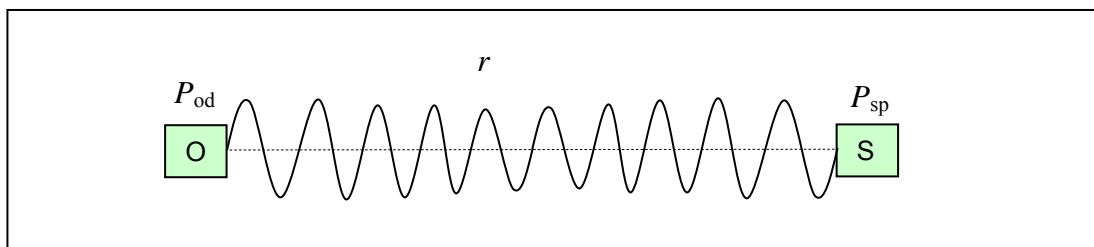


## 1. Uvod v vrvične komunikacije

Telekomunikacijske zveze vrednotita dva pomembna parametra. Prvi je domet komunikacijske zveze, ki ga podajamo v dolžinskih enotah. Drugi parameter je zmogljivost zveze, ki ovrednoti količino prenesenih informacij v časovni enoti. V primeru, da gre za digitalni prenos informacij, zmogljivost zveze, podajamo kot število bitov prenesenih v enoti časa bit/s. Ker sta za vrednotenje komunikacijskih zvez največkrat pomembna oba parametra, je nedvomno pomemben njihov produkt, ki mora biti čim večji.

### 1.1. Primerjava dometa vrvične in brezvrvične komunikacijske zveze

Pri vseh vrvičnih zvezah vrvica vodi valovanje v smeri od oddajnika (O) do sprejemnika (S), kot prikazuje slika 1. Predstavniki vrvičnih zvez so: sukani par (parica), koaksialni kabel, kovinski valovod in dielektrično optično vlakno. Pri vodenju valovanja po katerikoli, se vsa energija oziroma moč valovanja širi zgolj po vrviči. V vrviči prihaja do izgub, ki jih pojmuje kot slabljenje vrvice, kar je omejujoč dejavnik dometa vrvične zveze. Ekvivalentno si lahko predstavljamo, da cev, ki vodi tekočino, pušča in se zaradi tega količina tekočine, ki se prenese na konec zmanjša.



Slika 1: Vodenje valovanja od oddajnika (O) do sprejemnika (S) po vrviči.

Moč prenašanega valovanja upada z eksponentom razdalje

$$P_{sp} = P_{od} \cdot e^{-\alpha r}, \quad (1)$$

kjer je  $P_{sp}$  moč sprejetega signala,  $P_{od}$  moč oddanega signala,  $r$  dolžina vrvice oziroma razdalja med oddajnikom in sprejemnikom in  $\alpha$  slabljenje vrvice na enoto dolžine.

#### Primer:

Koliko signala v procentih pride na konec vrvice, če vemo, da vsaka od polovic vrvice slabi signal za 90 %?

Po prvi polovici vrvice ostane še 10 % signala, na konec vrvice pa pride 1 % signala.

Za podajanje slabljenja moči so praktično mnogo bolj primerne enote decibeli, ki so desetkratne vrednosti desetiškega logaritma iz razmerja izhodne proti vhodni vrednosti moči. Praktičnost decibelov se izkaže pri enostavnem računanju z operacijami seštevanja in odštevanja.

#### Primer:

Koliko znaša slabljenje vrvice v dB, če vemo, da vsaka od polovic vrvice slabi signal za 90 %? Koliko znaša slabljenje posamezne polovice?

$$a_1[\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{P_{izh,1}}{P_{vh,1}} = 10 \cdot \log \frac{0,1}{1} = -10 \text{ dB} \quad a_2[\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{0,01}{0,1} = -10 \text{ dB}$$

$$a[\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{P_{izh}}{P_{vh}} = 10 \cdot \log \frac{0,01}{1} = \underline{\underline{-20 \text{ dB}}} = a_1 + a_2$$

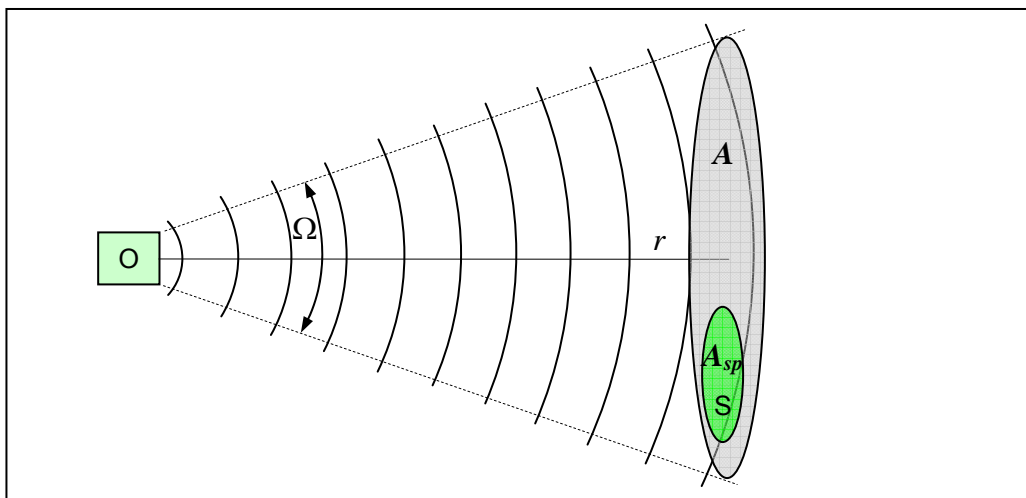
Pri brezvrvičnih zvezah se valovanje širi po tridimenzionalnem prostoru stran od oddajnika valovanja, kot prikazuje slika 2. V splošnem se valovanje razširi po prostorskem kotu  $\Omega$  manjšem od polnega prostorskega kota  $4\pi$ . Predstavniki brezvrvičnih zvez so radijske zveze, mikrovalovne zveze, satelitske zveze in nenazadnje svetlobne zveze. Valovanje, ki se razširja v prostor pod prostorskim kotom  $\Omega$  na vpade na površino

$$A = r^2 \cdot \Omega, \quad (2)$$

kjer je  $r$  razdalja med oddajnikom in sprejemnikom in  $\Omega$  prostorski kot oziroma zorni kot, pod katerim se iz točke oddajnika vidi krožni izsek. Ob predpostavki, da je površina sprejemnika mnogo manjša kot površina, na katero se je razširilo valovanje ( $A_{sp} \ll A$ ), znaša moč, ki jo dobimo v sprejemnik,

