Kazalo

Kazalo **1**
1 Komunikacijske tehnologije in storitve **4**
1.1 Osnovni pojmi 4
1.2 Storitve v sodobnih telekomunikacijah 7
1.2.1 Razvoj telekomunikacij v preteklosti 7
1.2.2 Razvoj telekomunikacij v prihodnosti 7
1.2.3 Sodobne potrebe in zahteve uporabnika 9
1.2.4 Pomen storitev 9
1.2.5 Zahteve storitev 9
1.2.6 Kakovost storitev (QoS) 10
1.3 Informacijsko povezana družba in internet 12
1.4 Razvoj telekomunikacijskih omrežij in interneta 12
1.5 Uporaba interneta v informacijski družbi 13
1.6 Tehnične zahteve prenosa pri internetnih storitvah 15
1.7 Hierarhična razdelitev omrežij 18
2 Dostopovna omrežja **20**
2.1 Telefonsko omrežje 23
2.2 Omrežje kabelske televizije 25
2.3 Optično omrežje 27
2.3.1 Kako nadgraditi bakreno omrežje v optičnega 28
2.3.2 Arhitektura P2P z zvezdno topologijo omrežja 30
2.3.3 Arhitektura P2MP z drevesno topologijo omrežja 30
2.4 Lokalno elektroenergetsko omrežje 32
2.5 Brezžična razdelilna omrežja 33
2.6 Mobilna omrežja 35
2.7 Lokalna brezžična omrežja 39
2.8 Satelitska omrežja 42
2.8.1 Sateliti za mobilno telefonijo 45
2.8.2 Sateliti za širokopasovne podatkovne komunikacije 45
3 Tehnični opis dostopov **48**
3.1 Tehnika žičnih dostopov 48
3.1.1 Lastnosti prenosnega medija 48
3.1.2 Ločevanje smeri prenosa 52
3.1.3 Kanalno kodiranje signala 54
3.1.4 Modulacijski postopki 58
3.1.5 Omejitve prenosnih kapacitet 69
3.1.6 Učinkoviti prenosni sistemi 72
3.2 Tehnika brezžičnih dostopov 77
3.2.1 Lastnosti brezžičnega prenosnega kanala 77
3.2.2 Načini sodostopa do prenosnega kanala 85
4 Protokoli v sodobnih telekomunikacijah **91**
4.1 Splošno o protokolih 91
4.1.1 Začetki komunikacij na daljavo 91
4.1.2 Kaj je protokol 91

4.1.3 Storitve in protokoli ... 91
4.1.4 Protokolni sklad ... 94
4.2 Zanesljivost prenosa ... 97
4.2.1 Detekcija in popravljanje napak ... 98
4.3 Protokol IP ... 100
4.3.1 Splošno o IP protokolu ... 100
4.3.2 Pakiranje podatkov ... 100
4.3.3 Storitve, ki jih IP nudi ... 100
4.3.4 Zanesljivost IP protokola ... 101
4.4 Naslavljanje v IP ... 102
4.4.1 Uvod ... 102
4.4.2 Razredi naslovov ... 103
4.4.3 Maska podomrežja in oblika zapisa IP naslova ... 104
4.4.4 Posebni IP naslovi ... 104
4.4.5 Ustvarjanje podomrežij ... 105
4.4.6 Problematika naslovnega prostora IPv4 in uvajanje IPv6 ... 105
4.5 Usmerjanje v IP ... 106
4.5.1 IGP usmerjevalni protokol ... 108
4.5.2 EGP usmerjevalni protokol ... 112
5 Sistemi sodobne fiksne govorne telefonije ... 115
5.1 ISDN ... 115
5.2 Vrste dostopa ... 116
5.2.1 Osnovni dostop ... 116
5.2.2 Primarni dostop ... 117
5.3 ISDN referenčne oz. priključne točke ... 118
5.4 ISDN kanali ... 119
5.5 Telefonija preko paketno orientiranih omrežij - VoIP ... 123
6.1 Medomrežno povezovanje med operaterji ... 126
6.2 Prenosljivost številk ... 127
6.4.1 Splošno o prenosljivosti številk ... 127
6. Navigacijski sistemi ... 130
6.1. Od kamnov do satelitov ... 130
6.1.1. Kamena doba ... 130
6.1.2. Zvezdna doba ... 130
6.1.3. Radijska doba ... 131
6.1.4. Doba LORAN-a ... 133
6.1.5. Doba satelitske navigacije ... 135
6.2. Navigacijski sateliti ... 136
6.2.1. Merjenje razdalj do satelitov ... 136
6.3. Viri napak ... 139
6.3.1. Satelitska ura ... 139
6.3.2. Ura v sprejemniku ... 140
6.3.3. Napake satelitske orbite ... 141
6.3.4. Atmosferske napake: Ionosfera in Troposfera ... 141
6.3.5. Širjenje signala po več poteh ... 142
6.3.6. Napake v sprejemniku ... 142
6.3.7. GDOP (Geometrical Dilution Of Precision) ... 142
6.3.8. Selektivna razpoložljivost: Umetno ustvarjene napake ... 143

7. Optične komunikacije 144
7.1. Uvod 144
7.2. Prostozračne zveze 145
7.3. Zveze po optičnem kablu (vrvične komunikacije) 147
7.3.1. Merjenje slabljenja optičnega vlakna 153
7.4. Viri v optičnih komunikacijah 171
7.5. Detektorji v optičnih komunikacijah 176

1 Komunikacijske tehnologije in storitve

1.1 Osnovni pojmi

V času hitrega razvoja tehnologije in tehnike večina ljudi ne posveča dovolj pozornosti posameznim opisom in opredelitvam pojmov. Še posebno na področju telekomunikacij je pogosto uporabljen isti izraz za več različnih stvari. Napačna uporaba pojmov širši krog ljudi zmede. Angleško izrazoslovje s področja telekomunikacij je v slovenščino velikokrat težko prevedljivo, kar je le eden izmed razlogov nenatančnega izražanja, ki pa ne sme postati pravilo.

Komunikacija je zelo širok pojem. Z njim opisujemo različne načine prenosa informacij, ki poteka po dogovoru o načinu prenosa. Neposredni ustni pogovor, telefon, časopisni oglasi, televizija, video, računalniške komunikacije so najpogosteje uporabljeni načini komunikacije med ljudmi.

Telekomunikacije so vsak prenos, oddajanje in sprejemanje znakov, signalov, pisane besede, slike, zvoka ali sporočil po žičnih, radijskih, optičnih sistemih, torej z uporabo elektromagnetnega valovanja.

Telekomunikacijsko omrežje je sistem, ki zagotavlja telekomunikacije med dvema ali več točkami. Sestavljajo ga vozlišča, spojni vodi med njimi, dostopovni vodi in terminalska oprema.

Vozlišče (node) v telekomunikacijskem omrežju je naprava, kjer se med seboj povezujejo komunikacijske poti.

Terminalska oprema (terminal equipment) je oprema na uporabniški strani vmesnika uporabnika z omrežjem. Omogoča uporabo telekomunikacijskih.

Telekomunikacijske storitve delimo na nosilne, daljinske, dopolnilne in storitve z dodano vrednostjo.
Nosilna storitev (bearer service) je vrsta telekomunikacijske storitve, ki zagotavlja prenos signalov med vmesniki uporabnikov z omrežjem. Zanjo so značilne naslednje temeljne lastnosti (prenosna zmogljivost, zakasnitve pri prenosu), način komuniciranja (povezavno, nepovezavno), način prenosa (simetrično-asimetrično, točka-točka, porazdeljevalno, stalna zveza-komutirana zveza).

Povezavna storitev (connection-oriented service) je storitev, pri kateri se pred prenosom informacij vzpostavi logična povezava med uporabniki. Zagotovljena je kakovost storitve.

Nepovezavna storitev (connectionless service) je storitev, pri kateri se prenašajo informacije med uporabniki, ne da bi se med njimi predhodno vzpostavila logična povezava. Kakovost storitve načeloma ni zagotovljena.

