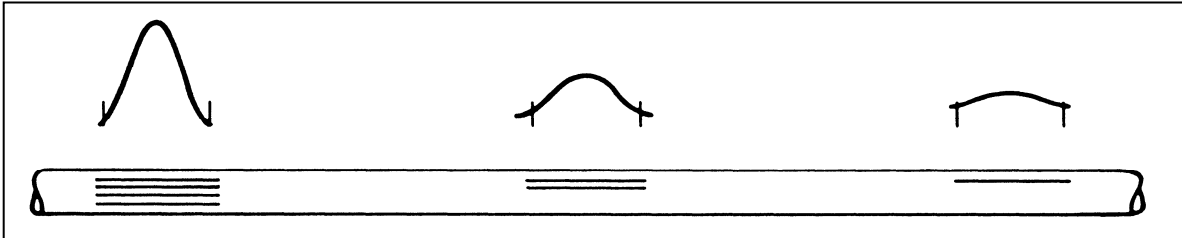


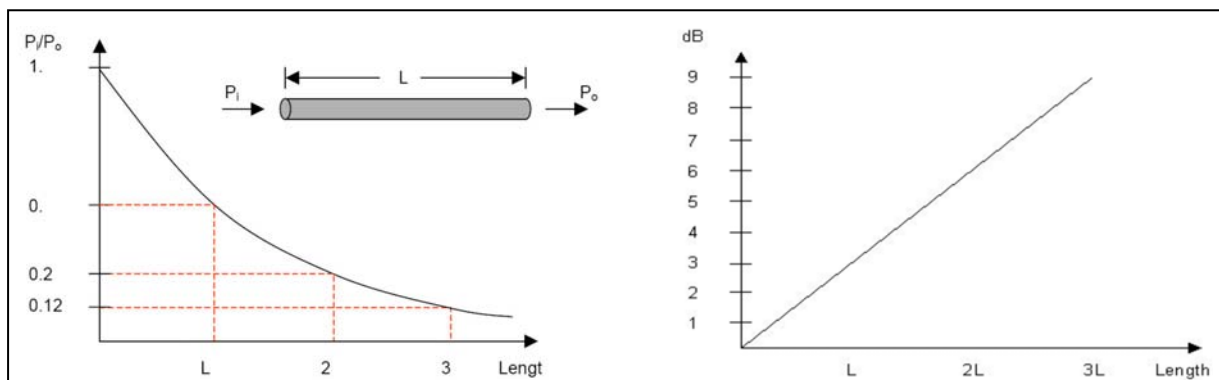
## 8. Slabljenje optičnega vlakna

Za inženirje telekomunikacij, ki želijo optično vlakno uporabljati za prenos svetlobnega signala iz ene lokacije na drugo je vsekakor zanimivo, kako daleč se lahko vodi signal, preden se oslabi do te mere, da ga ni mogoče več detektirati. Svetlobe, ki izstopa iz optičnega vlakna je vedno manj, kot jo je vstopilo, kot prikazuje slika 1. Zmanjšana količina svetlobe je posledica slabljenja optičnega vlakna. Popolni odboj, s pomočjo katerega potuje svetloba po jedru optičnega vlakna, je sicer brez izgub, vendar je medij po katerem potuje svetloba bolj ali manj transparenten.



Slika 1: Slabljenje svetlobnega impulza pri potovanju skozi optično vlakno.

Znesek slabljenja je odvisen od dolžine optičnega vlakna in kot mnogi naravni pojavi eksponentno upada, kar pomeni, da po dolžini enaki odseki optičnega vlakna vedno enako oslabijo optično moč, kot prikazuje slika 2a.



Slika 2: Prikaz slabljenja optičnega vlakna v odvisnosti od dolžine.

Slabljenje je običajno izraženo v logaritmičnih enotah – decibelih (dB), kar je zaznati kot linearno krivuljo (slika 2b). Razmerje vhodne proti izhodni optični moči se računa kot

$$a[\text{dB}] = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{\text{vh}}}{P_{\text{izh}}} \right) \quad (1)$$

Ker nas zanima slabljenje optičnega vlakna določene dolžine, običajno podajamo slabljenje kar na enoto dolžine, največkrat na kilometer.

$$a[\text{dB/km}] \cdot L[\text{km}] = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{\text{vh}}}{P_{\text{izh}}} \right) \quad (2)$$

### Primer:

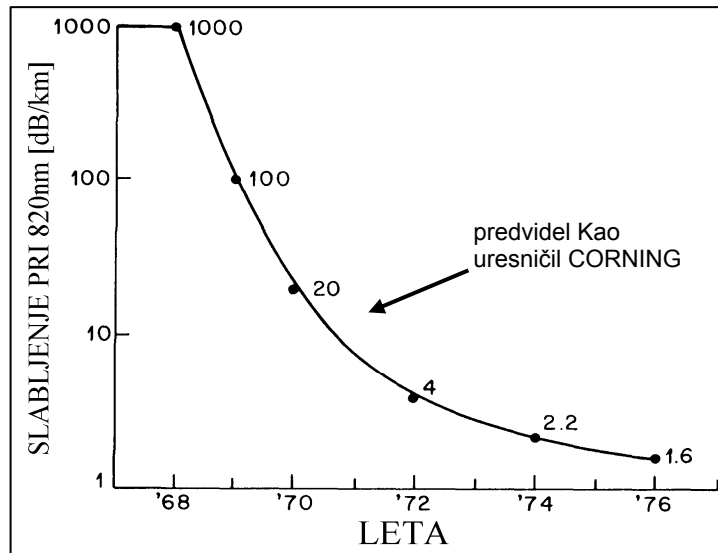
Kolikšen del svetlobne moči izhaja iz 100 km dolgega optičnega vlakna s slabljenjem 0,3 dB/km?

$$\frac{P_{\text{vh}}}{P_{\text{izh}}} = 10^{\frac{L \cdot a[\text{dB/km}]}{10}} = 10^{\frac{100 \text{ km} \cdot 0,3 \text{ dB/km}}{10}} = 1000$$

Preostale svetlobe je  $1/1000 = 0,1\%$

Novejša zgodovina optičnih komunikacije se začne leta 1966. Slabljenje vlakna je takrat zanašalo nekaj 1000 dB/km. V tem času sta pionirja optičnih komunikacij, Angleža K. C. Kao<sup>1</sup> in G. A. Hockham, objavila članek<sup>2</sup>, v katerem sta teoretično predvidela možnost uporabe optičnega vlakna kot prenosnega informacijskega medija, če bi bilo slabljenje le-tega pod 20 dB/km.