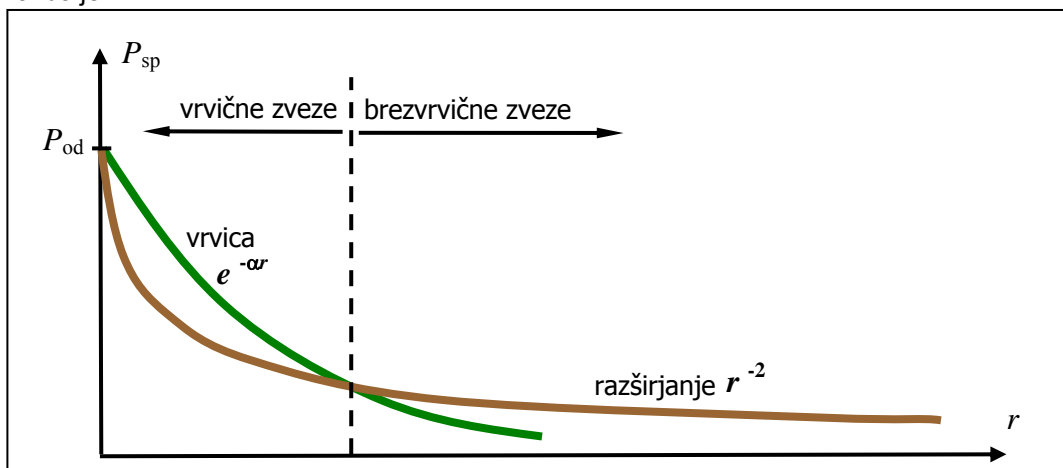
$$P_{sp} = \frac{P_{od}}{A} \cdot A_{sp} = \frac{P_{od}}{\Omega} \cdot A_{sp} \cdot r^{-2} \propto P_{od} \cdot r^{-2}. \quad (3)$$

Iz tega je razvidno, da je moč sprejetega signala  $P_{sp}$  premosorazmerna moči oddanega signala  $P_{od}$  in upada s kvadratom razdalje  $r$  med oddajnikom in sprejemnikom.



Slika 2: Razširjanje valovanja od oddajnika (O) do sprejemnika (S) v homogenem praznem tridimenzionalnem prostoru.

Iz grafične primerjave dometa vrvične in brezvrvične zveze, ki jo prikazuje slika 3, je razvidno, da so vrvične zveze bolj primerne za kratke razdalje in obratno, brezvrvične zveze prevladujejo pri komunikaciji na dolge razdalje. To dejstvo je držalo do leta 1980, ko se je pojavilo optično vlakno z nizkimi izgubami in se je meja med vrvičnimi in brezvrvičnimi zvezami praktično pomaknila preko 100 km. S pojavom nizkoizgubnih optičnih vlaken so se vrvične komunikacije začele uporabljati tudi za dolge razdalje.



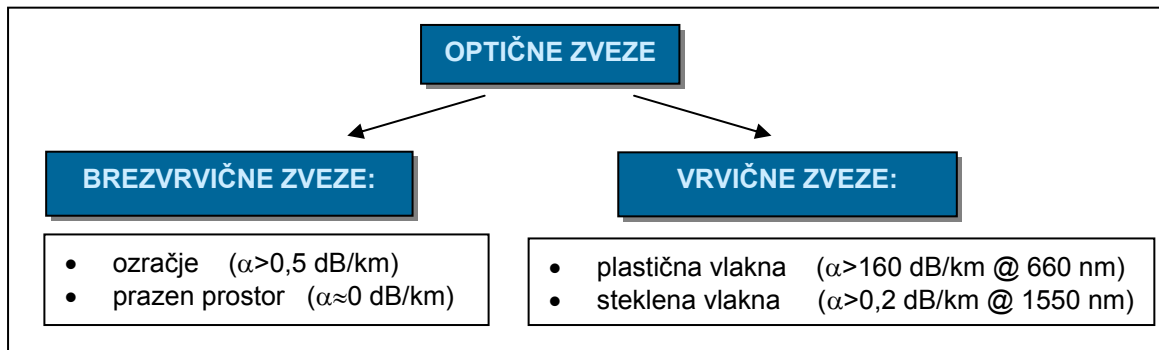
Slika 3: Primerjava sprejete moči ( $P_{sp}$ ) za vrvične in brezvrvične zveze.

Slabost vrvičnih komunikacijskih, ki predstavljajo fiksne zveze, je relativno visoka cena pri polaganju kablov. Ta strošek odpade pri brezvrvičnih zvezah, ki omogočajo tudi mobilnost uporabnikov – mobilne zveze. Omejitveni dejavniki pri brezvrvičnih zvezah so ovire, slabljenje ozračja in uporaba omejene naravne dobrine radiofrekvenčnega spektra, ki ga je potrebno razdeliti med različne uporabnike. Pri vrvičnih komunikacijah je frekvenčni spekter mogoče ponovno uporabljati na dodatni vrvi. Pasovna širina zveze se torej enostavno množi s številom uporabljenih vrvic. Prednosti in slabosti ene in druge tehnologije je vedno znova vredna temeljitega razmisleka pri uvajanju novih sistemov v prakso. Vsekakor so najbolj uspešne rešitve, ki najdejo pravo razmerje uporabe med vrvično in brezvrvično zvezo.