Daljinska storitev (teleservice) je vrsta celovite telekomunikacijske storitve, s funkcijami terminalske opreme vred, za sporazumevanje med uporabniki.

Dopolnilna storitev (supplementary service) je vsaka storitev, ki jo zagotavlja omrežje kot dopolnitev nosilnih in daljinskih storitev (različni načini tarifiranja, identifikacije uporabnikov, oblikovanje zaprtih skupin uporabnikov). Uporabniku ne more biti ponujena kot samostojna storitev, ampak v povezavi z nosilno storitvijo.

Storitev z dodano vrednostjo (value added service) je ponujena končnim uporabnikom kot dodatna storitev telefonskim storitvam ali drugim prenosom informacij med dvema koncema. Primer: govorni predal sistema GSM, daljinsko glasovanje.

Aplikacije so izvori telekomunikacijskega prometa. Realiziramo jih lahko z vsemi navedenimi vrstami storitev in so osnovni interes uporabnikov telekomunikacijskih omrežij. Oglaševanje, učenje na daljavo, elektronsko poslovanje, nakupovanje na daljavo zajemamo pod termin aplikacija (uporaba).

Multimedijske storitve so storitve, pri katerih gre za izmenjavo več kot ene vrste informacij (besedilo, grafika, slika, zvok, video).

Multimedijske aplikacije so aplikacije, ki za svoje izvajanje uporabljajo več kot en tip informacij. Primer: izobraževanje na daljavo, telemedicina, elektronsko poslovanje.

Telemedicina je aplikacija, ki omogoča zdravljenje oziroma zdravniško pomoč na daljavo. Uporaba aplikacije: daljinsko svetovanje, daljinska diagnostika, daljinsko izobraževanje, daljinska radiologija, daljinska patologija, daljinska dermatologija, daljinska kardiologija, daljinska psihiatrija.

Elektronsko poslovanje je aplikacija, ki omogoča kakršnekoli denarne transakcije prek omrežja.
Elektronsko trgovanje in elektronsko oglaševanje uporabljata aplikacijo elektronsko poslovanje. Oglaševanje in plačevanje prek omrežja sta aplikaciji elektronskega poslovanja.

Mobilno plačevanje je prav tako aplikacija, ki omogoča denarne transakcije prek omrežja.

Daljinsko izobraževanje je aplikacija, kjer učenec in učitelj medsebojno komunicirata prek telekomunikacijskega omrežja. Elektronsko sporočanje, videokonferenca, delo v skupinah, sodelovanje pri učenju, dostop do knjižnic so elementi interaktivnega izobraževanja na daljavo.

Uporabnik (user) je pravna ali fizična oseba, ki uporablja storitve izvajalcev telekomunikacijskih storitev.

Naročnik (subscriber) je pravna ali fizična oseba, ki sklene naročniško razmerje z izvajalcem javnih telekomunikacijskih storitev.

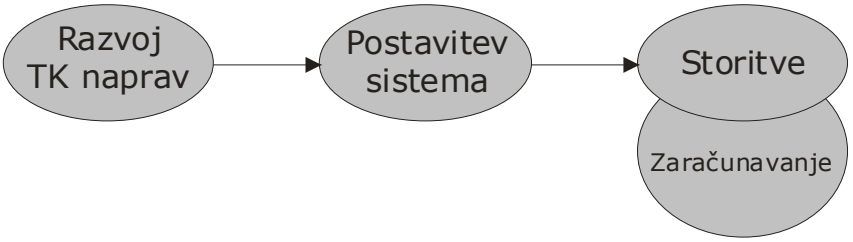
Internet s stališča ITU- T predstavlja daljinsko storitev (prenos podatkov s pomočjo IP protokola med dvema terminaloma). Uporabnik lahko prek nje izkorišča vrsto aplikacij: elektronsko poslovanje, izobraževanje na daljavo, elektronsko sporočanje, iskanje informacij, itd., ki jih realizira s pomočjo internetskih storitev (telnet, www, news, ftp, gopher, itd).
Poenostavljeno je internet medmrežje, a deluje navzven kot enotno omrežje. Elementi omrežja komunicirajo med seboj po skupnem protokolu IP in uporabljajo skupno shemo naslavljanja. Omrežje nima predpisane hierarhije in integralnega upravljanja.

1.2 Storitve v sodobnih telekomunikacijah

Za uporabnike telekomunikacijskega omrežja so pomembne samo storitve in aplikacije ter njihova kakovost in cena, saj je le z njimi mogoče zadovoljevanje uporabnikovih potreb. Storitve vse bolj zamenjujejo tehnologijo kot gonilno silo razvoja telekomunikacij. V preteklosti so se telekomunikacije razvijale na osnovi tega, kar je ponujala tehnika. Storitve so čakale na tehnologijo in, ko je bila na voljo, je prišlo tudi do realizacije le-teh. Tehnika sedaj ni več omejujoči faktor, tako da storitve narekujejo tempo razvoja telekomunikacij. Postale so glavni vir prihodkov operaterjev telekomunikacij. Tehnika je samo se spodnji sloj prenosa, za katerega je pomembno predvsem, da zagotavlja primeren bitni pretok in kakovost ter čim nižjo ceno, katera tehnika je uporabljena, pa niti ni pomembno.

1.2.1 Razvoj telekomunikacij v preteklosti

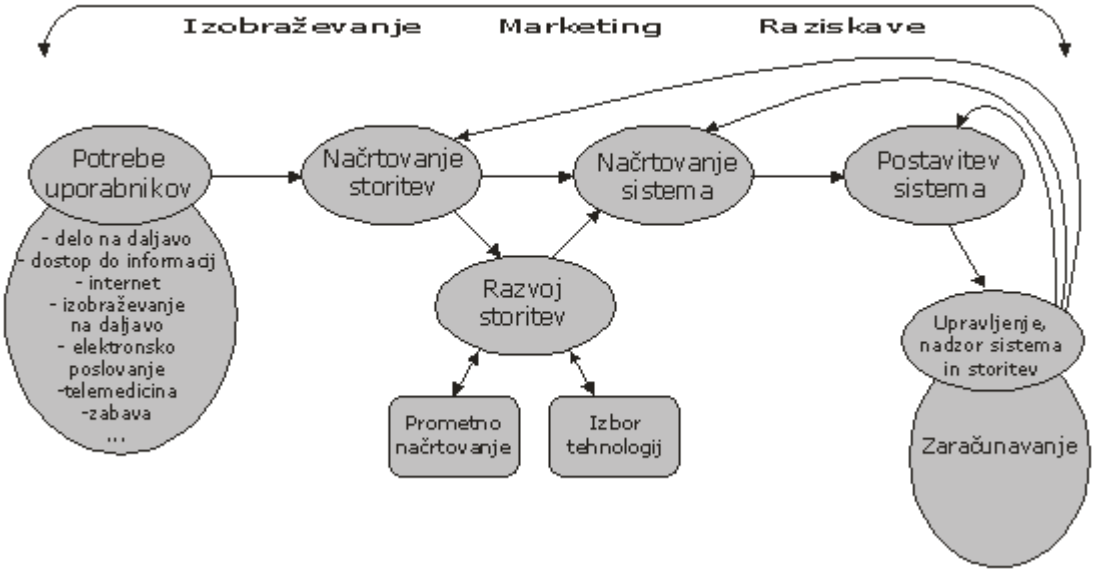
V skladu s prehodom razvojnih sil s tehnologije na storitve se spreminja tudi koncept razvoja naprav in predvsem storitev. V času, ko je tehnika pogojevala napredek v telekomunikacijah, je šlo predvsem za razvoj naprav ter postavitev sistema, ki je bil osnova za storitve. Razmere so prikazane na sliki 1-1. Telekomunikacije so bile tehnološko pogojene. Lahko bi rekli, da so storitve na nek način čakale na razvoj primerne tehnologije za primerno ceno.



