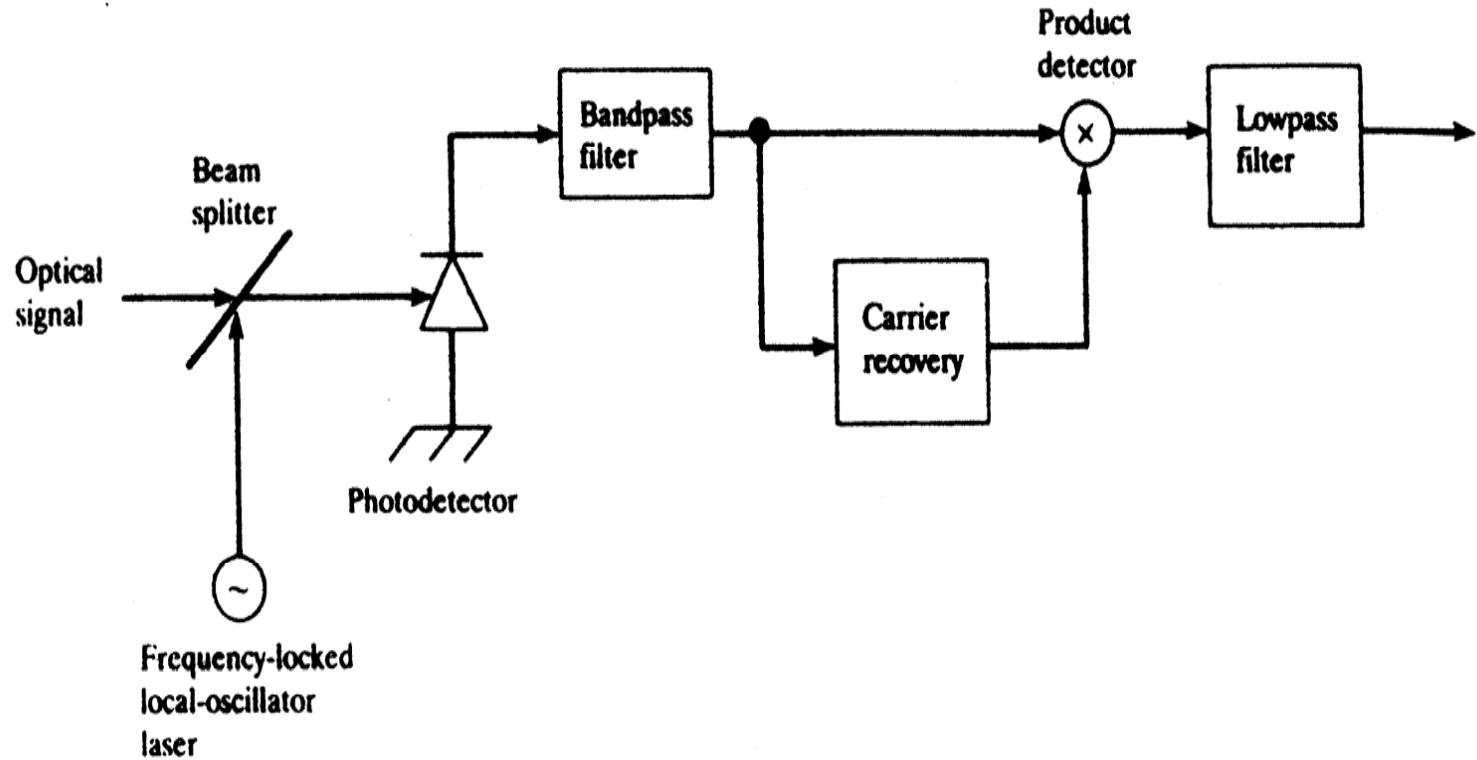
Catatan : tidak perlu dibedakan antara photon tiap pulsa dan tiap bit, krn sinyal optis PSK selalu ada.