## 1.2. Primerjava vrvičnih in brezvrvičnih optičnih komunikacij

V optičnih komunikacijskih zvezah se lahko za prenosno pot svetlobnega žarka uporablja brezvrvični oziroma tako imenovani prostozaračni sistem ali prenos po vrvi, ki ji pravimo optično vlakno (slika 4). Slabosti neusmerjene prostozaračne zveze so:

- majhna zmogljivost zveze (počasen prenos informacij),
- občutljivost na motnje (domet in kvaliteta prostozaračne optične zveze sta odvisna od atmosferskih pogojev),
- pogoji razširjanja svetlobe.



Slika 4: Prenosne poti v optičnih komunikacijah.

V zgodovini so se najprej pojavile prostozaračne optične zveze. Stari Grki so za komunikacijo uporabljali zrcala in sončno svetlobo, ameriški Indijanci so uporabljali dimne signale, v naših krajih so za obrambo pred vpadi Turkov kurili kresove, na ladjah se komunikacija vrši s svetilkami in ravno tako je pri železniškem prometu.

Danes so enostavne prostozaračne optične zveze zanimive predvsem za komuniciranje na krajših razdaljah do nekaj deset metrov (brežične slušalke, daljinsko upravljanje televizorja, razne protivlomilske naprave, komunikacija med mobilnim terminalom in računalnikom,...). Z uporabo zbiralnih leč na obeh straneh se domet takšne zveze lahko poveča na velikostni razred enega kilometra, z uporabo močnejšega polprevodniškega laserja namesto infrardeče svetleče diode pa se lahko doseže še večje razdalje. V zadnjem času se odpirajo možnosti uporabe prostozaračnih optičnih povezav kot podaljšek popolnoma optičnega omrežja na mestih, kjer je polaganje optičnega kabla nemogoče ali predrago.

Optične komunikacije v praznem prostoru (komunikacija med sateliti v vesolju) dosegajo še boljše rezultate, ker v tem primeru ni absorpcije svetlobe. Problem je izdelava ustreznega fokusirnega sistema. Valovanje v neomejenem prostoru izgublja moči s kvadratom razdalje. Domet je pri prosto razširjajočem valovanju omejen z mehanizmom razširjanja, ki pa ni prisoten pri vrvičnih komunikacijah, kjer je žarek ujet v valovod. Pri vrvičnih komunikacijah je domet omejen le s snovnimi izgubami.

Osnovni material enorodovnega in mnogorodovnega vlakna v komunikacijah (transportnem in dostopovnem omrežju) je kremenovo steklo  $\text{SiO}_2$  s primesmi. Lomni količnik stekla je odvisen od vrste in koncentracije primesi. Pravo revolucijo v optičnih komunikacijah je povzročil izum steklenega

optičnega vlakna, ki predstavlja optični valovod, po katerem vodimo svetlobo. Njegova največja prednost so majhne izgube, ki so v nekaterih primerih tudi samo 0,2 dB/km.

Za zelo kratke povezave (do 300 m) so iz praktičnih razlogov potencialno zanimiva poceni mnogorodovna plastična vlakna. Ta vlakna imajo primerno mehansko odpornost in omogočajo predvsem veliko praktičnost ter uporabnost v hišnem okolju. Na žalost je slabljenja plastičnega vlakna 0,1 dB/m pri 660 nm, kar je zelo visoko v primerjavi s SiO<sub>2</sub> vlakni. Sodobnejša plastična vlakna naj bi imela slabljenje pod 10 dB/km v področju od 850 nm do 1300 nm.

### 1.3. Zmogljivost zveze

Najpomembnejše vprašanje v zvezi s komunikacijskim kanalom je maksimalna vrednost, s katero zmore le-ta prenašati informacije. Informacija se lahko prenaša s pomočjo signala samo, če se lahko signal spreminja. Analognega signala, ki potuje po fizičnem kanalu, ni mogoče spreminjati poljubno hitro. Vrednost, pri kateri se signal lahko spreminja, je določena s pasovno širino. Signal s pasovno širino  $B$  se lahko spreminja z maksimalno vrednostjo  $2B$ . Če se vsaka sprememba določa z bitom, je maksimalen informacijski pretok  $2B$ .

Za signal, ki se spreminja med dvema energijskima nivojema, je Shannon leta 1948 zapisal definicijo informacije

$$I = \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{W_S}{W_N} \right). \quad (4)$$

Ko imamo logaritem z osnovo 2, je informacija v bitih (dvojiške številke).  $W_S$  in  $W_N$  predstavljata energijo koristnega signala in energijo šuma, ki je motnja v naši zvezi.

Zmogljivost zveze v bit/s podaja maksimalno količino prenesenih informacij v časovni enoti

$$C = \frac{dI}{dt} = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_S}{P_N} \right), \quad (5)$$

kjer je  $B$  frekvenčna pasovna širina,  $P_S$  moč koristnega signala in  $P_N$  moč šuma. To zmogljivost zveze imenujemo tudi kapaciteta prenosne poti, ki predstavlja teoretično zgornjo mejo prenosnega kanala. Za doseganje visokih kapacitet kanala je nedvomno zelena čim večja frekvenčna pasovna širina. V tem primeru ima svetloba, ki se nahaja v frekvenčnem pasu od 200 THz do 1000 THz nedvomne prednosti pred radijskimi valovi, ki razpolagajo le z nekaj GHz.