Leta 1970 so tehnologi izboljšali slabljenje vlakna iz obstoječih 1000 dB/km na 20 dB/km, kar je bila predvidena meja za začetek optičnih komunikacij. Prvi je to uspelo ameriški firmi Corning, ki je bila do nedavnega ena vodilnih proizvajalcev optičnega vlakna. Izboljšave vlakna so se nato še vrstile in v letu 1976 privedle do 1,6 dB/km pri valovni dolžini 820 nm, kot prikazuje slika 3.



Slika 3: Zgodovinski pregled zmanjševanja slabljenja v optičnem vlaknu.

Kasneje so prišli do ugotovitve, da je mogoče doseči še manjše slabljenje pri večjih valovnih dolžinah. Danes lahko dosega optično vlakno slabljenje zgolj 0,19 dB/km pri izbrani valovni dolžini.

Celotno slabljenje optičnega vlakna je seštevek dveh v vlaknu prisotnih pojavov:

- Rayleighovo sipanje, ki razprši svetlobo, zaradi česar uhaja iz vlakna,
- absorpcija, ki svetlobo pretvarja v toploto.

Tako en kot drugi pojav sta odvisna od valovne dolžine in snovi po katerem svetloba potuje.

Svetloba je vedno kumulativno absorbira za isto količino pri isti valovni dolžini.

#### Primer:

Vzemimo, da absorpcija svetlobe znaša 1% na centimeter. Izračunaj za koliko procentov se oslabi svetloba po prehodu 1 m.

$$\text{Preostala svetloba} = (1 - \alpha)^L = (1 - 0,01)^{100} = 0,366 = 36,6\%$$

<sup>1</sup> Prof. K. C. Kao je za dosežke na področju optičnih komunikacij leta 2009 dobil Nobelovo nagrado.

<sup>2</sup> K. C. Kao in G. A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies", Proc. IEE, Vol.113, No.7., July 1966.

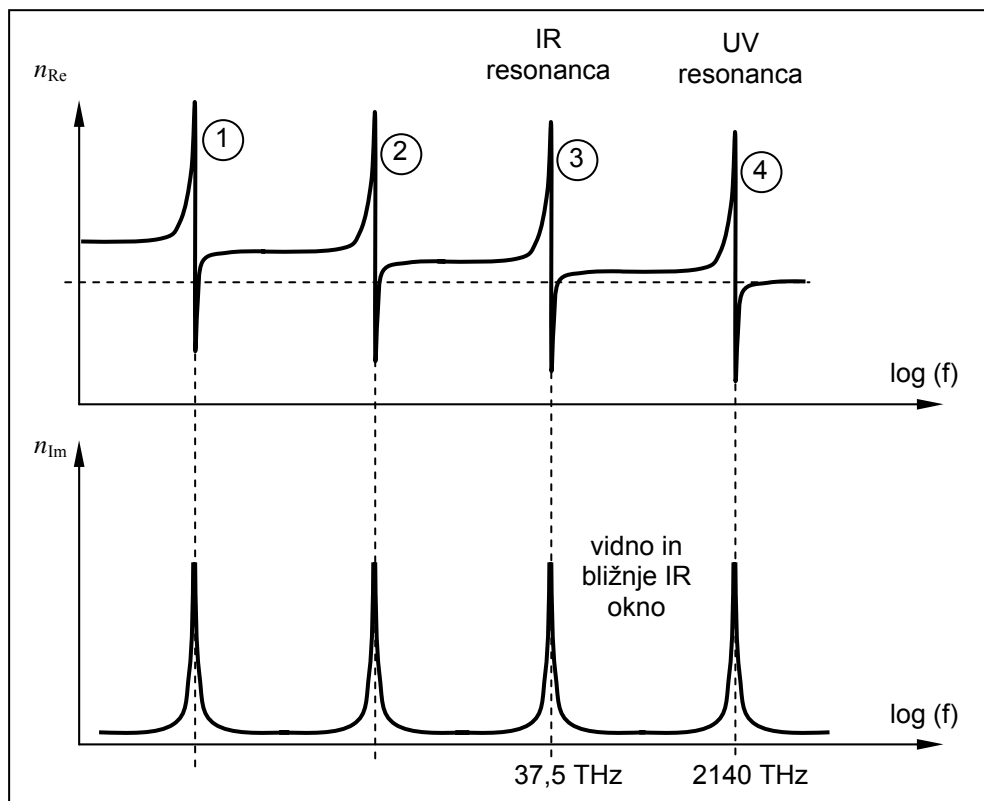
## 8.1. Absorpcijsko slabljenje

Lomni količnik vsake snovi ima odvisnost od valovne dolžine oziroma frekvence, ki potuje skozi to snov. Za primer zraka lahko povemo, da ima v območju radijskih valov zrak lomni količnik približno 1,0003. Za svetlobo pa znaša lomni količnik zraka približno 1,00015.

Lomni količnik je sestavljen iz realnega in imaginarnega dela.

$$n = n_{\text{Re}} + jn_{\text{Im}} \quad (3)$$

Realni lomni količnik pomeni zakasnitev valovanja, ki potuje skozi snov. Imaginarni lomni količnik pomeni za valovanje izgube. Ob resonancah pride do povečanja obeh komponent lomnega količnika, kar pomeni, da se povečajo izgube in zakasnitev valovanja. Za primer stekla resonance prikazuje spodnja slika 4.



Slika 4: Zgodovinski pregled zmanjševanja slabljenja v optičnem vlaknu.

Pri ultravijolični resonanci nastopi ultravijolična absorpcija, pri kateri se delček energije svetlobnega vala porablja za to, da se z interakcijo foton-elektron dvignejo elektroni iz valenčnega v prevodni energijski pas. Kisikovi ioni kremenovega stekla imajo energijsko razliko 8,90 eV med pasovoma, tako, da so za interakcijo potrebni fotoni z valovno dolžino  $\lambda=0,14 \mu\text{m}$ . Pri tej valovni dolžini se zato pojavlja resonančni vrh ultravijoličnega slabljenja. Sled tega resonančnega slabljenja sega tudi v bližnje ultravijolično področje vlakna. To slabljenje je v kremenovem steklu najmanj pomembno in ga zato v spektralnem pasu kremenovega stekla lahko zanemarimo.