Slika 1-1. Razvoj telekomunikacij v preteklosti.

1.2.2 Razvoj telekomunikacij v prihodnosti

Sodoben razvoj telekomunikacij opisanega pristopa ne dopušča več. V zgornji sliki ni nikjer uporabnikov telekomunikacij, ki so tista sila, zaradi katere telekomunikacije sploh obstajajo.



Slika 1-2. Sodobni telekomunikacijski inženiring.

Bistvo, iz katerega mora izhajati sodobni telekomunikacijski inženiring, so prav uporabniki in njihove zahteve. Pristop mora biti celovit. Na osnovi zahtev uporabnikov po različnih storitvah se le-te načrtujejo in razvijajo. Šele nato preidemo v fazo načrtovanja in postavitve omrežja. Celoten sistem je treba upravljati in nadzorovati. S tem je omogočen pregled nad omrežjem in zagotovljena množica koristnih informacij o delovanju omrežja ter trendih, tako storitvenih kot tudi prometnih. Te informacije se skupaj z definiranimi zahtevami uporabnikov uporabljajo za nadaljnje načrtovanje in izpopolnjevanje omrežja v smeri storitev. Zaračunavanje in skrb za uporabnika kot dve pomembnejši funkciji v omrežju se prav tako izvajata v sistemu za upravljanje in nadzor omrežja.
Tudi za definiranje potreb uporabnikov nam sistem upravljanja in nadzora omrežja zagotavlja veliko koristnih podatkov. Celotno shemo sodobnega telekomunikacijskega inženiringa prikazuje slika 1-2. Ne smemo pa pozabiti na veliko vlogo izobraževanja, raziskav in marketinga. Predvsem izobraževanje uporabnikov je bistvenega pomena, saj se predvsem na ta način uporabnikom vzbujajo potrebe po novih storitvah. Le izobražen uporabnik lahko dobro izkoristi možnosti, ki jih ponujajo telekomunikacije.

1.2.3 Sodobne potrebe in zahteve uporabnika

Z nastopom uporabnika kot glavnega dejavnika za načrtovanje omrežij in storitev je pomembno, da konsistentno definiramo njegove potrebe. Na grobo bi lahko potrebe uporabnikov razdelili na profesionalne in domače potrebe. Pri obeh tipih potreb gre razvoj v smeri povečevanja fleksibilnosti, uporabnosti, mobilnosti, učinkovitosti in udobja. Uporabniki zahtevajo močnejšo podporo komunikacijam, informacijam, izobraževanju, zabavi in kooperativnosti. To vodi do popolnoma novih načinov dela, učenja in zabave. Tehnika bo za te storitve uporabljena na veliko različnih načinov, predvsem lahko v tem kontekstu omenimo različne vrste teleaktivnosti.
V profesionalnem prostoru nove uporabniške zahteve zajemajo videokonference, multimedijsko elektronsko pošto, dostop do vseh vrst in oblik informacij, različne oblike elektronskega poslovanja, delo na daljavo in kooperativno delo.
Tipične nove storitve za domače okolje so videotelefonija, video na zahtevo in plačljiva televizija, interaktivna televizija, izobraževanje, zabava, elektronski časopis, knjige in knjižnice, igre ter navidezna resničnost.

1.2.4 Pomen storitev

Pomen storitev in aplikacij ter nujnost razvoja novih poudarja tudi Evropska skupnost. Navaja deset predlogov za storitve, ki naj bi spodbudile vzpostavitev informacijske družbe:

- delo na daljavo,
- učenje na daljavo,
- omrežja univerzitetnih in raziskovalnih centrov s prostim dostopom do njihovih knjižnic,
- daljinske storitve za majhna in srednje velika podjetja,
- upravljanje cestnega prometa, nadzor zračnega prometa,
- vseevropsko omrežje javne administracije,
- mestna multimedijska omrežja.

1.2.5 Zahteve storitev

Pri načrtovanju strukture omrežja je treba poleg ostalih parametrov poznati zahteve po bitnih pretokih za vsako storitev posebej. Nekatere zahteve po bitnih pretokih prikazuje slika 1-4. Te zahteve so ena izmed osnov za kasnejše načrtovanje omrežij.

1.2.6 Kakovost storitev (QoS)

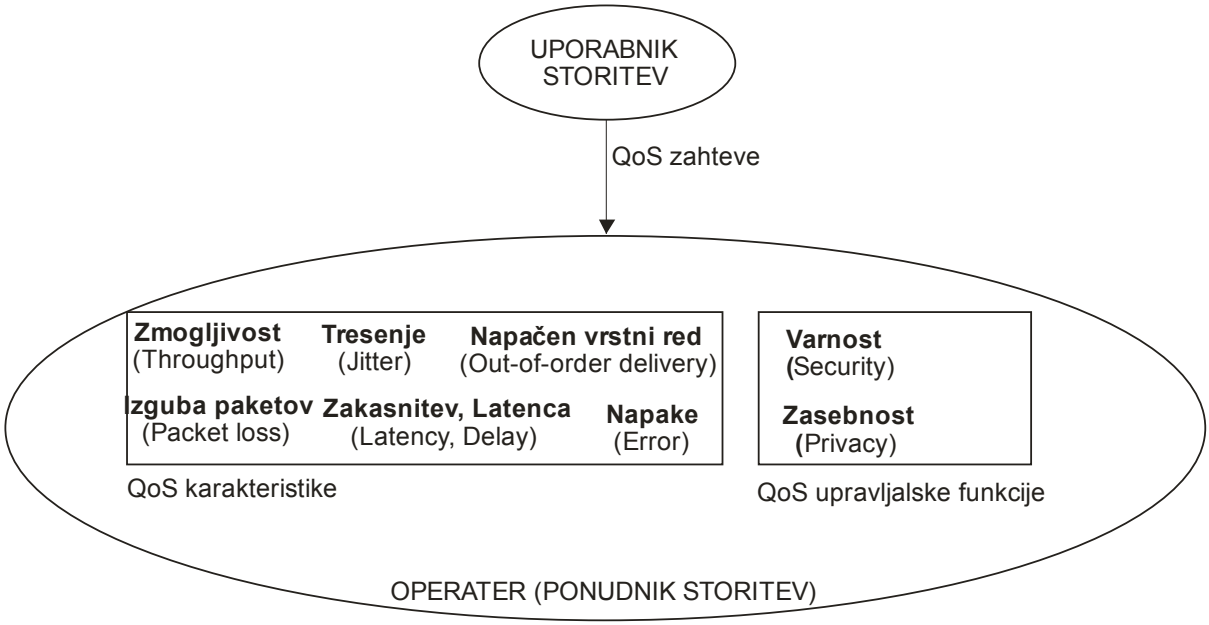
Ugotovimo lahko, da je današnji uporabnik zahteven in pričakuje več, kot mu današnja ločena omrežja lahko ponudijo. Pomemben vidik zagotavljanja storitev uporabniku je tudi kakovost storitev (***QoS - Quality of Service***) oziroma izpolnjevanje dogovora o nivoju le-teh (***SLA - Service Level Agreement***).

Operater oz. ponudnik storitev mora zagotavljati kakovost storitev. Na primer razpoložljivost omrežja, kot del ocene kakovosti storitev, se meri v stotinkah oziroma tisočinkah odstotkov (na primer 99,99 % ali 99,999 %). Slika 1-3 prikazuje zahteve uporabnikov storitev po kakovosti storitev.

Bistvenega pomena je tudi sposobnost operaterja, da uporabnikom zagotavlja varnost in zasebnost komunikacij.

Razvojni trendi	»Best effort« QoS		Zagotovljen QoS	
Realnost časa	Ni v realnem času		V navidezno realnem času	V realnem času
Odzivni čas	Ni zagotovljen	Ni zagotovljen	< 1 s	< 100 ms
Pasovna širina	Ni zagotovljena	Najmanjši zagotovljeni pretok >100 kbit/s	Najmanjši zagotovljeni pretok >100 kbit/s	Zagotovljeni pretok 1 Mbit/s

Tabela 1-1. Kakovost storitev.