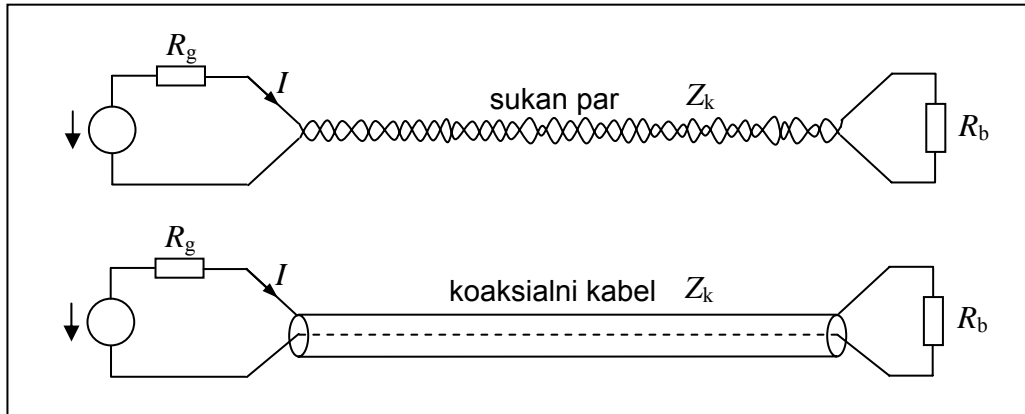
### 1.4. Električne vrvice

Kvaliteto električne vrvice definirata slabljenje in pasovna širina. Slabljenje izhaja neposredno iz dometa telekomunikacijske zveze. Pasovna širina pa nam definira zmogljivost zveze, ki jo bomo izdelali iz izbrane električne vrvice. Najpogostejša predstavnika električnih vrvic sta sukan par (parica) in koaksialni kabel, ki sta predstavljena na sliki 5.

Električno vrvico s karakteristično impedanco  $Z_k$  priključimo na generator in breme. Če je izpolnjen pogoj  $R_g = R_b = Z_k$ , ni odbojev in popačenj, izgube pri prenosu so najmanjše.

Sukan par je običajno del štiriparnega inštalacijskega kabla, kjer so pari zaviti z različnimi koraki. Sukanje parov se uporablja z namenom zmanjševanja presluhov med njimi. Glede na kvaliteto inštalacijski kabel s sukanimi pari označujemo z UTP, FTP, S-FTP ali S-STP. Karakteristična impedanca  $Z_k$  posameznega sukanega para je 100 Ω.

Presluhi so mnogo manjši (-100 dB) pri uporabi koaksialnih kablov, kjer je elektromagnetno polje zaključeno znotraj oklopa takega kabla.



Slika 5: Priklučitev sukanega para in koaksialnega kabla.

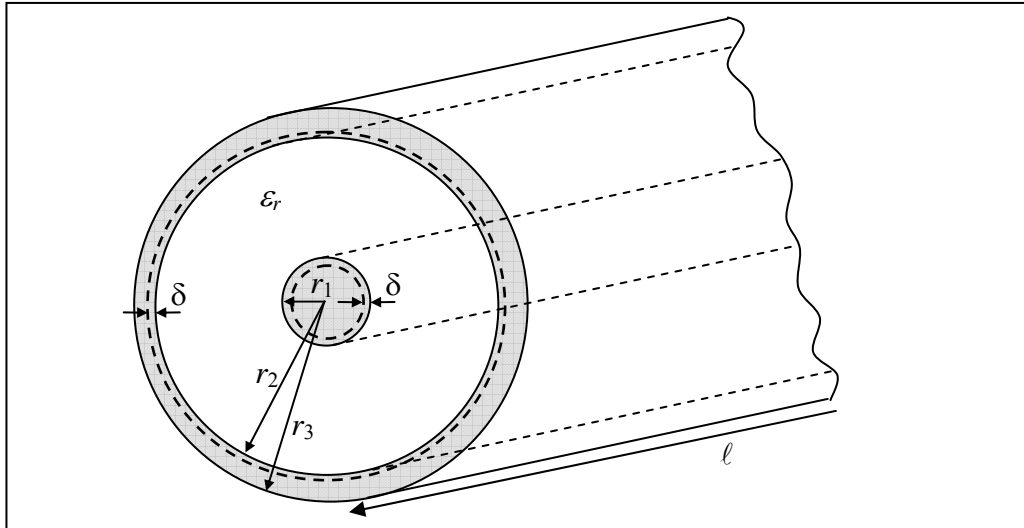
Karakteristično impedanco  $Z_k$  koaksialnega kabla, ki ga prikazuje slika 6, izračunamo z izrazom

$$Z_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{2\pi} Z_0 \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{60 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (6)$$

kjer  $r_1$  in  $r_2$  predstavljata polmera srednje žile in oklopa.  $\mu_0$  je permeabilnost praznega prostora (vakuuma), katere točna vrednost je  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am.  $\epsilon_0$  je dielektričnost praznega prostora, ki znaša

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ As/Vm}. \quad (7)$$

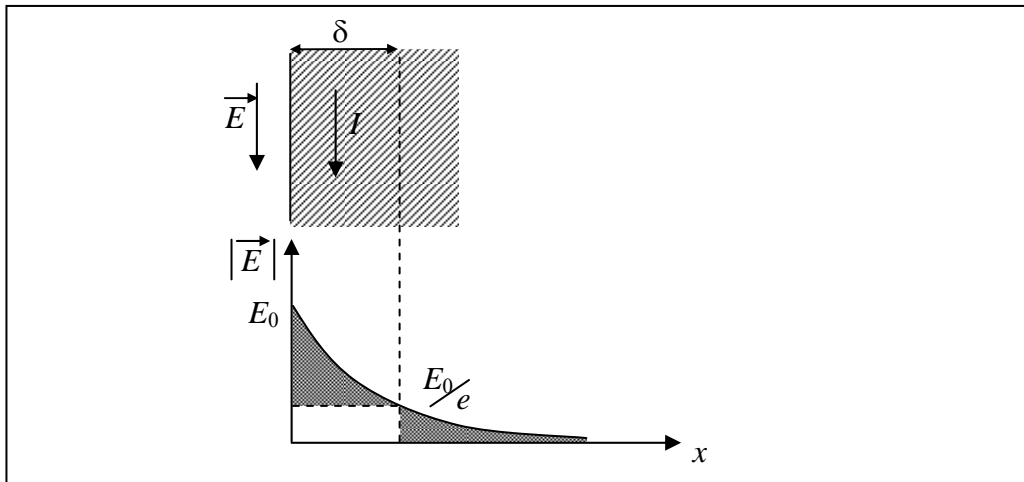
$\epsilon_r$  je relativna dielektričnost snovi glede na prazen prostor. Njena vrednost je vedno večja ali enaka ena in nima enot.