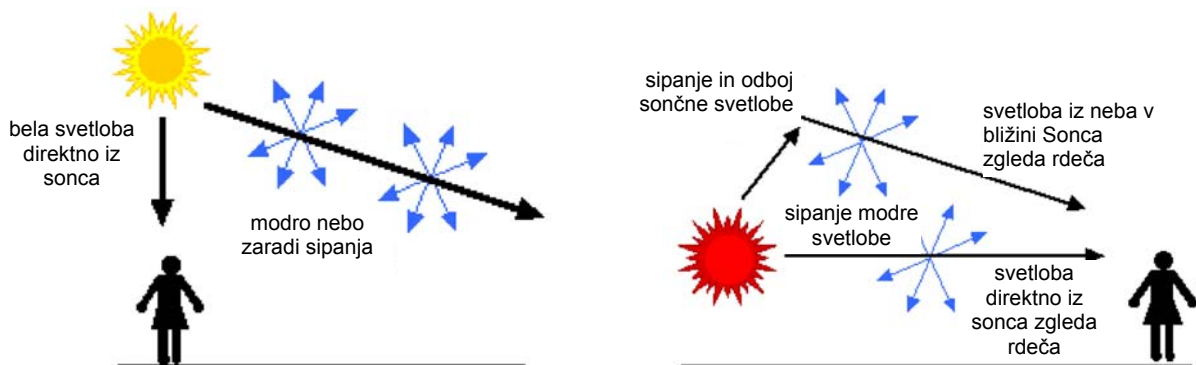
Pri infrardeči resonanci nastopi infrardeča absorpcija, ki je pojav, pri katerem se z interakcijo foton-fonon prenese delček energije svetlobnega vala v vibracijo molekul kremenovega stekla. Pojav je izrazito resonančen in ima vrh pri  $\lambda=8 \mu\text{m}$ . Sled tega slabljenja ravno še oplazi bližnje infrardeče področje vlakna in ga dejansko omejuje proti daljšim valovnim dolžinam. To pojasnjuje zakaj je kremenovo vlakno neustrezno v daljnem infrardečem področju.

## 8.2. Rayleighovo slabljenje

Rayleighovo slabljenje je dobilo ime po Angleškemu fiziku lordu John-u Rayleigh-u, ki je odkril fizikalni pojav razpršitve svetlobe na molekulah medija po katerem potuje svetloba.

Lord Rayleigh je svoje odkritje osnoval na opazovanju atmosferskih pojavov. V vidnem delu svetlobnega spektra je svetloba z najkrajšo valovno dolžino vijolična oziroma modra. Ker se ta svetloba najbolj sipa na molekulah v atmosferi, vidijo naše oči nebo modre barve. Zelo malo rdeče, oranžne in rumene barve je deležne slabljenju atmosfere, zato Sonce vidimo rumeno. V času, ko je Sonce tik nad horizontom, pa se večino modre svetlobe sipa in Sonce vidimo rdeče barve.

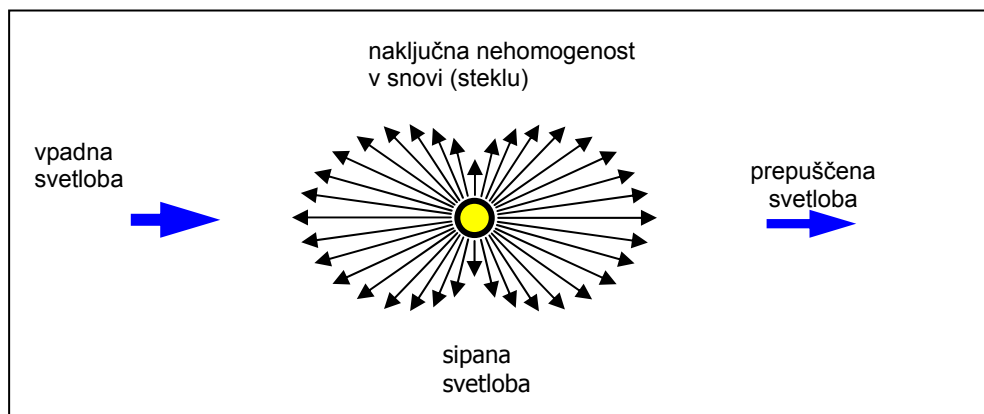
Za razliko od Rayleighovega sipanja poznamo tudi **Mievo sipanje**, ki povzroča belo barvo oblakov. Vodne kapljice v oblaku s polmerom približno 20  $\mu\text{m}$  so dovolj velike, da sipajo vse valovne dolžine vidne svetlobe bolj ali manj enako. To pomeni, da bo skoraj vsa svetloba, ki vstopi v oblak, razpršena. Ker so sipane vse valovne dolžine, vidimo oblake bele barve. Ko so oblaki zelo debeli, prehaja skozi njih vse manj vstopne sončne svetlobe, kar daje oblaku črno barvo.



Slika 5: Sipanje svetlobe na atmosferi.

Rayleighovo sipanje je polarizacijsko odvisno, zato fotografi pri fotografiranju neba uporabljajo polarizator. S tem zgloda nebo modrejše kot, če ga opazujemo s prostimi očmi.

Podobno kot v atmosferi je tudi pri potovanju skozi optično vlakno svetloba deležna Rayleighovega sipanja. Pri tem se del svetlobe sipa na naključnih nehomogenostih stekla, kot prikazuje slika 6. Sipana svetloba po večini izhaja iz optičnega vlakna.



Slika 6: Rayleighovo sipanje na nehomogenosti v steklu.

Za razliko od loma in odboja, kjer se svetlobno valovanje po pojavu odbije samo v eno smer, se pri sipanju razprši svetloba v vse smeri. Sipanje svetlobe se vrši na naključno porazdeljenih delcih (molekulah) snovi, ki je v našem primeru steklo.

Rayleighovo sipanje je selektivni pojav pri katerem imajo delci snovi lastnost, da bolj učinkovito sipajo svetlobo izbrane valovne dolžine. Običajno je tako, da se svetloba krajših valovnih dolžin bolj sipa kot svetloba daljših valovnih dolžin.

Z naraščanjem valovne dolžine Rayleighovo slabljenje optičnega vlakna pada s četrto potenco.

$$a[\lambda] \propto \lambda^{-4} \quad (4)$$

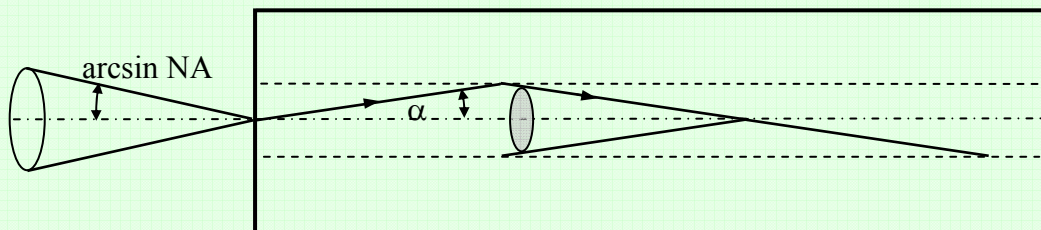
**Primer:**

Stekleno optično vlakno ima pri valovni dolžini  $\lambda_1=1,3 \mu\text{m}$  slabljenje  $a_1=0,3 \text{ dB/km}$ . Ocenite slabljenje istega vlakna  $a_2$  pri valovni dolžini  $\lambda_2=850 \text{ nm}$ , če upoštevamo, da je glavni vzrok slabljenja v obeh slučajih Rayleigh-ovo sipanje svetlobe na nehomogenostih v steklu!

