

VAJA 38. - ŠTIRIVALOVNO MEŠANJE V VLAKNU

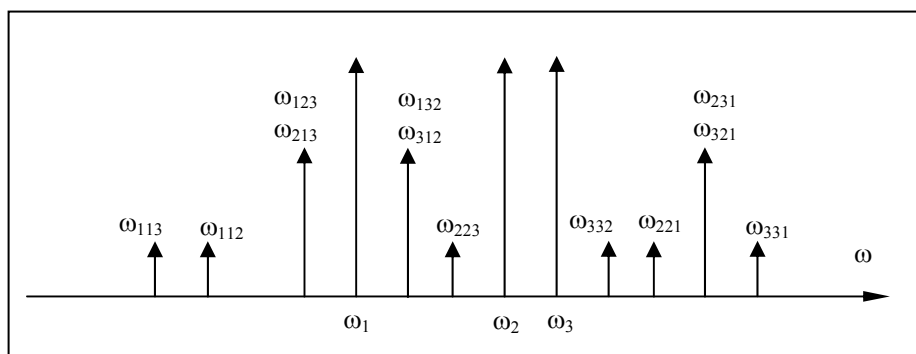
38.1. Štirivalovno mešanje

Štirivalovno mešanje (angl. Four-Wave Mixing – FWM) je nelinearni pojav, pri katerem nastanejo optični mešalni (intermodulacijski) produkti. Pojavlja se, ko močni svetlobni signali dveh ali več različnih frekvenc skupaj potujejo skozi optično vlakno. Glede na število sodelujočih signalov ločimo nedegenerirano (trije signali), delno degenerirano (dva signala) in popolnoma degenerirano štirivalovno mešanje (en signal).

Ko v optično vlakno vstopajo in po njem potujejo trije vhodni optični signali, ki imajo med seboj različne valovne dolžine oziroma frekvence, se pojavlja v njem nedegenerirano štirivalovno mešanje.

Nedegeneriran proces se začne z istosmernim potovanjem valov frekvenc ω_1 in ω_2 skozi optično vlakno. Med potovanjem se optični valovanja seštevata in utripata. Jakostno seštet signal s frekvenco ovojnice $\omega_2 - \omega_1$ modulira jakostno odvisni lomni količnik $n(\omega, S)$ optičnega vlakna in s tem tvori optično mrežico. Ko vstopi v vlakno tretji val s frekvenco ω_3 , se zaradi moduliranega lomnega količnika le-ta fazno modulira s frekvenco $\omega_2 - \omega_1$. Zaradi fazne modulacije ustvari val s frekvenco ω_3 stranske boke na frekvencah $\omega_3 \pm (\omega_2 - \omega_1)$. Amplituda stranskih bokov je sorazmerna amplitudi signala na frekvenci ω_3 .

Na enak način se seštevata signala na frekvenci ω_3 in ω_1 , ki fazno modulirata signal na frekvenci ω_2 . Posledično val ω_2 ustvarja stranske boke na $\omega_2 \pm (\omega_3 - \omega_1)$. Novo nastali mešalni produkt na frekvenci $\omega_2 + (\omega_3 - \omega_1)$ sovpada s prej ustvarjenim signalom na frekvenci $\omega_3 + (\omega_2 - \omega_1)$. Na ta način ugotovimo, da je generiranih 12 novih mešalnih produktov, od katerih trije pari na frekvenčni osi sovpadajo. Torej dobimo 9 novih frekvenc, kot prikazuje slika 38.1.



Slika 38.1. – Splošen primer nedegeneriranega štirivalovnega mešanja z različnim frekvenčnim razmikom.

Proces štirivalovnega mešanja je »resonančen«, ko je izpolnjen pogoj fazne neusklajenosti

$$\Delta\beta = \beta(\omega_{ijk}) - \beta(\omega_i) - \beta(\omega_j) + \beta(\omega_k) = 0.$$

Oziroma, ko so frekvence vseh štirih valov simetrično postavljene relativno druga na drugo

$$\omega_{ijk} + \omega_k = \omega_i + \omega_j.$$

Tu je $\Delta\beta$ fazna neuskklajenost za majhne moči. Konstanta razširjanja za vsak val znaša

$$\beta_{ijk} = \omega_{ijk} \cdot n(\omega_{ijk}) / c,$$

kjer je c hitrost svetlobe v vakuumu.