Slika 6: Presek koaksialnega kabla.

Dielektrik z nizko relativno dielektričnostjo je skoraj brez izgub in praktično nič ne doprinese k slabljenju. Pri kovinah pri visokih frekvencah pride do tako imenovanega kožnega pojava (angl. skin effect), ki ga prikazuje slika 7. Kožni pojav pri koaksialnem kablu pomeni, da tok teče samo v koži žile in v koži oklopa. To se odraža kot dušenje električnega polja in slabljenje. Udorna globina  $\delta$  se izračuna po izrazu

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \cdot \mu \gamma}}. \quad (8)$$



Slika 7: Prikaz kožnega pojava v kovini.

**Primer:**

Koliko znaša udorna globina  $\delta$  v baker, ki ima prevodnost  $\gamma=56 \cdot 10^6$  S/m, pri frekvencah  $f_1=100$  Hz in  $f_2=100$  MHz?

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2}{2\pi f_1 \cdot \mu \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cdot 56 \cdot 10^6 \text{ S/m}}} = \underline{\underline{6,7 \text{ mm}}}$$

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{2}{2\pi f_2 \cdot \mu \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 100 \text{ MHz} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cdot 56 \cdot 10^6 \text{ S/m}}} = \underline{\underline{6,7 \mu\text{m}}}$$

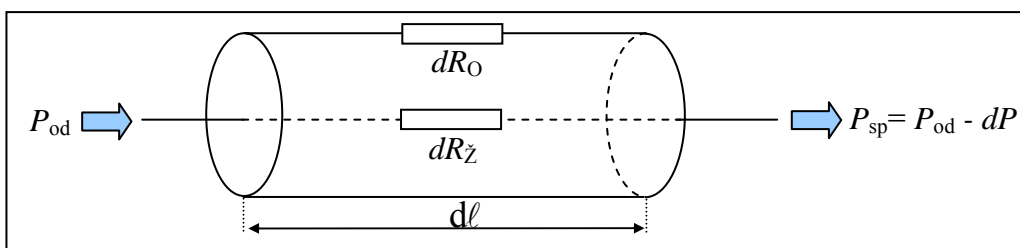
Zaradi frekvenčne odvisnosti udorne globine lahko sklepamo, da so tudi izgube v koaksialnem kablu frekvenčno odvisne. Poskušajmo jih določiti.

Del električne upornosti koaksialnega kabla sestavljata del upornosti žile in del upornosti oklopa, kar prikazuje slika 8. Pri tem del upornosti žile znaša

$$dR_z = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{d\ell}{2\pi r_1 \delta} \quad (9)$$

Del upornosti oklopa zapišemo podobno

$$dR_o = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{d\ell}{2\pi r_2 \delta} \quad (10)$$



Slika 8: Upornost koaksialnega kabla je sestavljena iz upornosti žile in upornosti oklopa.

Del električne upornosti, ki je seštevek obeh prispevkov, zapišemo kot

$$dR = dR_z + dR_o = \frac{d\ell}{2\pi\gamma\delta} \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (11)$$

Z upoštevanjem izraza za udorno globino dobimo

$$dR = \frac{d\ell}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\gamma}} \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (12)$$

Moč, ki se troši na delnih upornostih žile in oklopa, znaša

$$dP = \frac{1}{2} |I|^2 dR. \quad (13)$$

Moč, ki se prenaša po kablu, znaša

$$P = \frac{1}{2} |I|^2 Z_k. \quad (14)$$

Ob upoštevanju zgornjih dveh izrazov dobimo diferencialno enačbo

$$\frac{dP}{P} = \frac{dR}{Z_k}. \quad (15)$$

Sedaj izvedemo integracijo po celotni dolžini kabla od oddajnika do sprejemnika.

$$\int_{P_{od}}^{P_{sp}} \frac{-dP}{P} = \frac{dR}{Z_k} \int_0^\ell d\ell \quad (16)$$

$$-\ln P \Big|_{P_{od}}^{P_{sp}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\gamma}} \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cdot \frac{60 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \cdot \ell \quad (17)$$

$$\ln \frac{P_{od}}{P_{sp}} = \underbrace{\frac{\sqrt{\epsilon_r} \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\gamma}}}{2\pi \cdot 60 \Omega} \cdot \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}_a \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \cdot \ell \quad (18)$$

Slabljenje  $a$  je frekvenčno odvisno.

$$a = konst. \cdot \sqrt{\omega} \quad (19)$$

Večja kot je frekvenca, manjša je udorna globina in večje so izgube.

Izgube koaksialnega kabla običajno podajamo v decibelih

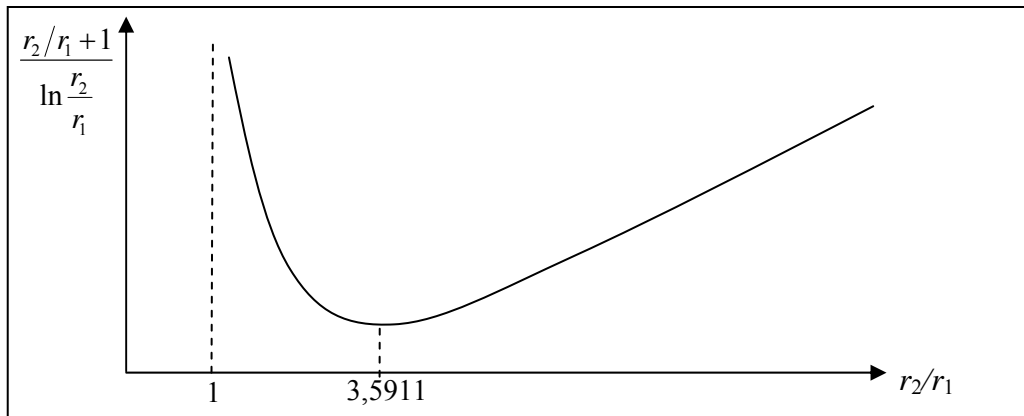
$$a[\text{dB}] = 10 \cdot \log \frac{P_{od}}{P_{sp}} \quad (20)$$