$$a_2 = a_1 \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^4 = a_1 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 = 0,3 \text{ dB/km} \cdot \left( \frac{1,3 \mu\text{m}}{0,85 \mu\text{m}} \right)^4 = \underline{\underline{1,64 \text{ dB/km}}}$$

**Primer:**

Po enorodovnem svetlobnem vlaknu z numerično aperturo  $NA=0,1$  in lomnim količnikom jedra  $n_{\text{jedra}} \approx 1,5$  potuje svetlobni signal, ki je deležen Rayleighovega sipanja. Kolikšen delež sipane svetlobe (v %) se odbije nazaj proti izvoru, ob predpostavki, da se sipa svetloba enakomerno v vse smeri?!



Numerična odprtina vlakna je definirana kot sinus vstopnega kota.

$$NA = \sin \alpha_0 \quad \alpha_0 = \arcsin NA = 5,74^\circ$$

Iz Snell-ovega lomnega zakona pri vstopu svetlobe iz zraka v vlakno dobimo

$$\frac{\sin \alpha_0}{n_{\text{jedra}}} = \frac{\sin \alpha}{n_{\text{zraka}}}$$

Ker je lomni količnik zraka približno 1, se kot lomljen kot  $\alpha$  izračuna iz

$$\alpha = \arcsin \frac{NA}{n_{\text{jedra}}} = \arcsin \frac{0,1}{1,5} = \underline{\underline{3,82^\circ}}$$

Lomljen kot  $\alpha$  predstavlja prostorski kot

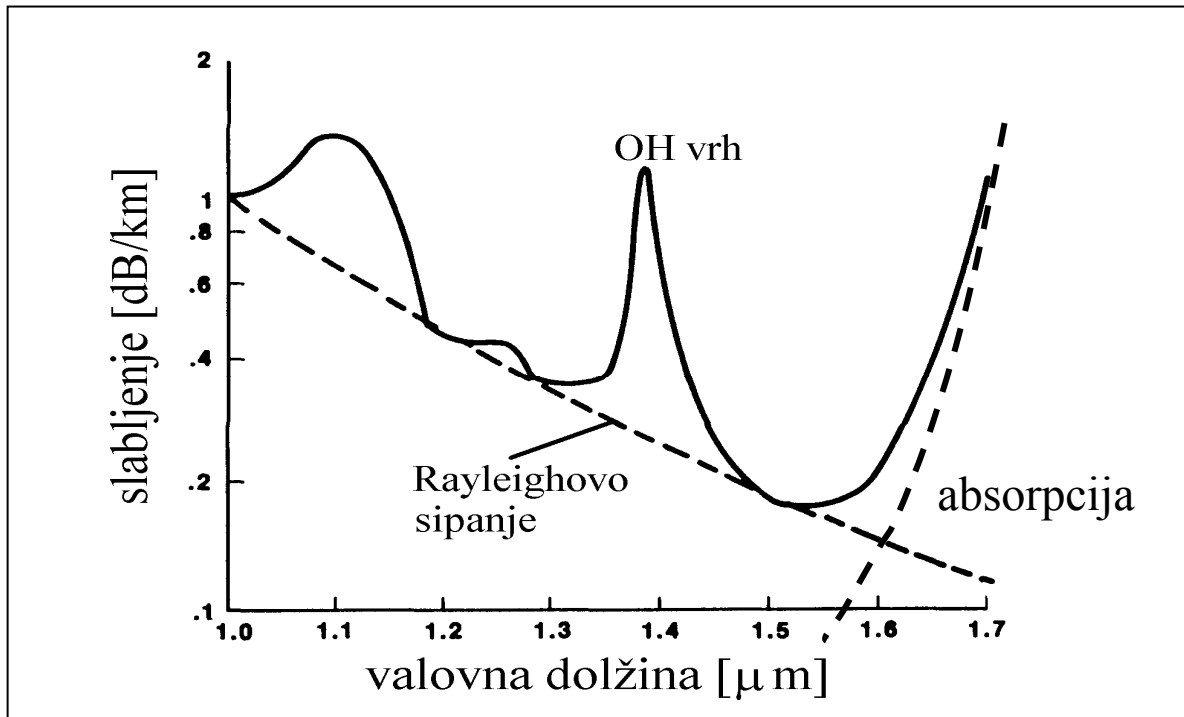
$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) = 2\pi(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}) = 2\pi \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{NA}{n_{\text{jedra}}} \right)^2} \right) = 2\pi \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{0,1}{1,5} \right)^2} \right) = 0,014 \text{ srd}$$

V primerjavi s polnim prostorskim kotom  $4\pi$  predstavlja odbiti delež svetlobe

$$\frac{\Omega}{4\pi} \cdot 100\% = 0,1\%$$

Z naraščanjem valovne dolžine slabljenje optičnega vlakna pada in teoretično lahko pride do izredno nizkih slabljenj pri visokih valovnih dolžinah. V praksi pa se pri večjih valovnih dolžinah pojavi absorpcija svetlobe v steklu.

Minimalno slabljenje optičnega vlakna nastopi pri valovni dolžini 1550 nm in to je tudi razlog za nastanek tretjega spektralnega okna v optičnih komunikacijah.



Slika 7: Skupno slabljenje enorodnega kremenovega vlakna  $\text{SiO}_2$  in spektralna odvisnost posameznih sestavin slabljenja (ultravijolično, infrardeče, Rayleighovo).

**Primer:**

Za signal valovne dolžine  $\lambda=1550$  nm znaša slabljenje optičnega vlakna  $a=0,2$  dB/km. Določi koliko procentov svetlobe pride na konec 100 km dolgega vlakna!

$$a[\text{dB}] = \ell \cdot a[\text{dB/km}] = 100 \text{ km} \cdot 0,2 \text{ dB/km} = 20 \text{ dB slabljenja}$$

$$\frac{P_{izh}}{P_{vh}} = 10^{-\frac{a[\text{dB}]}{10}} = 10^{-2} = 0,01 = \underline{\underline{1\%}}$$

### 8.3. Tehnološko slabljenje

Opisanim trem osnovnim pojavom slabljenja, ki so značilnost osnovnega materiala in njegovih primesi, se pridružuje še vrsta drugih pojavov slabljenja, ki so bolj ali manj povezani s tehnološkim postopkom pri izdelavi vlakna ter pripravi le-tega. Medtem ko slabljenja iz prve skupine ni mogoče zmanjševati drugače kot z izbiro novih materialov, pa slabljenje druge skupine lahko bistveno zmanjšamo z izpopolnjevanjem tehnološkega postopka in upoštevanjem izkušenj pri uporabi vlaken. Tehnološko slabljenje nastane zaradi prisotnosti OH ionov, napak v strukturi stekla ali valovoda, krivin oziroma mikrokrivin ter nenazadnje zaradi stičnega slabljenja, ki je bilo obravnavano v prejšnjem poglavju.