Shg pd deteksi homodyne PSK :

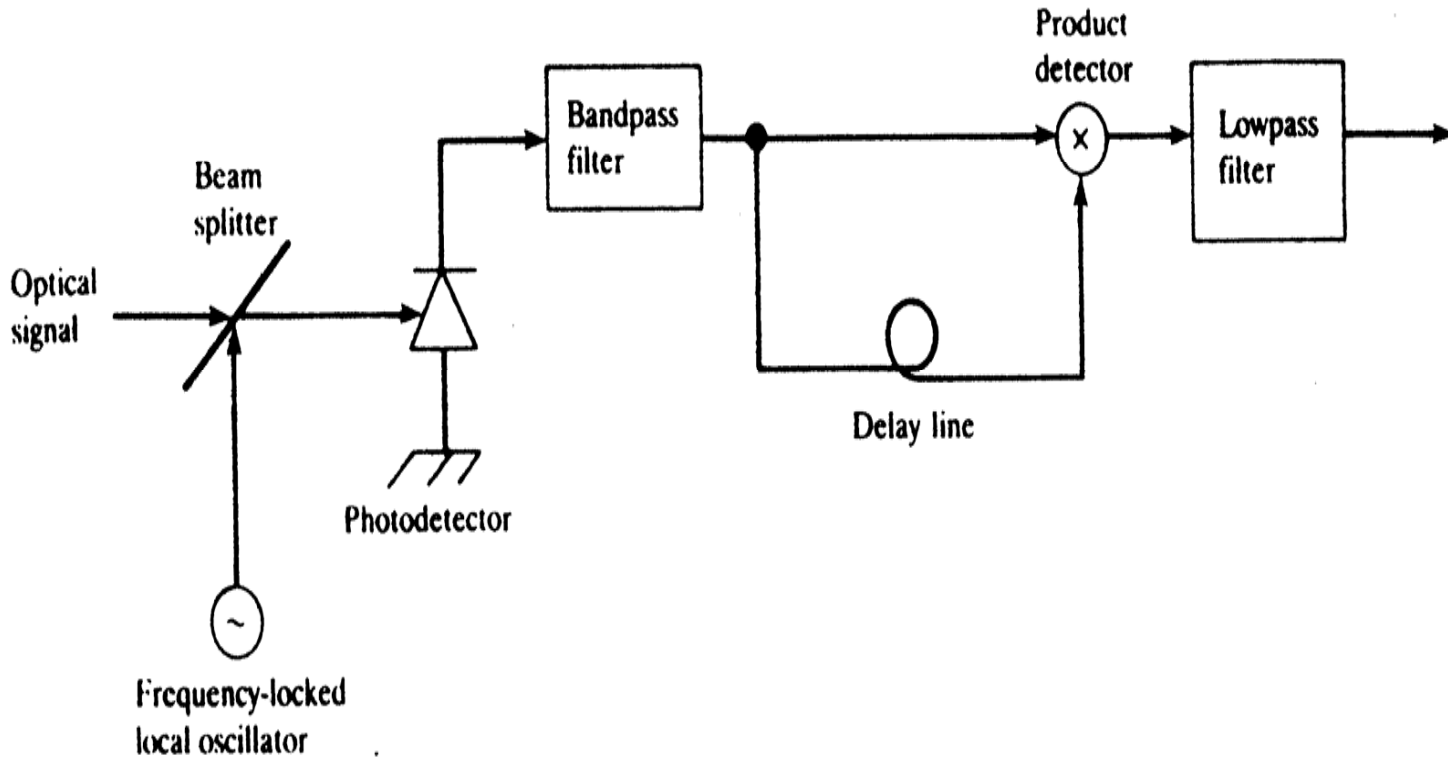
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{2\eta \overline{N}_P}$$

$$BER = \frac{1}{2} \frac{e^{-2\eta \overline{N}_P}}{\sqrt{2\pi\eta \overline{N}_P}}$$

Deteksi Heterodyne



Deteksi sinkron menggunakan sirkit carrier-recovery



Deteksi asinkron menggunakan delay line 1 bit

Analisa penerima heterodyne lebih kompleks dr homodyne, krn keluaran detektor photo muncul pd frek ω_{IF}

PSK sinkron :
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\eta \overline{N}_P}$$

PSK asinkron tanpa menggunakan PLL, dikenal sbg DPSK (differential PSK) :
$$BER = \frac{1}{2} e^{(-\eta \overline{N}_P)}$$

Deteksi OOK heterodyne sinkron :
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{1}{2} \eta \overline{N}_P}$$