Če pri tem upoštevamo izraz (18), dobimo za slabljenje

$$a[\text{dB}] = 10 \cdot \frac{\ln \frac{P_{od}}{P_{sp}}}{\ln 10} = \frac{10}{\ln 10} \cdot \sqrt{\frac{\omega\epsilon_r\epsilon_0}{2\gamma}} \cdot \frac{r_2 + 1}{r_1} \cdot \frac{\ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (21)$$

Slabljenje  $a$  je manjše, ko je prevodnost žile in oklopa večja, zato se namesto bakra (Cu) uporablja srebro (Ag).

Razmerje med  $r_2$  in  $r_1$  je optimalno pri vrednosti 3,5911, kot prikazuje slika 9. Takrat so izgube kabla najmanjše.



Slika 9: Iskanje najboljšega razmerja polmerov za najnižje izgube koaksialnega kabla.

Slabljenje  $a$  je najmanjše, ko je relativna dielektričnost snovi  $\epsilon_r$  najmanjša, zato se največkrat uporabljajo penasti dielektriki ali distančniki. Najnižja možna vrednost za dielektričnost je 1, pri čemer dobimo karakteristično impedanco  $73 \Omega$ .

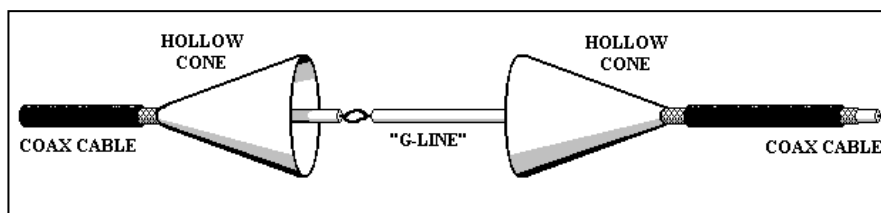
#### Primer:

Izračunaj slabljenje bakrenega koaksialnega kabla ( $\gamma_{Cu}=56 \cdot 10^6$  S/m) s penastim dielektrikom ( $\epsilon_r \approx 1$ ) pri frekvencah  $f_1=100$  MHz in  $f_2=400$  MHz! Polmera žile in oklopa sta določena optimalno, pri čemer naj bo premer koaksialnega kabla 12 mm ( $1/2''$  {cole}).

$$a_1 = \frac{\sqrt{\epsilon_r} \cdot \sqrt{\frac{\omega_1 \mu_0}{2\gamma_{Cu}}} \cdot \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}{2\pi \cdot 60 \Omega} = \frac{\sqrt{\frac{2\pi f_1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}}{2 \cdot 56 \cdot 10^6 \text{ S/m}}} \cdot \frac{4,511}{\ln \frac{r_2}{r_1}}}{2\pi \cdot 60 \Omega} \approx 25 \text{ dB/km}$$

$$a_2 = a_1 \cdot \sqrt{4} \approx 50 \text{ dB/km}$$

Z namenom imeti čim manjše izgube si za  $r_2$  želimo čim večjo vrednost. Poznan je tudi primer, ko je premer oklopa neskončno velik oziroma ga sploh ni, kot prikazuje slika 10. Zveza je poznana kot Goubou-jev vod, ji ga sestavlja zgolj kovinska žila obložena z dielektrikom. Izgube so v tem primeru manjše vendar mora biti žica napeta in se na njej ne sme nič nabirati (vodne kapljice, umazanija,..)



Slika 10: Goubou-jev vod.

Velik  $r_2$  pomeni izdelavo debelih koaksialnih kablov, za kar potrebujemo mnogo kovine, kar pa povečuje ceno. Poleg tega se debelih kablov ne splača delati tudi zato, ker se pri večjih dimenzijah začnejo pojavljati višji rodovi. Le-ti so moteči in ima drugačno karakteristiko izgub, kar prikazuje slika 11. Frekvenco, pri kateri nastane višji rod, imenujemo mejna frekvenca  $f_{\text{mejna}}$ .

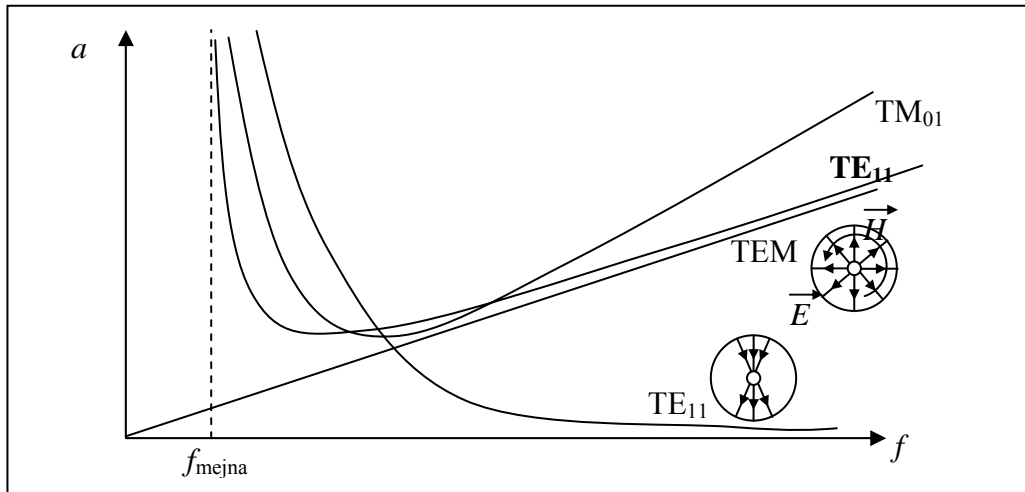
$$f_{\text{mejna}} = \frac{c_0 / \sqrt{\epsilon_r}}{\pi(r_1 + r_2)} \quad (20)$$



**Primer:**

Izračunaj mejno frekvenco za koaksialni kabel s penastim dielektrikom ( $\epsilon_r \approx 1$ ), pri čemer naj bo polmer žile  $r_1 = 2$  mm in polmer oklopa  $r_2 = 6$  mm.