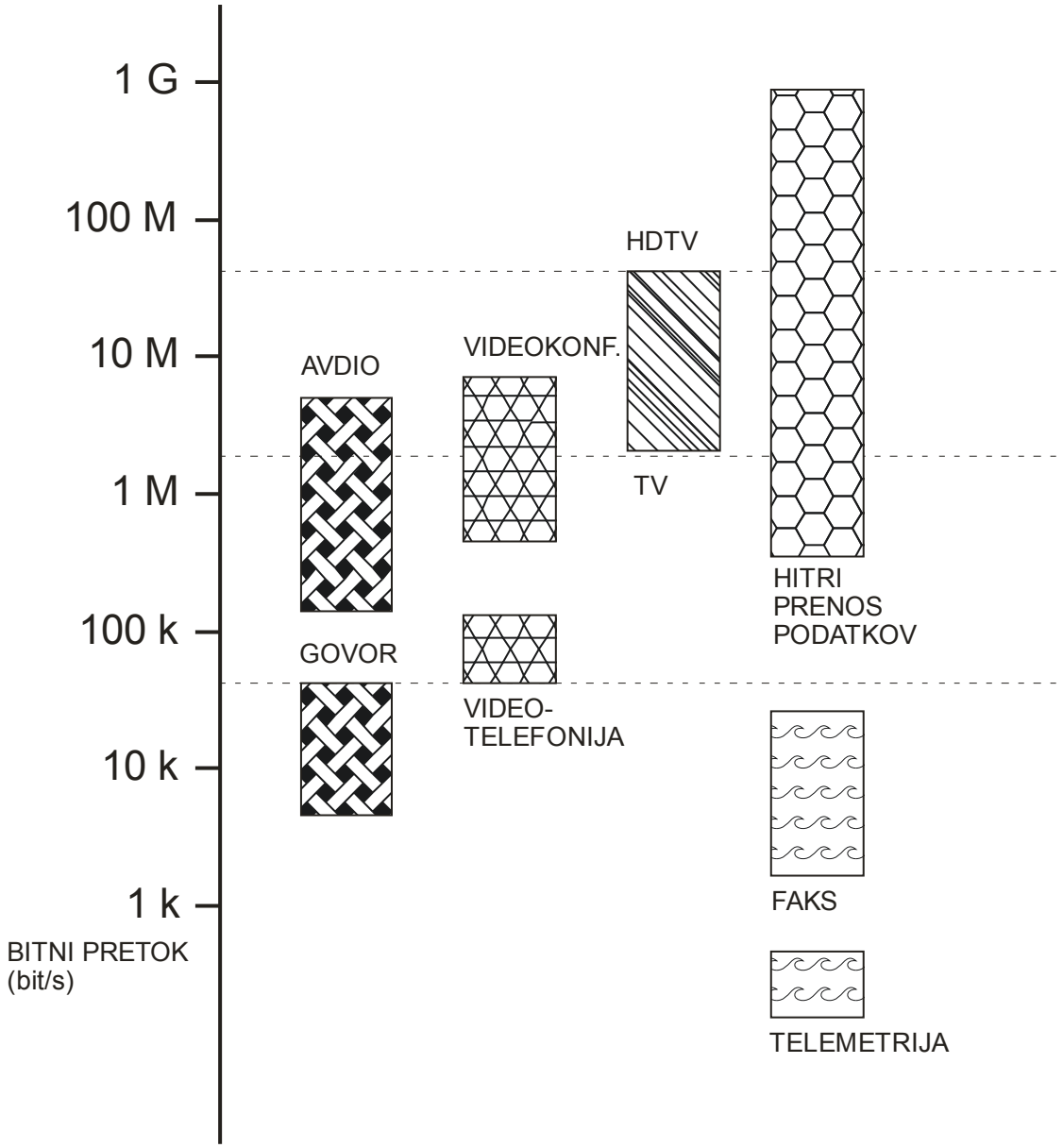


Slika 1-3. Zahteve uporabnika po kakovosti storitev.

Protokoli, ki omogočajo zagotavljanje QoS

- IP Differentiated services (DiffServ)
- IP Integrated services (IntServ)
- Resource reSerVation Protocol (RSVP)

- **Multiprotocol Label Switching (MPLS) ponuja osem razredov QoS**
- RSVP-TE
- Frame relay
- X.25
- Nekateri ADSL modemi
- Asynchronous Transfer Mode (ATM)
- IEEE 802.1p
- IEEE 802.1Q
- IEEE 802.11e



Slika 1-4. Delitev storitev glede na bitni pretok.

1.3 Informacijsko povezana družba in internet

Pojem informacijsko povezane družbe vsebuje dva dela:

1. **Povezana družba**, pod katero razumemo popolno povezanost institucij družbe (javna uprava), gospodarskih organizacij (industrija, trgovina, storitve,...) in posameznikov s širokopasovnimi zvezami (informacijska infrastruktura). Ta del je tesno povezan z razvojem telekomunikacij in razpoložljivo telekomunikacijsko tehnologijo.

2. **Informacijska družba**, ki mora zagotavljati odprtost virov informacij, ter razpoložljivost informacij v elektronski obliki. Vse to omogoča večjo učinkovitost družbe in se kaže v večji kvaliteti življenja slehernega uporabnika (državljana). Nedvomno morajo biti na tem področju v začetnem obdobju še posebej aktivne institucije javne uprave, ki morajo že po svoji osnovni funkciji uporabniku nuditi ustrezne informacije.

1.4 Razvoj telekomunikacijskih omrežij in interneta

V preteklosti je nastalo več omrežij, katerih razvoj je bil pogojen s storitvijo, ki jo je zagotavljalo določeno omrežje. Tako se je razvilo telefonsko omrežje, katerega osnovna storitev je bila govorna komunikacija. Radiodifuzijsko radijsko omrežje in omrežja kabelske televizije so bila namenjena za distribucijo radiodifuzijskega signala. Razvil se je internet, ki je bil namenjen izključno za podatkovne komunikacije. Radijski mobilni sistemi, kot npr. NMT in GSM, so nastali zaradi zagotavljanja mobilne govorne komunikacije, zaradi podobnih razlogov so bili razviti tudi satelitski sistemi. Energetska omrežja so zagotavljala distribucijo električne energije. Silovit razvoj tehnologije, ki je omogočil neslutene zmogljivosti ter cenenost računalniške in telekomunikacijske materialne opreme, pa danes vodi v združevanje teh omrežij. Tako danes v večini naštetih omrežij že poteka tako govorni kot podatkovni promet. Kot posledica tega tudi internet uporablja praktično vsa obstoječa in seveda tudi na novo zgrajena omrežja.

Predno se lotimo obravnave dostopov do interneta preko raznih omrežij, si oglejmo nekaj osnovnih lastnosti interneta s stališča njegovih potreb pri prenosu.