#### 8.3.1 Slabljenje ionov OH

Prisotnost vlage v steklu v obliki ionov OH lahko povzroči močno resonančno slabljenje, imenovano hidroksilno slabljenje. Osnovni vrh tega slabljenja se pojavlja pri  $\lambda=2,73 \mu\text{m}$ . Harmonski in kombinacijski vrhovi v spektralnem področju kremenovega vlakna so pri  $\lambda=0,95 \mu\text{m}$ ,  $\lambda=1,25 \mu\text{m}$  in  $\lambda=1,4 \mu\text{m}$ . Najbolj značilen vrh je pri 1400 nm, ki ločuje drugo in tretje spektralno okno. Pri zelo nizki koncentraciji upade hidroksilno slabljenje na zanemarljivo vrednost in s tem se celotno bližnje infrardeče področje zlije v eno samo široko prenosno »okno« od 1  $\mu\text{m}$  do 1,7  $\mu\text{m}$ . Danes je tehnološko že mogoče izdelati vlakno, ki nima tega OH absorpcijskega vrha. Potek slabljenja prikazuje slika 6. Tovrstno vlakno je standardizirano z ITU-T standardom G.652.C in G.652.D.

	Z OH vrhom	Brez OH vrha
Visok PMD	G.652.A	G.652.C
Nizek PMD	G.652.B	G.652.D

Slika 8: Slabljenje enorodovnega vlakna z odpravljenim absorpcijskim OH vrhom.

#### 8.3.2. Slabljenje zaradi napak v strukturi stekla

Strukturne napake stekla, kot na primer manjkajoči atomi in koncentracija skupine atomov normalno ne povzročajo visokega slabljenja. Pod vplivom jedrskega sevanja pa se lahko strukturne napake stekla toliko pomnožijo, da se slabljenje bistveno poveča in vlakno postane neuporabno. Občutljivost na jedrsko sevanje je ena od pomanjkljivosti kremenovega stekla.

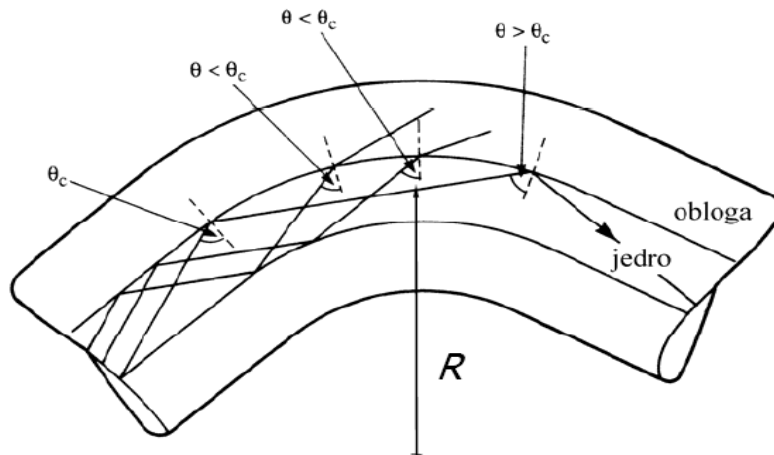
#### 8.3.3. Slabljenje zaradi nepopolnosti v valovodni strukturi

Povzročitelji valovodne nepopolnosti so lahko prisotnost zračnih mehurčkov v steklu, ki razpršujejo polje, končna debelina obloge zaradi katere uhaja delček moči v zaščitni plašč vlakna in nepravilna geometrija jedra. Valovodna nepopolnost ima za posledico dodatno valovodno slabljenje. Še večji vpliv pa ima na polarizacijsko rodovno disperzijo (opis v naslednjem poglavju).

#### 8.3.4. Slabljenje na krivini vlakna

Ujet žarek se širi po vlaknu in tudi prispe do cilja bolj ali manj oslabljen v odvisnosti od slabljenja vlakna, ki znaša pri valovni dolžini 1550 nm približno 0,2 dB/km. Na prenosni poti pa se lahko pojavi še slabljenje na krivinah optičnega vlakna.

Če vlakno ukrivimo tako, da ima krivinski radij R, lahko pride pri močni ukrivitvi do zelo izrazitega slabljenja.



Slika 9: Uhanjanje žarka na krivini v zunanost vlakna.

Zaradi izredno položnega kota pri totalnem odboju na mejo med jedrom in oblogo vlakna se lahko zgodi, da po upognitvi vlakna niso več izpolnjeni pogoji za popolni notranji odboj na zunanji krivini vlakna. To pomeni, da žarek uhaja iz jedra, vlakno seva v okolico, val v vlaknu pa se močno oslabi.

Svetlobni žarek, ki pride do krivine optičnega vlakna, ima vpadni kot manjši od kota za totalni odboj, kar pomeni, da uide v oblogo in je za nas izgubljen. Žarki, ki vpadejo na krivino pod še ustrežajočim kotom, lahko obidejo ukrivljenost.

Pojav uhanjanja dela optične moči na krivinah je še posebno izrazit pri šibkolomnih valovodih, kjer je razlika med lomnim količnikom jedra  $n_2$  in obloge  $n_1$  razmeroma majhna. Pri vlaknih je vsekakor pomemben minimalni krivinski radij, ki znaša približno 25 mm. To je krivinski radij, pri katerem bo svetloba začela uhajati iz optičnega vlakna. Krivinsko slabljenje je sicer odvisno od točne notranje izvedbe dielektričnega valovoda.