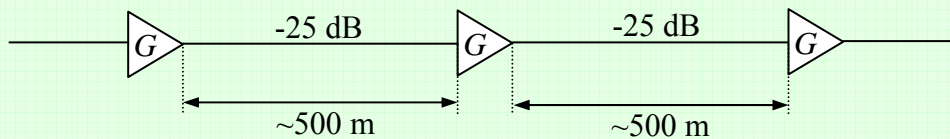
$$f_{\text{mejna}} = \frac{c_0 / \sqrt{\epsilon_r}}{\pi(r_1 + r_2)} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{\pi(2 \cdot 10^{-3} \text{ m} + 6 \cdot 10^{-3} \text{ m})} = 12 \text{ GHz}$$



Slika 11: Frekvenčni potek slabljenja za različne rodove.

**Primer:**

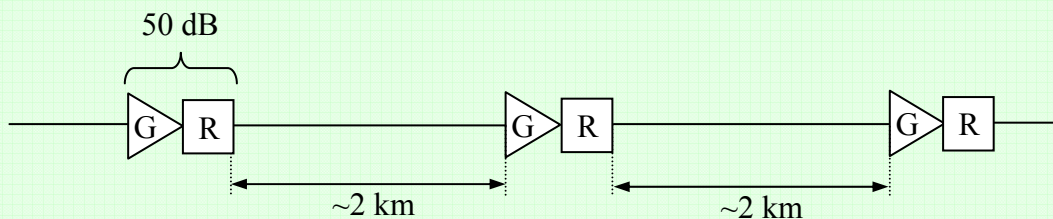
Kabelska televizija potrebuje pasovno širino  $B = 400$  MHz. Na voljo imamo ojačevalnike z ojačanjem  $G = 25$  dB. Izračunaj razdaljo med posameznimi ojačevalniki!



$$L[\text{km}] = \frac{G[\text{dB}]}{a[\text{dB/km}]} = \frac{25 \text{ dB}}{50 \text{ dB/km}} = 0,5 \text{ km}$$

**Primer:**

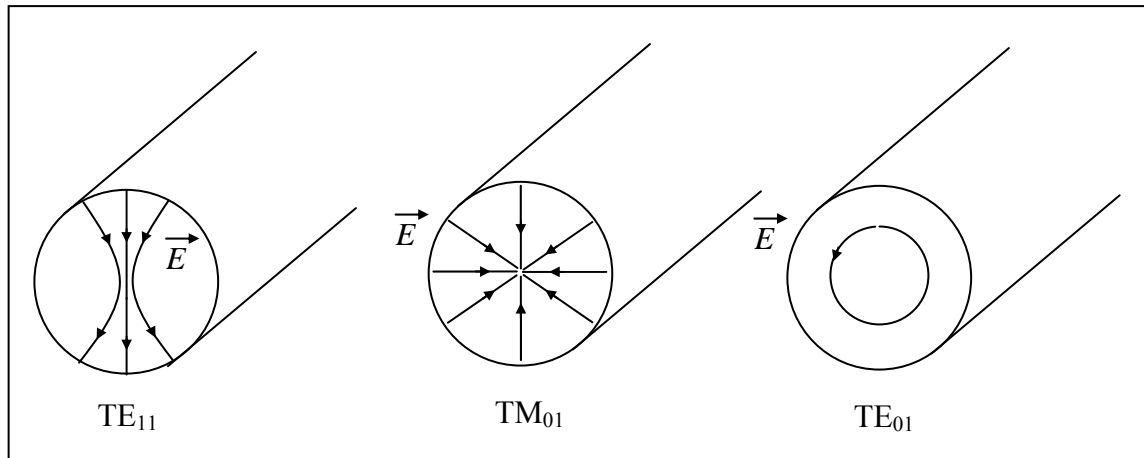
Telefonska zveza z zmogljivostjo  $C = 140$  Mbit/s ima ojačevalno regeneratorske enote s skupnim ojačanjem  $G = 50$  dB. Izračunaj razdaljo med posameznimi enotami!



$$L[\text{km}] = \frac{G[\text{dB}]}{a[\text{dB/km}]} = \frac{50 \text{ dB}}{25 \text{ dB/km}} = 2 \text{ km}$$