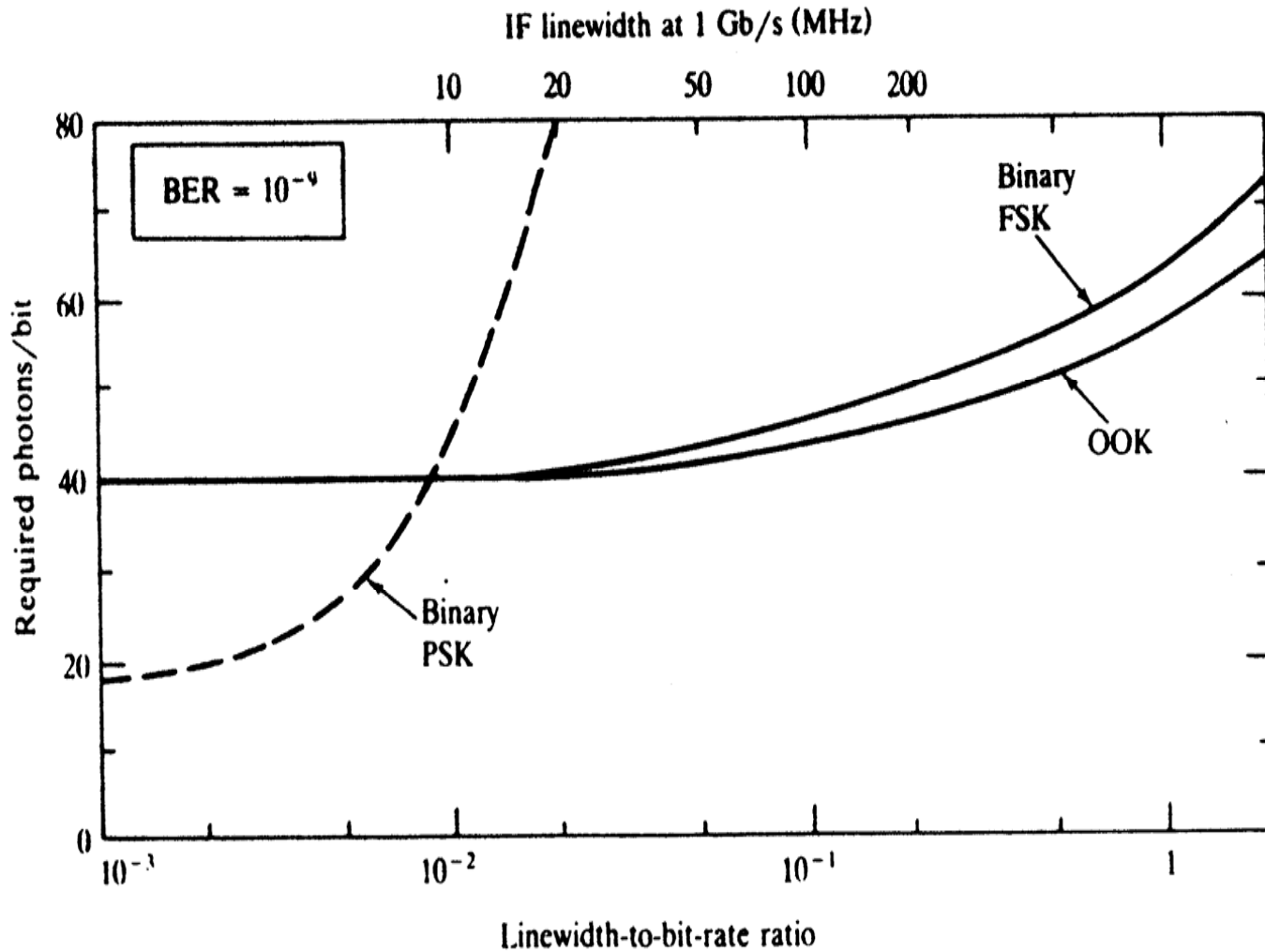
Deteksi OOK heterodyne asinkron :
$$BER = \frac{1}{2} e^{\left(-\frac{1}{2} \eta \overline{N}_P\right)}$$

Perbandingan prob error sbg fungsi jumlah photon diterima tiap bit pd sistem optis koheren

| Modulation | Probability of error | | | |
|------------------------------|--|---|---|--------------------------------------|
| | Homodyne | Heterodyne | | Direct detection |
| | | Synchronous detection | Asynchronous detection | |
| On-off keying (OOK) | $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\eta \bar{N}_p)^{1/2}$ | $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\frac{1}{2} \eta \bar{N}_p)^{1/2}$ | $\frac{1}{2} \exp(-\frac{1}{2} \eta \bar{N}_p)$ | $\frac{1}{2} \exp(-2\eta \bar{N}_p)$ |
| Phase-shift keying (PSK) | $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(2\eta \bar{N}_p)^{1/2}$ | $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\eta \bar{N}_p)^{1/2}$ | $\frac{1}{2} \exp(-\eta \bar{N}_p)$ | — |
| Frequency-shift keying (FSK) | — | $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\frac{1}{2} \eta \bar{N}_p)^{1/2}$ | $\frac{1}{2} \exp(-\frac{1}{2} \eta \bar{N}_p)$ | — |