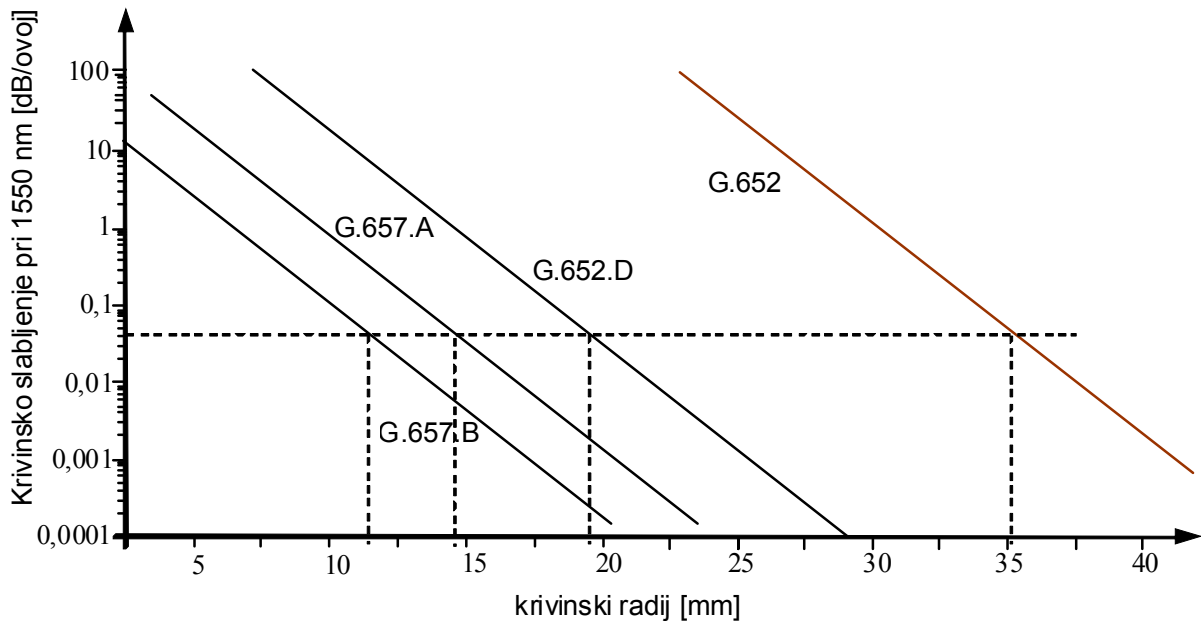
Krivinski radij, pri katerem se optično vlakno trajno deformira, pa je še za desetkrat manjši od radija, pri katerem pride do krivinskega slabljenja. Torej znaša le nekaj mm.

Pri vgradnji optičnih vlaken moramo zato vedno paziti, da vlaken mehansko ne obremenimo na tak način, ki bi povzročal krivine z majhnim polmerom.

Krivine ne vnašajo samo slabljenja, temveč povečujejo polarizacijsko disperzijo, ki je pomemben omejevalni dejavnik pri prenosnih sistemih z visoko bitno hitrostjo.

Pri inštalacijah vlakna na dostopovnih omrežjih je nizko krivinsko slabljenje pomemben parameter, zato so pri ITU-T osnovali standard G.657 za vlakno z nizkim krivinskim slabljenjem. Podstandard G.657.A je za vlakno, ki je kompatibilno z vlaknom G.652.D. Vlakno G.657.B je namenjeno uporabi v zgradbah in ne izraža potrebe po kompatibilnosti z standardom G.652. G.657.B je tipično vlakno z majhnim premerom jedra (do  $6,3 \mu\text{m}$ ) in stopničastim lomnim likom.



**Primer:**

V standardu za enorodovno vlakno G.657A je za krivinsko slabljenje pri 1550 nm naveden podatek maksimalnega slabljenja 0,75 dB/ovoj vlakna s premerom ovoja 10 mm. Koliko mW moči dobimo na izhodu štirih ovojev, če v vlakno pošljemo svetlobni signal moči 0 dBm?

$$P_{izh} = P_{vh} - 0,75 \text{ dBm} \cdot 4 = -3 \text{ dBm}$$

$$P_{izh} = 10^{\frac{P_{izh}}{10}} = 0,5 \text{ mW}$$

**8.3.5. Slabljenje na mikrokrivinah**

Mikrokrivine so naključna periodična odstopanja osi vlakna od normalnega ravnega položaja. Čeprav so odstopanja majhna, se lahko pojavljajo lokalne krivine s polmerom nekaj milimetrov, ker je kratka tudi perioda. Mikrokrivine nastanejo pri kabriranju vlakna, ko zaščitni ovoj (plašč) pritiska prečno na vlakno in ga malenkost naguba.

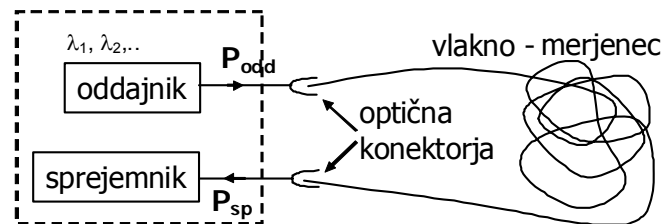
Slabljenje na mikrokrivinah mnogorodovnega vlakna ima vrednost tipično pod 0,2 dB/km. Slabljenje enorodovnega vlakna ima izrazito odvisnost od valovne dolžine in lahko tudi znatno vrednost. Pri valovnih dolžinah blizu zaporne valovne dolžine pa postane nepomembno. Slabljenje je manjše, če ima vlakno zadostno numerično aperturo (zadostno razliko lomnih količnikov), tako da je polje čvrsto ujeto v vlakno.

## 8.4. Meritev slabljenja optičnega vlakna

### 8.4.1. Optični multimeter

Slabljenje optičnega vlakna najenostavneje izmerimo tako, da si pomagamo z optičnim merilnikom moči, ki ga priključimo na en konec optičnega vlakna. Pri tem na drugem koncu pošljemo v vlakno optični signal znane konstantne moči. V kolikor moč oddajnika ne poznamo, ga moramo pred začetkom povezati direktno na sprejemnik brez merjenca in izmeriti izhodno moč.

Optični oddajnik in sprejemnik sta lahko tudi v istem ohišju, kot prikazuje spodnja slika, čeprav tovrstna izvedba ni najbolj praktična za terensko delo.



Slika: Merjene slabljenja optičnega vlakna s preprostim optičnim virom in merilnikom moči.

Iz razlike med oddano in sprejeto optično močjo izračunamo slabljenje vlakna.

$$\text{Slabljenje}(\lambda)[\text{dB}] = P_{\text{oddana}}(\lambda)[\text{dBm}] - P_{\text{sprejeta}}(\lambda)[\text{dBm}]$$

Meritve so lahko izvedene pri eni ali več valovnih dolžinah, odvisno od tega, kakšne optične oddajnike imamo na razpolago. Vendar je možno izvesti meritev pri eni sami valovni dolžini na enkrat.

Meritev je zelo preprosta, vendar je njena slabost v tem, da potrebujemo oba konca optičnega vlakna na istem mestu. Pri optičnih zvezah sta konca vlakna lahko več kilometrov narazen. V tem primeru potrebujemo komunikacijsko zvezo med oddajnikom in sprejemnikom.