## 1.5. Kovinski valovodi

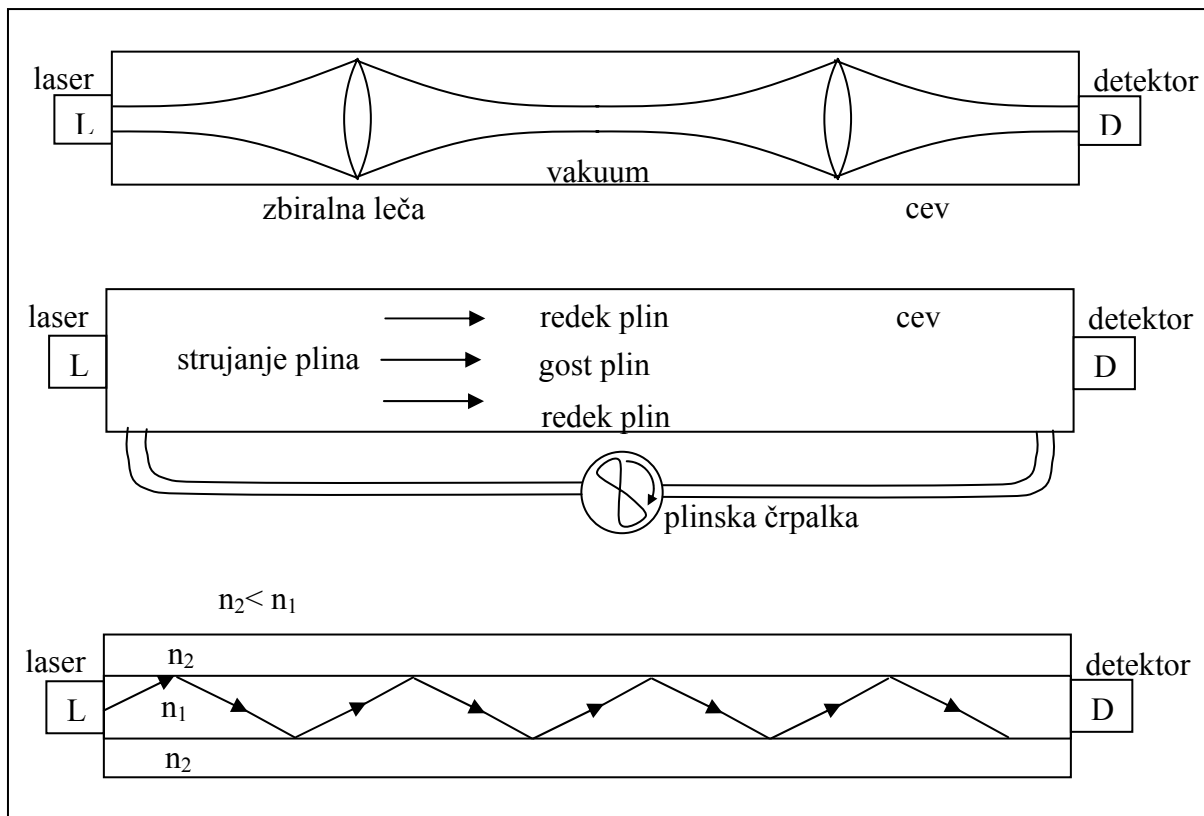
Kovinski valovodi so prazne kovinske cevi, po katerih se širi elektromagnetno valovanje. Po obliki so lahko pravokotni ali okrogli, kot prikazuje slika 12. Na krivinah kovinskega valovoda prihaja do sklapljanja med rodovi, kar vnaša izgube.



Slika 12: Kovinski valovodi z različnimi rodovi elektromagnetnega valovanja.

## 1.6. Nekovinski valovodi

Izgubam elektromagnetnega valovanja v kovini se izognemo tako, da ne vodimo elektromagnetno valovanje po kovini, temveč ga poskušamo voditi s pomočjo dielektrikov. Slika 13 prikazuje tri tehnološke rešitve za vodenje svetlobe po dielektričnih ceveh. Izmed prikazanih je najlažje izvedljiva tretja možnost, ki jo imenujemo optično vlakno.



Slika 13: Možne rešitve za vodenje svetlobe po dielektriku.

## 1.7. Primerjava električnih vrvic z optičnim vlaknom

Optično vlakno je bilo najprej namenjeno dolgim prekooceanskim in zemeljskim zvezam. Danes se je njegova uporaba tako razširila, da nadomešča bakrene in koaksialne vodnike v lokalnih telefonskih omrežjih, kabelskih televizijskih sistemih in računalniških omrežjih.

Pred drugimi vrstami komunikacij imajo optične komunikacije vsaj štiri velike systemske prednosti, zaradi katerih izrivajo druge električne tekmece na področju fiksnih zvez:

1. Slabljenje prenosnega medija - optičnega vlakna - je neprimerljivo manjše kot v kovinskih vodnikih, kar omogoča doseganje velikih razdalj ob zelo majhnem razmerju napačno sprejetih bitov (angl. Bit Error Rate - BER).
2. Pri električnih vrvicah lahko znaša širina prenosnega spektra do nekaj gigahercev ali deset gigahercev, kar omogoča digitalni prenos z dokaj veliko bitno hitrostjo bit/s, oziroma prenos velike količine informacij. Po optičnem vlaknu lahko prenašamo spektre, ki obsegajo celotno radiofrekvenčno in mikrovalovno področje in še mnogo več, kar je za približno tisočkrat več, kot pri najboljših električnih vrvicah.
3. Občutljivost na zunanje motnje je pri optičnem prenosu neopazna, zato lahko dosežemo tudi ekstremno nizko vrednost BER, kar je potrebno za prenos podatkov z zelo veliko zanesljivostjo. Za inštalaterje je bistvena prednost predvsem neobčutljivost na elektromagnetne motnje, kar pomeni, da se optični vodniki vsaj v teoriji lahko polagajo kjerkoli.
4. Pri povezovanju komunikacijskih naprav imamo nemalokrat probleme zaradi različnih potencialov, kar ločujemo z galvanskimi ločitvami. Pri električnih vrvicah je potrebno galvansko ločitev izvesti posebej z ločilnimi transformatorji. V optičnih komunikacijah, kjer je optično vlakno neprevodni dielektrik, je galvanska ločitev vedno avtomatsko prisotna.

	električne vrvice	optično vlakno
izgube	velike	majhne
frekvenčni pas	majhen	velik
občutljivost na EM motnje	velika	neobčutljivost
galvanska ločitev	v posebnih primerih	vedno
komunikacijska oprema	enostavna	zahtevnejša

Slika 14: Primerjalna tabela med električnimi vrvicami in optičnim vlaknom.

Edina prednost, ki jo pred optičnim vlaknom zaenkrat še imajo bakreni tekmeči, je zaradi množične proizvodnje cenejša komunikacijska oprema. Nikakor ne moremo reči, da je ta oprema tudi enostavnejša, saj je nek VDSL modem v splošnem mnogo bolj kompleksen kot pa optični modem. V zadnjih letih se razvoj posveča predvsem možnostim izdelave poceni terminalne opreme za optične komunikacije, kar bi omogočilo še širšo uporabo optičnih sistemov. V zvezah kratkega dosega precej obetajo nove tehnologije za izdelavo laserskih virov.