1.5 Uporaba interneta v informacijski družbi

Osnovna področja interneta v informacijski družbi so:

- **upravljanje državnih institucij, ki obsega**

  - učinkovito poslovanje in ustrezno obveščanje prebivalstva: objave uredb, pravilnikov in zakonov ter odločb,
  - poslovanje s prebivalci: upravne zadeve,
  - poizvedbe mnenj in možnosti demokratičnega odločanja prebivalstva,

- **poslovanje gospodarskih organizacij**

  - povezava dislociranih obratov in uradov,

- **izobraževanje**

  - informacijska podpora rednemu in dopolnilnemu šolstvu,
  - izobraževanje na daljavo predvsem na neformalni ravni, deloma tudi kot redno interaktivno izobraževanje preko spleta,
  - ponudba splošnih izobraževalnih vsebin,

- **nakupovanje in finančne storitve**

  - elektronsko oglaševanje in nakupovanje,
  - finančno poslovanje,

- **zdravstvo**

  - vodenje zdravstvenih podatkov prebivalstva,
  - vodenje poslovanja zdravstvenih zavarovalnic,

- **pasivna in interaktivna zabava**

  - oddaje glasbe in videa,
  - glasba in video po naročilu,

- **delo na daljavo**

  - v prvi fazi predvsem določene veje gospodarstva z zastopniki: zavarovalništvo, založništvo,
  - agencije za usluge,
  - avtorske storitve

Iz gornjega pregleda vidimo, da je zelo pomembna vloga interneta v gospodarstvu, upravi in pri prebivalstvu. Gospodarstvo in uprava sta velika sistema in bosta prisiljena preskrbeti ustrezno podporo za učinkovito uporabo interneta kljub večjim stroškom. Razmere so popolnoma drugačne pri prebivalstvu, ki dostop do interneta sicer potrebuje, odločilna pa sta cena opreme in stroški dostopa. Glede na dejstvo, da je krajevna razpršenost prebivalstva zelo velika, ne moremo iskati enovite rešitve dostopa do interneta. Nujno je najti več rešitev, ki bodo v določenem okolju omogočale najboljšo izbiro pri ustrezni ceni. Pogosto bodo naročniki izbrali manj kakovostne dostope za ceno manjših stroškov.

1.6 Tehnične zahteve prenosa pri internetnih storitvah

Pri prenosu podatkov v internetnih omrežjih moramo upoštevati značilnosti posameznih internetnih storitev. Te so v pretežni meri odvisne od narave prenašane informacije. Informacije posameznih storitev lahko razdelimo v naslednje osnovne značilne komponente: **podatki, tekst, zvok, mirujoče slike, video.**

Vrsta osnovne informacije in vrsta storitve bosta določali način prenosa.

Načine prenosa lahko razvrstimo

- *glede na zveznost toka podatkov ločimo:*

  - streaming – tekoč prenos
  - prenos v blokih

- *glede na pomen časovne dimenzije ločimo*:

  - prenos v realnem času
  - prenos brez časovne odvisnosti

- *glede na razmerje množine prenesenih podatkov od uporabnika in proti uporabniku ločimo:*

  - simetrični prenos
  - nesimetrični prenos

- *in glede na pogostost napak pri prenosu, ki zagotavlja sprejemljivo raven kakovosti posamezne storitve.*

Pregled internetnih storitev glede na način prenosa podaja tabela 2. Določene storitve zahtevajo specifične kombinacije značilnosti načina prenosa:

Prenos kot streaming pri zvokovnih in video storitvah. Pri streamingu sproti uporabljamo prenašano informacijo in ne čakamo na konec bloka, kot to velja pri standardnem prenosu blokov. Zaporednost informacije vsebuje časovno komponento, ki določa zaporednost pri predvajanju. Streaming internetnega radia ali videa imamo lahko od enega izvora k enemu ali več ponorov, kar predstavlja asimetrični prenos od ponudnika k uporabnikom storitve. Pri internetni telefoniji imamo

dvosmerni streaming ali simetrični prenos med dvema uporabnikoma. Dvosmerni prenos s streamingom imamo tudi pri interaktivnih igrah na spletu, ki vsebujejo animacijo.

Prenos blokov v realnem času imamo v mnogih storitvah, kjer zahtevamo kratek čas zakasnitve odziva. Pri tem informacija sploh ni časovno odvisna. Med takšne storitve sodijo brkljanje po spletu, branje elektronske pošte in prevzemanje spletnega radia v blokih. Pri brkljanju želimo neposredno po zahtevi dobiti hiter odgovor v obliki spletne strani. Na primer tako hitro, kot da bi bila stran že lokalno shranjena. Kaj je za uparabnika hiter odziv, je vprašljivo in odvisno od njegove zahtevnosti, vrste informacije in podobno. Literatura navaja zakasnitve pod 100 ms kot idealne. Sprejemljiva vrednost je v praksi pogosto nekajkrat večja.

Enako hitrost odziva kot pri brkljanju želimo tudi pri branju elektronske pošte, kar večinoma dosegamo, če so sporočila kratka in ne vsebujejo večjih pripetih datotek.

Prenos datotek večinoma štejemo med storitve, ki niso v realnem času. Ko datoteko odpošljemo, se začne prenos in čas prenosa je določen z obsegom datoteke in razpoložljivo prenosno hitrostjo zveze. Datoteka je naslovniku na razpolago šele tedaj, ko se izvrši prenos celotne datoteke. V tem je bistvena razlika od streaminga. Kolikor dlje časa čaka naslovnik na zaključek prenosa, tem manj je zadovoljen s storitvijo.

Storitev	Streaming v realnem času	Bločni prenos v realnem času	Prenos ni v realnem času
Brkljanje	Spletne strani vsebujejo avdio in video streaming	Spletne strani so brez časovno označenih informacij	
Elektronska pošta		Branje pošte s strežnika	Dostava pošte na naslovnikov poštni strežnik
Internetna telefonija	Da		
Interaktivne igre	Da	Da	
Radio preko interneta	Avdio streaming	Radio nalagamo kot datoteko	
Novice na zahtevo s slikami, zvokom in video izseki	Da	Da	
Dopisni klepet		Da	
Prenos datotek		Da	Da

Tabela 1-2. Razdelitev storitev interneta.

Za vse storitve v realnem času, kakor tudi za prenos datotek lahko določimo potrebne hitrosti na osnovi sprejemljive zakasnitve zaradi prenosa in tipičnega obsega datotek. Prikazani so v tabeli 3. Vsaka novejša navedba bo verjetno nekoliko povečala obsege datotek in potrebne hitrosti zaradi napredka tehnologije. Promet pri mnogih storitvah je izrazit le v eno smer in to od strežnika k uporabniku, kar je pomembno

pri načrtovanju prenosnih poti dostopa na splet. Prav tako je izredno pomembno poznavanje porazdelitev dolžine prenašanih blokov. Na primer pri prenosu datotek s protokolom TCP rabimo potrjevanje prometa v nasprotni smeri. Ta je v razmerju 1500 B : 64 B, kar da razmerje 23 : 1. Pri nekaterih drugih podobnih storitvah je to razmerje nekaj manjše, in sicer 9 : 1.

Za storitve s streamingom v realnem času potrebujemo veliko razpoložljivost prenosnih poti. To bistveno zmanjšamo s stiskanjem (kompresijo) podatkov. V tabeli 1-4 je podano nekaj značilnih storitev z zahtevanima pasovnima širinama v obe smeri zveze. Iz podanih razpredelnic ugotovimo, da potrebno hitrost dostopa do interneta narekujeta predvsem hitrost odziva (brkljanje, prenos datotek) in prenosna hitrost streaminga (pri zvokovnih in video storitvah). Če razmere ne dovoljujejo večjih prenosnih hitrosti na dostopu, smo omejeni le na določene storitve in še te so lahko uporabniku manj prijazne.

Storitev	Zakasnitev bloka	Vrsta bloka	Obseg enote podatkovne storitve	Minimalna prenosna hitrost
Brkljanje po spletu	100 ms	Tipičen spletni objekt	3 kB	240 kb/s
	100 ms	Obsežen spletni objekt	20 kB	1,6 Mb/s
Prenos datotek	1 min	Obsežna programska aplikacija	10 MB	1,3 Mb/s
Spletne igre brez animacije	50 ms	Ukazi	500 B	80 kb/s
Klepet	1 s	Besede	100 B	0,8 kb/s

Tabela 1-3. Minimalne prenosne hitrosti glede na zakasnitev storitve.