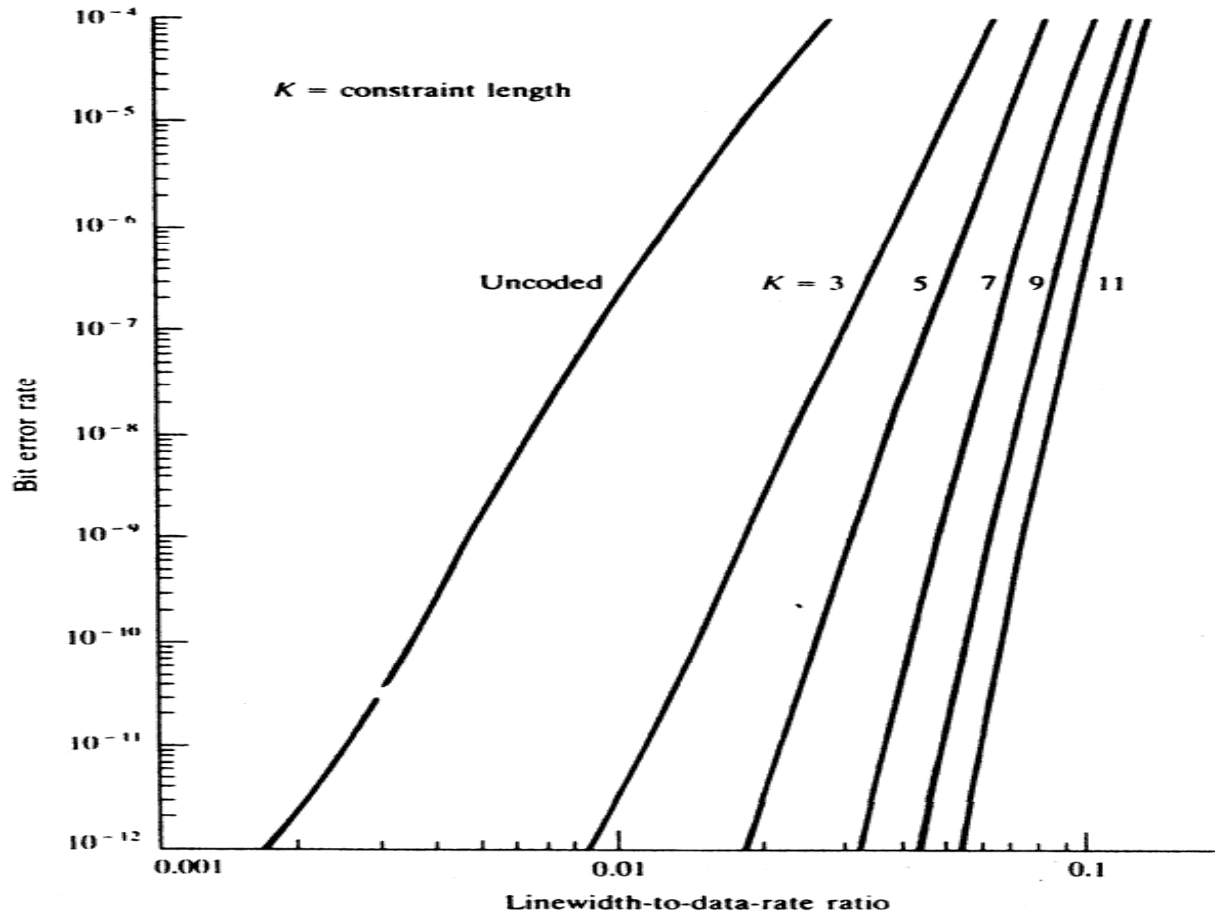
Perbandingan jumlah photon diperlukan utk BER 10^{-9} oleh penerima ideal yg memiliki efisiensi kuantum detektor = 1

| Modulation | Number of photons | | | |
|------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------|
| | Homodyne | Heterodyne | | Direct detection |
| | | Synchronous detection | Asynchronous detection | |
| On-off keying (OOK) | 18 | 36 | 40 | 10 |
| Phase-shift keying (PSK) | 9 | 18 | 20 | — |
| Frequency-shift keying (FSK) | — | 36 | 40 | — |