### 8.4.2. Optični spektralni analizator

Standard G.650 priporoča za merjenje slabljenja optičnega vlakna merilno metodo pri kateri moramo imeti oba konca vlakna na istem mestu. Takoj vodimo, da je tovrstna metoda bolj primerna za laboratorijsko testiranje optičnih elementov ali vlakna kot pa za terenske meritve že položenega vlakna.

Za to metodo obstajata dve izvedbi merilne vezave, pri čemer ena uporablja nastavljen laser in kalibriran merilnik moči, druga pa širokospektralni vir svetlobe in optični spektralni analizator. V obeh primerih dobimo kot rezultat spektralno odvisnost slabljenja optičnega vlakna.

V primeru, ko imamo znano dolžino optičnega vlakna, lahko izrišemo graf odvisnosti slabljenja na kilometer dolžine v odvisnosti od valovne dolžine.

Pred začetkom meritve je nujna kalibracija, ki jo izvedemo tako, da svetlobni izvor povežemo direktno na detektor. Na ta način odpravimo vse morebitne vplive slabljenja priključnih vrvic ter spremembo izhodne moči optičnega izvora preko celotnega spektralnega merilnega področja.

### 8.4.3. Optični reflektometer v časovnem prostoru

Za meritev optične zveze je najbolj zaželen merilni postopek s katerim je mogoče izmeriti optično vlakno v vkopnem kablu z dostopom na enem samem koncu. Takšno meritev imenujemo reflektometriška meritev. Izvedemo jo tako, da na enem koncu v vlakno pošljemo znan signal in opazujemo, kaj se po določenem času zaradi različnih odbojev vrne na isti konec vlakna.

Pri reflektometriški meritvi v časovnem prostoru v vlakno pošljemo časovno kratek impulz svetlobe. Svetlobni impulz se odbije predvsem na odprtem koncu vlakna in na konektorskih spojih. Precej

slabotnejše je Rayleigh-ovo sipanje svetlobe v steklu vzdolž celotne dolžine vlakna. Odboji na zvarih so običajno zanemarljivo majhni, vendar tudi opazni.

**Primer:**

Izračunajte dolžino optičnega vlakna, če oddani impulz pripotuje nazaj od prostega konca po  $\Delta t = 500 \mu\text{s}$ !

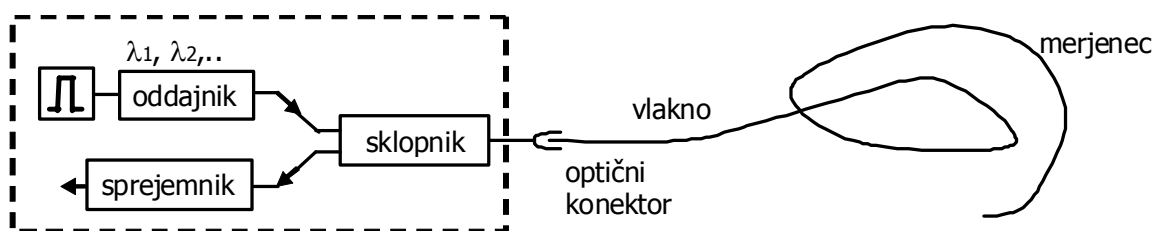
$$L = \frac{c_0}{n} \frac{\Delta t}{2} = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 250 \mu\text{s} = 50 \text{ km}$$

**Primer:**

Koliko je ločljivost OTDR merilnika, če na zaslonu lahko razločimo dva impulza, ki sta med seboj razmaknjena za  $\Delta t = 10 \text{ ns}$ ?

$$L = \frac{c_0}{n} \Delta t = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 10 \text{ ns} = 2 \text{ m}$$

Ustrezen merilnik, ki vsebuje oddajnik optičnih impulzov, smerni sklopnik, optični sprejemnik in prikazovalnik rezultata meritve, imenujemo optični reflektometer v časovnem prostoru ali OTDR (angl. Optical Time-Domain Reflectometer).



Slika: Optični reflektometer v časovnem prostoru.

Sprejemniški detektor mora biti dovolj občutljiv, saj so odboji slabotni. Najmočnejši odboj nastane na prostem koncu vlakna na meji med steklom in zrakom. Odboji na dobrih konektorjih so majhni. Najslabotnejše pa je Rayleighovo sipanje svetlobe, saj predstavlja glavni mehanizem izgub kakovostnih optičnih vlaknih, ki ga skušamo čim bolj zmanjšati z izbiro primerne valovne dolžine svetlobe. Od celotne sipane moči se je večji delež razprši izven vlakna in le manj kot 1 % sipane moči se "ujame" nazaj v optični valovod.

**Primer:**

Izračunajte za koliko dB oslavljen signal se odbije od konca optičnega vlakna (meja steklo-zrak).

$$\Gamma = \frac{n-1}{n+1} = \frac{1,5-1}{1,5+1} = \frac{0,5}{2,5} = 0,2$$

$$|\Gamma|^2 = |0,2|^2 = 0,04 = 4\%$$

$$\alpha = 10 \cdot \log(|\Gamma|^2) = -14 \text{ dB}$$

V reflektometer v časovnem prostoru zato vgradimo laser s čim večjo izhodno močjo, vendar je ta omejena s konstrukcijo polprevodniškega laserja in nastopom nelinearnih pojavov v samem vlaknu pri močeh 10 do 100 mW.

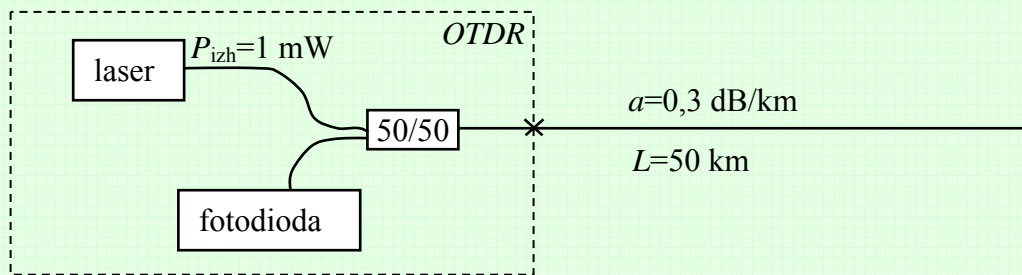
Povraten signal je po detekciji analiziran s pomočjo signalnega procesorja in prikazan v logaritemski skali. Ker se Rayleighovo sipanje vzdolž vlakna ne spreminja, lahko iz naklona krivulje v logaritemski skali enostavno določimo slabljenje zveze.