Storitve streaminga v realnem času	Potrebna pasovna širina po kompresiji	
	Proti naročniku	Od naročnika
Avdio		
Stereo, kakovost CD, 10 Hz – 20kHz	256 kb/s	
Zvok, 50 Hz – 7 kHz, G.722	64, 56, 48 kb/s	
Govor, 300- 3400 Hz , G.711	64 kb/s	64 kb/s
Govor, telefonska kakovost, G.723.1	6,4/5,3 kb/s	6,4/5,3 kb/s
Video		
TV visoke ločljivosti	20 Mb/s	
Video na zahtevo, MPEG 1	1 -2 Mb/s	
Videokonferenca, H.261	64 kb/s -2 Mb/s	
Videokonferenca, H.263	< 28,8 kb/s	< 28,8 kb/s

Tabela 1-4. Zahtevane hitrosti prenosa pri zvokovnih in slikovnih storitvah.

1.7 Hierarhična razdelitev omrežij

Kje je ozko grlo povezav na internetu? Oglejmo si hierarhijo omrežja, preko katerega se prenašajo spletne informacije do privatnega uporabnika na domu. Omrežje povezav lahko po funkcionalnosti razdelimo na tri plasti, kot prikazuje slika 1-5:

- Najvišjo plast predstavlja **hrbtenično internetno omrežje**, s katerimi so povezani veliki ponudniki informacij v globalnem prostoru. Ti posredujejo informacije prek zelo zmogljivih računalniških sistemov. Njihove informacije potujejo po hrbteničnih optičnih omrežjih telekomov in za internet zgrajenih omrežij izredno velikih prenosnih hitrosti.

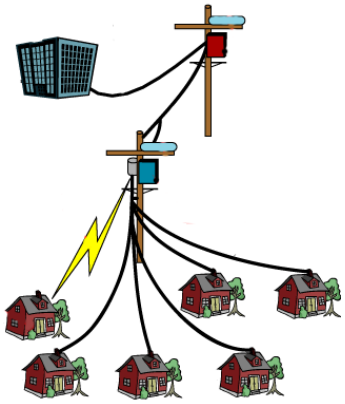
- Srednjo plast tvorijo **dostopovna omrežja**, preko katerih so informacije interneta iz hrbteničnega omrežja posredovane posameznim končnim uporabnikom interneta. Sedaj do njih vodijo dejansko le žične telefonske zveze, ki v osnovi niso bile načrtovane za hiter podatkovni prenos. Poleg telefonskega omrežja uporablja velik del prebivalstva tudi omrežja kabelske televizije. Gradnja optičnega dostopovnega omrežja do prebivalstva je v teku. Vedno bolj postajajo pomembna tudi brezžična dostopovna omrežja v frekvenčnih področjih nad 2 GHz.

- Najnižjo plast predstavljajo **hišna** ali stanovanjska **omrežja**. V Evropski skupnosti je delež osebnih računalnikov na 100 prebivalcev 81, prav tako v Sloveniji. Podatek nam pove, da se povečuje število gospodinjstev oz. družin z dvema ali več računalnikov. Za učinkovit priključek več računalnikov na internet po domovih potrebujemo ustrezno ceneno lokalno omrežje. Razvoj komponent hišnih omrežij je v izrednem razmahu in cene so v zadnjih letih padle na raven, ki omogoča njihovo širšo uveljavitev.

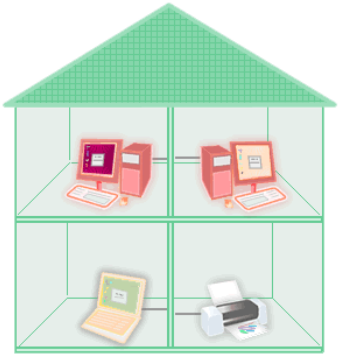
Trdimo lahko, da obstoječa mednarodna in medkrajevna omrežja nudijo zadostno hitrost in kapaciteto za najvišjo plast internetnih povezav. Nujno moramo razrešiti problem povezav do naročnikov v mestih in naseljih, kar predstavlja srednjo plast omrežja interneta. Zato moramo razviti dostopovno omrežje.

Hrbtenična omrežja

Dostopovna omrežja



Hišna omrežja



Slika 1-5. Hierarhična razdelitev omrežij.

2 Dostopovna omrežja

Dostopovna omrežja smo določili kot omrežja, ki so vezni členi med širokopasovnimi internetnimi omrežji in posameznimi naročniki. Zveze dostopovnih omrežij so sorazmerno kratke in večinoma ne presegajo 5 kilometrov. Trenutno prevladujejo tehnološke rešitve dostopa na osnovi žičnih (fizičnih) vodov, v naslednjih letih pa pričakujemo nagel vzpon brezžičnega dostopa. Tehnološke rešitve dostopa so:

A) ŽIČNE ZVEZE

- **telefonsko omrežje**

  - klasične analogne telefonske zveze POTS (Plain Old Telephone Service)
  - digitalne telefonske zveze ISDN (Integrated Services Digital Network)
  - širokopasovne digitalne zveze po naročniški liniji DSL (Digital Subscriber Line)

- **po omrežju kabelske televizije CATV (Cable TV)**

  - po koaksialnih kablih
  - po hibridnih optičnih zvezah HFC (Hybrid Fiber-Coax)

- **optične zveze**

- **zveze po energetskih vodih**

in

B) BREZŽIČNE ZVEZE

- **prizemne brezžične zveze**

  - razdelilna omrežja
  - mobilna omrežja
  - lokalna omrežja

- **satelitske zveze**

  - sateliti GEO (Geostationary Earth Orbit), MEO (Medium Earth Orbit), LEO (Low Earth Orbit)
  - aeronavtične ploščadi

Gornje tehnološke možnosti dostopa bomo sistematično obdelali v nadaljevanju.

Žični dostop

Zgodovinsko gledano so prve telekomunikacijske povezave temeljile na kovinskih vodih. Te vode so vgrajevali v kable, ki so jih večinoma zakopali v zemljo ali v mestih položili v kabelsko kanalizacijo. Kabelska omrežja so rasla, tako da imamo sedaj večino telefonskih naročnikov priključenih na omrežja kovinskih vodov. Omrežja predstavljajo ogromno vrednost in pretežen del te vrednosti je v polaganju kablov. Telefonski priključki vode zelo slabo izkoriščajo, večinoma le za prenos govornega signala širine le 3 kHz, čeprav so prenosne sposobnosti vodov znatno večje. S pomočjo ustrezne opreme sodobne tehnologije lahko vode lokalnih priključkov uporabimo za digitalni prenos podatkovnih signalov preko bistveno širšega frekvenčnega obsega. Na tej osnovi lahko ponudimo izredno velikemu številu domov dostop do interneta ob zmernih stroških in hitrostih, ki vedno ne omogočajo večine internetnih storitev.

Za dostop do interneta so primerna tudi omrežja kabelske televizije. V tern primeru moramo le nadgraditi sistem, da bo poleg signala televizijskih programov omogočil še dostop do interneta.

Do vsakega doma imamo vedno napeljano elektroenergetsko omrežje. Žal za telekomunikacijske prenose to ni zelo primerno predvsem zaradi nehomogenosti in visokega nivoja motenj. Z zelo izpopolnjeno tehnologijo pa lahko tudi energetsko omrežje nadgradimo za prenos internetnih signalov zmernih hitrosti.

Uvajanje svetlobnih vlaken kot vodnikov je omogočalo izredne prenosne hitrosti. Že z zelo preprosto in ceneno opremo k optičnem vlaknu bi hitro zadovoljili se tako visoke zahteve internetnih storitev. V začetku je bila cena vlakna visoka. Z razvojem tehnologije se je vlakno znatno pocenilo in večina stroškov je le se v vgradnji kablov. Pokrivanje večjih področij z optičnim omrežjem do domov zunaj mest predstavlja izredno velik vložek, kar je osnovni zadržek pri dostopu do interneta po optičnih poteh.

Za dostope prek žičnih omrežij lahko podamo naslednje osnovne ugotovitve:

- Omrežja s kovinskimi žičnimi vodi vodijo skoraj do vsakega doma in z dopolnjevanjem lastnosti prenosnih poti na osnovi sodobne tehnologije lahko omogočimo dostop do interneta ob sorazmerno nizkih stroških. Kakovosti dostopov ne zadoščajo za vse internetne storitve.