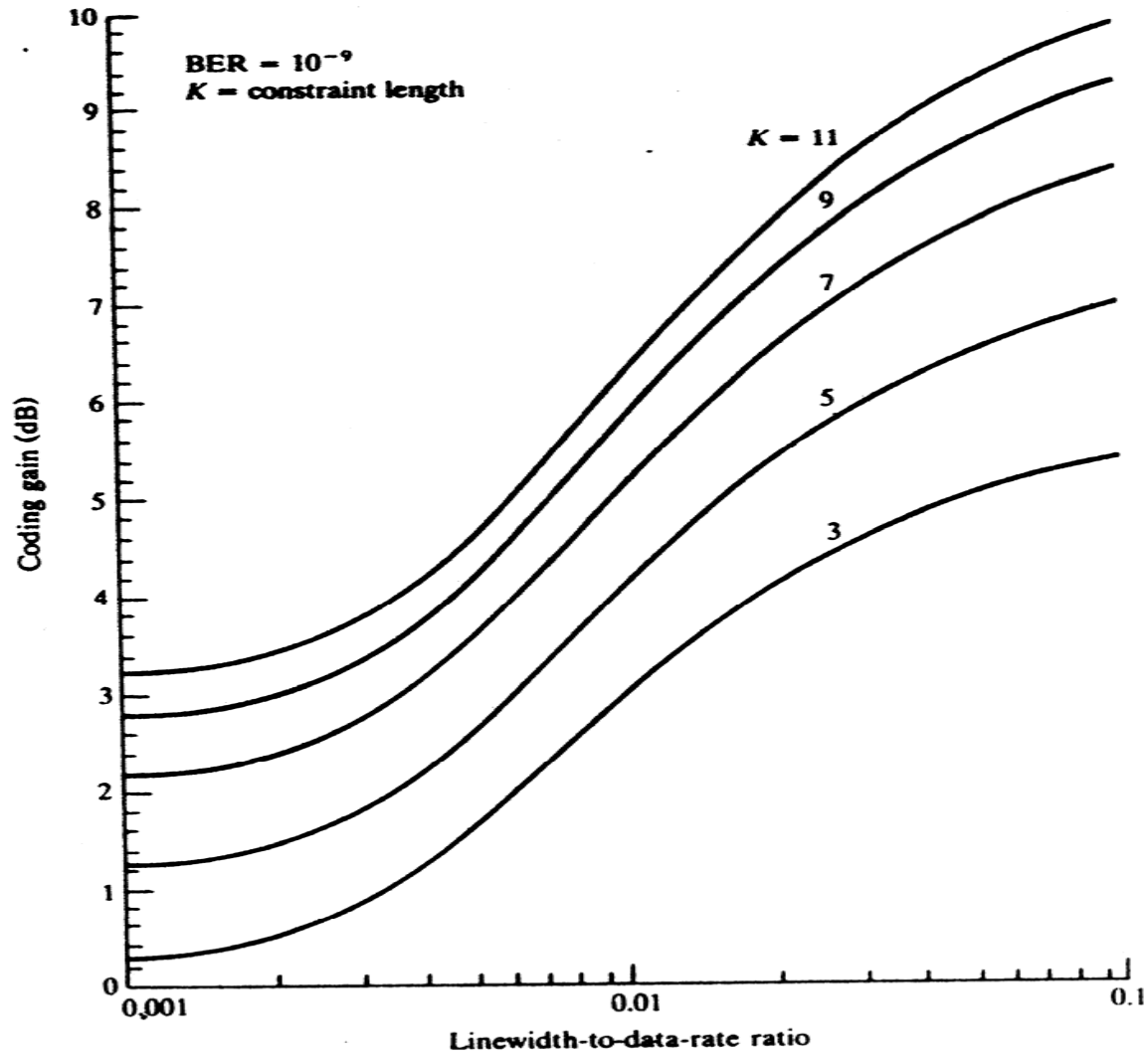


Sensitifitas penerima quantum-limited sbg fungsi laser linewidth pd 1 Gb/s atau ekivalen atau sbg fungsi perbandingan linewidth to bit rate

Peningkatan unjuk kerja dgn pengkodean



Peningkatan BER utk beberapa kode konvolusi pd 30 photon tiap bit data



Penguatan pengkodean thd linewidth utk beberapa kode konvolusi pd BER 10^{-9}