38.2. Seznam potrebnih pripomočkov

Za izvedbo vaje potrebujemo:

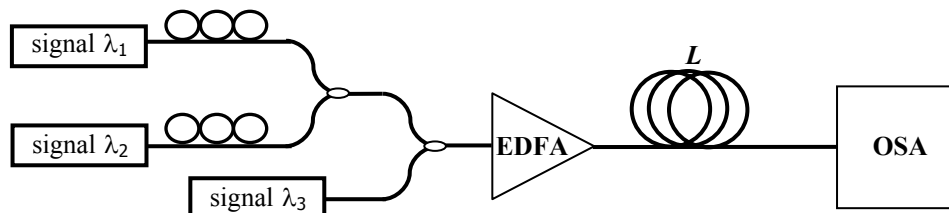
- (1) tri DFB laserje z možnostjo temperaturne regulacije,
- (2) vsaj dva vlakenska nastavljalnika polarizacije,
- (3) EDFA,
- (4) dva vlakenska optična smerna sklopnika,
- (5) dva koluta enakega enorodovnega optičnega vlakna različnih dolžin,
- (6) optični spektralni analizator z uklonsko mrežico.

Razporeditev in vezava merilnih pripomočkov je prikazana na sliki 38.2.

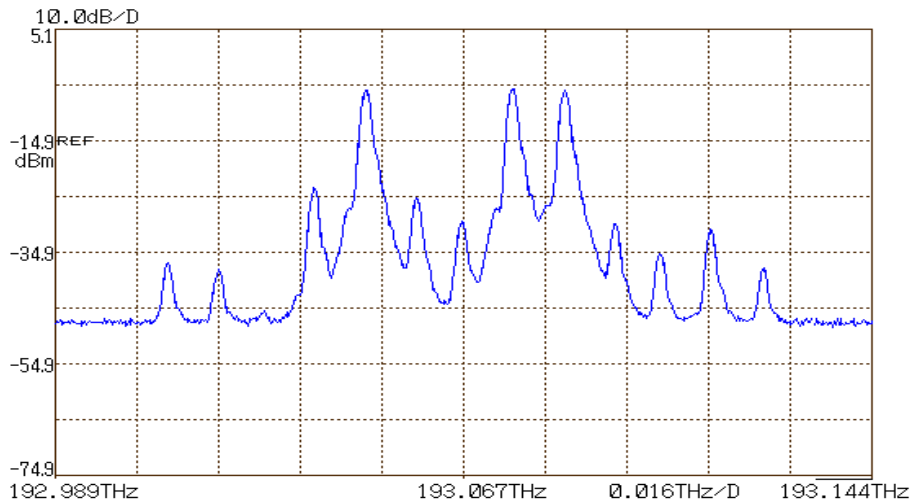
36.3. Obrazložitev in opis poteka vaje

S stališča prenosa optičnega signala je štirivalovno mešanje omejevalni pojav. Med procesom štirivalovnega mešanja se del energije signalov na vhodnih frekvencah pretvori v štirivalovne mešalne produkte. Ta transformacija energije se odraža kot dodatno slabljenje optičnega signala, ki se prenaša po prenosni poti. V WDM sistemih novo generirani signali vnašajo presluh med kanali.

S praktičnim preizkusom s tremi nemoduliranimi viri, katerega merilno vezavo prikazuje slika 38.2, dobimo na optičnem spektralnem analizatorju optični spekter, ki ga prikazuje slika 38.3. S primerjavo slik 38.1 in 38.3 lahko določimo pripadnost posamezne mešalne komponente



Slika 38.2. – Shematski prikaz vezja za preizkus degeneriranega štirivalovnega mešanja v optičnem vlaknu.



Slika 38.3. – Eksperimentalno pridobljen primer štirivalovnega mešanja s tremi optičnimi signali različnih frekvenc.

Ko so polarizacije vseh treh valov popolnoma vzporedne, je moč mešalnega (intermodulacijskega) produkta na koncu vlakna dolžine L enaka

$$P_{\text{FWM}}(L) = \frac{K^2}{9} \cdot (\gamma \cdot L_{\text{eff}})^2 \cdot P_i(0) \cdot P_j(0) \cdot P_k(0) \cdot e^{-\alpha L} \cdot \eta$$

Degeneracijski faktor K zavzame vrednost, ki jo določa število enakih vhodnih frekvenc. Pri nedegeneriranem mešanju je degeneracijski faktor 6, pri degeneriranem mešanju je 3, ko pa so vse tri vhodne frekvence enake, zavzame vrednost ena. Slabljenje vlakna je podano v linearnih enotah in ga je potrebno ustrezno pretvoriti glede na to, da v praksi podajamo slabljenje z enoto dB/km.