- Dostop do interneta preko optičnih vodov sicer izpolnjuje vse zahteve internetnih storitev, vendar so stroški izgradnje omrežij visoki. Omrežja s celotnim pokrivanjem vsega prebivalstva določene regije so nekoliko cenejša, vendar ne poceni. Morebitno gradnjo

optičnih omrežij morajo narekovati se druge potrebe, ki lahko opravičijo vložena sredstva.
- Visoki vložki v gradnjo novih omrežij z vodniki bodo vzrok, da bo pogosto prišlo do zamenjave z brezžičnimi omrežji. Pri teh je porazdelitev investicijskih stroškov zaradi postopne gradnje mnogo ugodnejša.

Brezžični dostop

Brezžični dostop se odlikuje po enostavni priključitvi uporabnika na omrežje, saj fizična povezava s kovinskim ali optičnim vodnikom ni potrebna. Povezava med uporabnikom in omrežjem je brezžična, običajno radijska.

To prinaša vsaj dve prednosti v primerjavi z žičnim dostopom:

- Uporabniki so praviloma lahko mobilni znotraj geografskega področja, ki ga pokriva določen brezžični sistem.
- Operater lahko zagotovi hitrejše in cenejše geografsko pokrivanje s storitvami, saj ni potrebna razpeljava fiksnega omrežja neposredno do uporabnika.

Seveda obstajajo tudi slabosti, med katerima sta najbolj očitni:

- večje omejitve glede prenosnih hitrosti, ki so posledica omejenosti in dragocenosti frekvenčnega spektra,
- večja izpostavljenost prenašanega signala motnjam in šumu na prenosni poti.

Premik tehnologije k vse višjim frekvencam, pri katerih so razpoložljive širine frekvenčnega spektra vse večje, in uspešne tehnike kodiranja zvez močno zmanjšujejo težo naštetih slabosti. V zadnjem času je v zadnjih kilometrih oziroma metrih do uporabnika opazna težnja prehajanja iz žičnega na brezžični prenos.

Poznamo več vrst sistemov z brezžičnim dostopom. Delimo jih lahko glede na lokacijo radijske postaje in pripadajoče antene, iz katere omrežje pošilja radijski signal do uporabnika. Po tem kriteriju delitve ločimo:

1. *prizemne sisteme*, ki imajo celotno infrastrukturo zgrajeno na Zemlji. Ločimo **razdelilna omrežja**, kamor štejemo npr. LMDS, MMDS HIPERACCESS in WiMAX IEEE 802.16 sisteme, **mobilne sisteme**,

kamor spada npr. sistem GSM, in **lokalna brezžična omrežja**, kamor štejemo brezvrvične (cordless) sisteme, kot npr. DECT, ter sisteme za brezžičen dostop do lokalnih omrežij WLAN, kot npr. HIPERLAN in IEEE 802.11. Razdelilna in lokalna brezžična omrežja omogočajo praviloma višje prenosne hitrosti od mobilnih sistemov.

2. *satelitske sisteme*, ki sevajo radijske signale iz satelitov zunaj Zemljine atmosfere. Satelitske sisteme lahko nadalje ločujemo glede na višino in obliko tirnic, po katerih se gibljejo sateliti. Poznamo nizke (LEO), srednje (MEO) in geostacionarne (GEO) tirnice.

Razumljiva je, da z večanjem oddaljenosti oddajnika od zemeljskega površja povečujemo geografsko področje, ki ga lahko pokriva oddajna postaja z določene lokacije. Z oddajnikom prizemnega sistema lahko pokrijemo teritorij velikosti nekaj 10 km, medtem ko s satelitom v geostacionarni orbiti pokrijemo tretjino zemeljske oble.

V nadaljevanju sledijo podrobnejši opisi posameznih rešitev.

2.1 Telefonsko omrežje

Na vsem svetu je preko 1,3 milijarde telefonskih priključkov. Telefonsko naročniško omrežje, ki je načrtovano za prenos govornih signalov, želimo uporabiti za hitri prenos digitalnih signalov s hitrostjo vsaj 1 Mbit/s. Z izdatno podporo elektronike lahko s sorazmerno majhnimi vložki pri telefonskih operaterjih in naročnikih izkoristimo obstoječa lokalna telefonska omrežja. Dobimo rešitev, ki pa je omejena pri nadaljnjem razvoju.

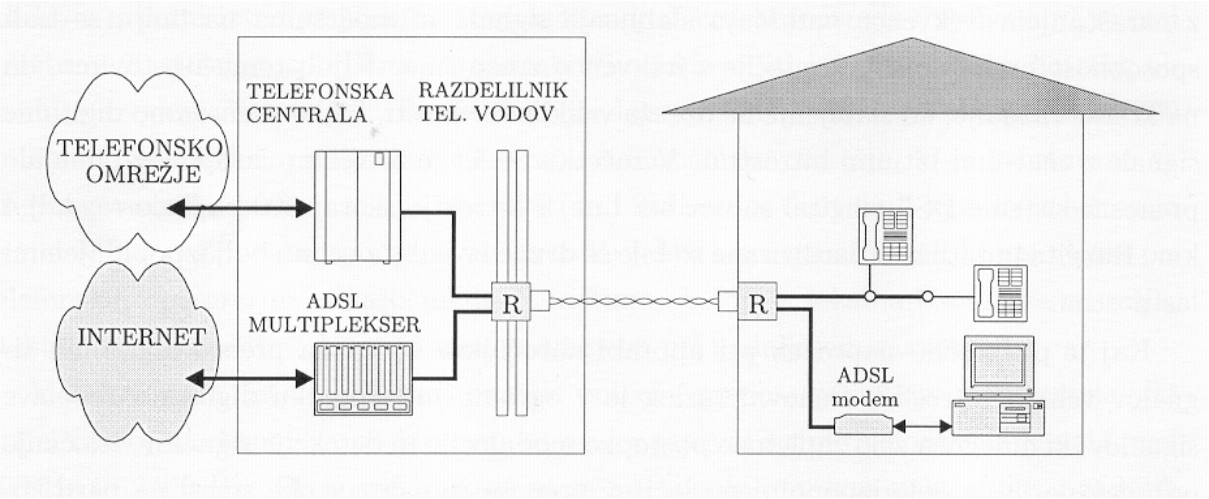
V začetku 70. let se je zaradi nastale potrebe prenosa podatkov med računalniki pričel razvoj modemov za podatkovni prenos v pasovni širini telefonskega kanala med 300 Hz in 3400 Hz. Prenosne hitrosti so se z izpopolnjevanjem elektronike v zadnjih tridesetih letih povečale več kot stokrat od 300 b/s (V.21) do 33.600 b/s (V.34bis). Z omenjenimi modemi lahko prenašamo digitalne signale preko javnega telefonskega omrežja med telefonskimi naročniki različnih lokacij. Zadnji dosežek razvoja je modem V.90, kjer lahko preko ene analogne linije znotraj telefonskega kanala 4 kHz dosežemo proti odjemalcu prenosno hitrost do 56 kb/s.

V 80. letih so začeli raziskovati uporabo naročniške linije za digitalni prenos. Ker z naraščanjem frekvence naraščata slabljenje signala in moč šuma na liniji, se tudi sposobnost prenašanja informacije s frekvenco zmanjšuje. Kljub temu ugotovimo, da na kratke razdalje, ko slabljenje ne doseže velikih vrednosti, lahko prenašamo digitalne signale z znatnimi

bitnimi hitrostmi. V začetku 90 let je že več proizvajalcev ponujalo prenosne sisteme DSL (digital subscriber line) s hitrostjo skoraj 800 kb/s do razdalj 4 km. Razvite in tudi standardizirane so bile še druge izvedbe z vedno bolj izpopolnjenimi lastnostmi.