Posamezne odbite signale ločimo med sabo po času prihoda v sprejemnik, saj mora vsak signal preteči najprej pot od oddajnika do točke odboja in se potem po isti poti vrniti nazaj. Iz izmerjenega časa med oddajo impulza in sprejemom odboja lahko potem izračunamo mesto nepravilnosti ali položaj napake vzdolž vlakna. Pri tem ne smemo pozabiti, da je svetlobna hitrost v vlaknu za lomni količnik vlakna  $n$  manjša od hitrosti svetlobe v praznem prostoru. V OTDR merilnik moramo iz tega razloga vedno vpisati lomni količnik jedra optičnega vlakna, ki znaša pri standardnem enorodovnem vlaknu 1,451.

Glavna omejitev optičnega reflektometra je uporaben domet, saj mora signal reflektometra isto pot prepotovati dvakrat. Pri določanju dometa ne smemo pozabiti niti na izgube v smernem sklopniku. Ker je smerni sklopnik recipročen sestavni del, znašajo te izgube najmanj 6dB (3dB na oddaji in še 3dB na sprejemu).

#### Primer:

OTDR merilnik ima laser z valovno dolžino  $\lambda_0=1300$  nm, ki daje na izhodu moč signala  $P_{izh}=1$  mW. Na izhod merilnika priključimo enorodovno optično vlakno dolžine  $L=50$  km, ki ima pri valovni dolžini 1300 nm slabljenje  $a=0,3$  dB/km. Na prostem koncu optičnega vlakna ( $n=1,5$  za steklo) imamo ravno brušen optični konektor. Koliko naj pri valovni dolžini 1300 nm znaša občutljivost sprejemniške fotodiode v OTDR, da še lahko detektiramo povratni signal? Pri računanju upoštevajte tudi delilno razmerje 50:50 za optični sklopnik v OTDR merilniku.



$$P = 0 \text{ dBm} - 3 \text{ dB} - 2L\alpha - 14 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = -50 \text{ dBm}$$

Ker je vršna moč laserja omejena, se domet reflektometra manjša s krajšanjem impulzov. S krajšanjem impulzov se ob nespremenjeni vršni moči laserja manjša energija signala, s katero razpolagamo za meritve. Hkrati se s krajšanjem impulza večja zahtevana pasovna širina in s tem šum sprejemnika. Izdelava zelo kratkih svetlobnih impulzov pa ni enostavna.

#### Primer:

Izračunajte povečanje dometa  $\Delta l=?$  (v kilometrih) merilnika OTDR, če povečamo širino svetlobnih impulzov iz  $t_1=1$   $\mu\text{s}$  na  $t_2=5$   $\mu\text{s}$ ! Laser merilnika deluje v obeh primerih z isto vršno močjo  $P_0=1$  W na valovni dolžini  $\lambda=1550$  nm. Povprečno slabljenje optičnega kabla vključno s številnimi zvari znaša  $a=0,22$  dB/km. ( $c=3 \cdot 10^8$  m/s).

$$\Delta W_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{W_2}{W_1} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_0 \cdot t_2}{P_0 \cdot t_1} = 10 \cdot \log_{10} \frac{5 \mu\text{s}}{1 \mu\text{s}} = 7 \text{ dB}$$

Signal se slabi v obe smeri, zato moramo slabljenje vlakna upoštevati dvakrat.

$$\Delta l = \frac{\Delta W_{\text{dB}}}{2a} = \frac{7 \text{ dB}}{2 \cdot 0,22 \text{ dB/km}} = \underline{\underline{15,9 \text{ km}}}$$

Ko zahtevamo ločljivost reflektometra manjšo od nekaj metrov oziroma trajanje impulza krajše od nekaj deset nanosekund, postane domet OTDR merilnika neuporabno majhen za praktične meritve.

Tehnično rešitev problema poznamo že iz radarske tehnike: medtem ko se na velike razdalje obnese radar, ki je amplitudno moduliran (AM) z impulzi, je za majhne razdalje in visoko ločljivost primernejši frekvenčno moduliran (FM) radar.

### 8.4.2. Optični reflektometer v frekvenčnem prostoru

Visoko prostorsko ločljivost dosežemo z optičnim reflektometrom v frekvenčnem prostoru (angl. Optical Frequency-Domain Reflectometer ali OFDR). Podobno kot OTDR vsebuje tudi OFDR vlakenski smerni sklopnik in optični sprejemnik. Za razliko od OTDR je potrebno pri OFDR izhodni signal sprejemnika še ustrezno obdelati za prikaz rezultata.

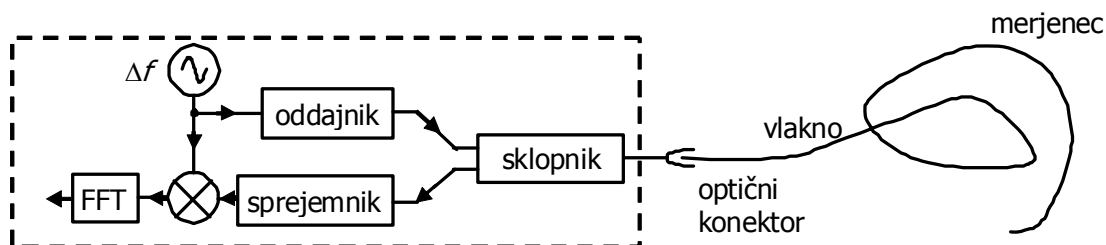
Pri reflektometrijski meritvi v frekvenčnem prostoru v optično vlakno pošljemo znan signal, ki pa ni svetlobni impulz, temveč s sinusnim signalom spremenljive frekvence moduliran optični signal. Sinusni signal pridobimo iz radijofrekvenčnega preletnega (angl. sweep) generatorja, kateri preletuje frekvence v dovolj velikem območju  $\Delta f$ , ki znaša okoli 1 GHz.

Tako moduliran optični signal potuje preko vlakenskega smernega sklopnika v merjeno vlakno, kjer se zaradi Rayleighovega sipanja in ovir del svetlobe odbije nazaj. Odbiti signal prepotuje dvakratno pot in po smernem sklopniku pride do optičnega prejemnika.

V času, ko je optični signal potoval do konca vlakna in nazaj, se je frekvenca preletnega generatorja že spremenila, zato je sprejeti signal različne (nižje) frekvence kot tisti, ki pride direktno na mešalnik. Frekvenčno različna signala pri mešanju generirata nizkofrekvenčni signal. Ko si pogledamo frekvenčni spekter nizkofrekvenčnega mešalnega produkta, vidimo vrhove, ki premosorazmerno ustrezajo razdalji med začetkom in koncem vlakna.

Frekvence signalov so enostavno enake celotnemu frekvenčnemu pasu  $\Delta f$ , ki ga preleti generator v eni periodi  $T$ , pomnoženemu z razmerjem celotne zakasnitve v obeh smereh, deljene s periodo preletnega generatorja.

$$f_i = \Delta f \cdot \frac{2t_i}{T}$$



Slika: Optični reflektometer v frekvenčnem prostoru.