$$\alpha [\text{km}^{-1}] = \frac{\ln(10)}{10} \cdot \alpha [\text{dB/km}] = \frac{\alpha [\text{dB/km}]}{10 \cdot \log(e)} \approx \frac{\alpha [\text{dB/km}]}{4,343}$$

L_{eff} predstavlja efektivno dolžino optičnega vlakna

$$L_{\text{eff}} = \frac{(1 - e^{-\alpha L})}{\alpha}$$

Učinkovitost štirivalovnega mešanja (η) z upoštevanjem fazne neusklajenosti $\Delta\beta$ zapišemo kot

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left(1 + \frac{4 \cdot e^{-\alpha L} \cdot \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right)$$

Fazna neusklajenost $\Delta\beta$ je pogoj za veliko učinkovitost štirivalovnega mešanja. Pri popolni fazni neusklajenosti znaša $\Delta\beta$ nič. Pri enakih razmikih med vhodnimi signali znaša fazna neusklajenost

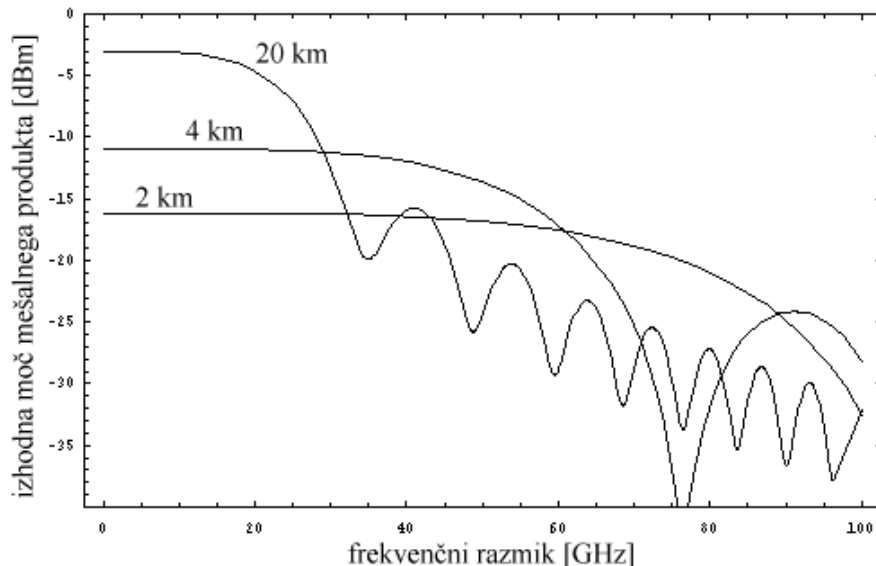
$$\Delta\beta = \frac{\lambda_0^2}{2\pi c} \cdot \Delta\omega^2 \cdot \left[D_c(\lambda) + \frac{\lambda^2}{\pi c} \cdot \left(\frac{2}{\lambda} \cdot D_c(\lambda) + \frac{dD_c(\lambda)}{d\lambda} \right) \cdot \Delta\omega \right]$$

Tu je $D_c(\lambda)$ koeficient disperzije in $dD_c(\lambda)/d\lambda$ disperzijska strmina.

38.4. Prikaz značilnih rezultatov

Za vajo izmeri odvisnost moči produkta štirivalovnega mešanja od frekvenčne razlike med tonskima signaloma za primer delno degeneriranega štirivalovnega mešanja. Rezultat predstavi grafično.

Za doseganje velike učinkovitosti štirivalovnega mešanja mora biti razlika frekvenc med črpalnima signaloma pazljivo izbrana. Ko je frekvenčna razlika majhna, je fazna neuskklajenost blizu nič. To ima za posledico veliko učinkovitost štirivalovnega mešanja. Slika 38.4 prikazuje odvisnost moči mešalnega produkta od frekvenčnega razmika med nosilcema Δf [Hz] za tri različne dolžine optičnega vlakna.



Slika 38.3. – Prikaz odvisnosti moči mešalnega produkta od frekvenčnega razmika med nosilcema.

38.5. Vprašanja in naloge vaje

1. S pomočjo OSA prikaži štirivalovno mešanje s tremi optičnimi signali različnih frekvenc!
2. Določi število mešalnih produktov v primeru dveh, treh, štirih, N-tih vhodnih signalov!
3. Izmeri in nariši odvisnost moči mešalnega produkta od frekvenčnega razmika med nosilcema za vlakno različnih dolžin!
4. Kaj je vzrok za nastanek minimumov v grafu odvisnosti moči mešalnega produkta od frekvenčnega razmika?