Kaj je povzročilo napredek pri uporabi naročnikih vodov za prenos digitalnih signalov velikih hitrosti? Osnovni razlog je v napredku digitalne obdelave signalov, ki omogoča zelo zapletene postopke modulacije in detekcije signalov, izločanje odbojev na liniji, izpopolnjeno ločitev prenosa signalov v obe smeri na paru kovinskih žic telefonske linije in izravnavo prenosne karakteristike telefonske linije.

Ker so naročniške linije vodene iz centrale prek kabla z do nekaj sto naročniških linij, lahko pričakujemo medsebojne sklope med linijami. Ti sklopi povzročajo prehajanje signala z ene linije predvsem na sosednje, v načelu pa na vse linije znotraj kabla. Pri analognih govornih kanalih smo neželene signale iz sosednih vodov imenovali presluh, ime pa se je ohranilo tudi pri obravnavi digitalnega prenosa. Presluhi med linijami naraščajo s frekvenco in so pri govornih signalih nizkih frekvenc sorazmerno majhni. Pri prenosu digitalnih signalov velikih hitrosti je uporabljen bistveno širši pas frekvenc, zato so presluhi poleg slabljenja osnovni omejilni faktor.

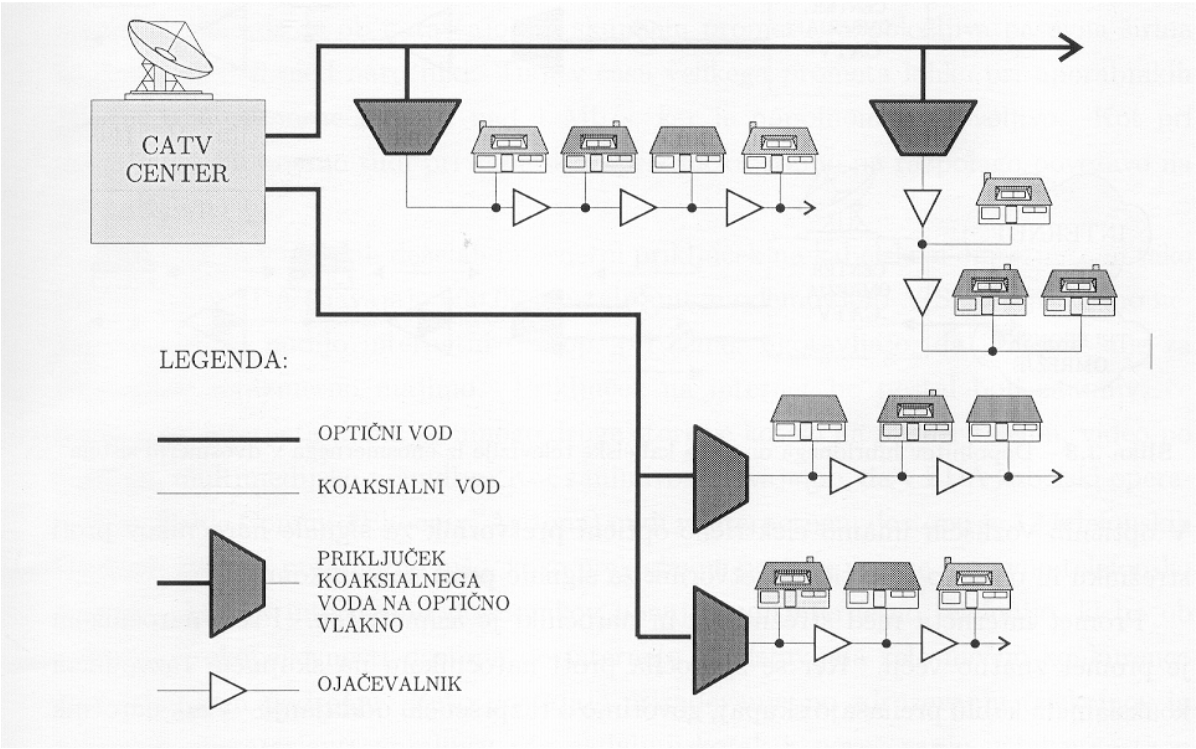


Slika 2-1. Ločitev digitalnega in analognega signala pri ADSL dostopu.

Če analiziramo kvaliteto dostopa do interneta preko modemov z izbiranjem in ADSL modemom, ugotovimo poleg povečanja prenosne hitrosti še nove prednosti. Uporabnik ADSL ima vedno na razpolago osnovni telefonski priključek in neprekinjeno zvezo s strežnikom interneta.

2.2 Omrežje kabelske televizije

Hiter razvoj televizijskih kabelskih omrežij v 90 letih je spodbudila želja televizijskih gledalcev po širšem izboru programov TV, ki bi presegali lokalni in nacionalni značaj. Napredek v izboru so prinesli novi tematsko usmerjeni TV programi: informativni, športni, poljudnoznanstveni, glasbeni, otroški in drugi. K investicijam v televizijsko kabelsko omrežje so morali naročniki prispevati precejšen delež. Ta obsežna infrastruktura se je izkazala kot primerna osnova za širokopasovni dostop do interneta. Zagotavljala je dovolj pasovne širine, edina pomanjkljivost je bila le v enosmerni komunikaciji od ponudnikov programov proti naročnikom. Struktura omrežja je narisana na sliki 2-2 in vsebuje več napajalnih vodov, ki so bodisi optični ali koaksialni kabli.

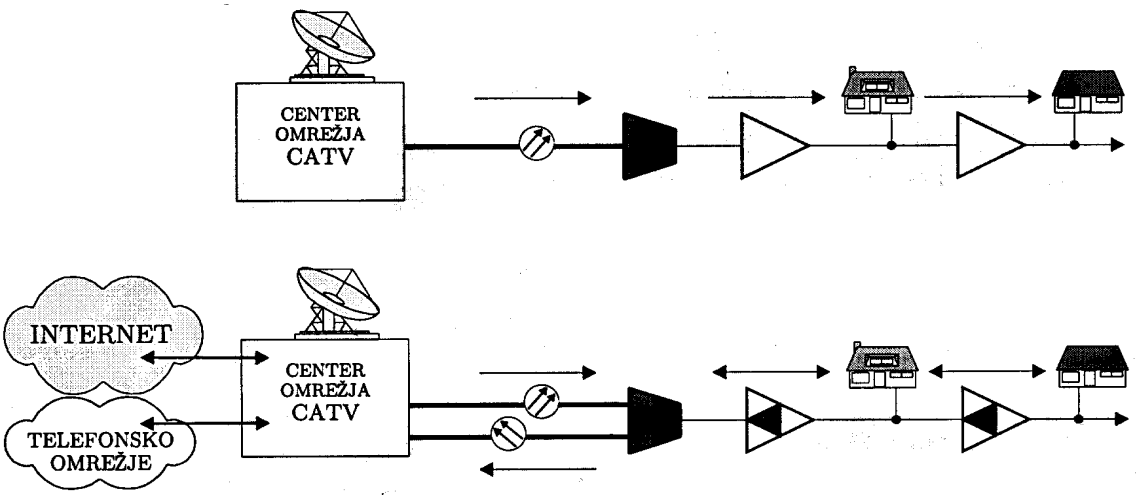


Slika 2-2. Struktura omrežja kabelske televizije.

Ti vodi napajajo s signali televizijskih programov vozlišča, na katere so priključeni razvodni vodi. Na razvodne vode so preko odcepnih točk neposredno priključeni naročniki. Napajalni kakor tudi razvodni vodi morajo imeti na določenih razdaljah vključene ojačevalnike, ki kompenzirajo slabljenje vodov in zagotavljajo posameznim naročnikom predpisani nivo signalov. Oprema koaksialnih vodov z ojačevalniki preprečuje prenos signalov v povratni smeri, zato ni mogoča dvosmerna komunikacija brez dodajanja opreme. Zasilna rešitev, ki ponuja vzpostavitev povratnega kanala preko telefonske zveze, se ni uveljavila.

Za dostop do interneta potrebujemo dvosmerne povezave med strežnikom v glavni postaji in naročniki. Napajalnim vodom, ki so večinoma optični

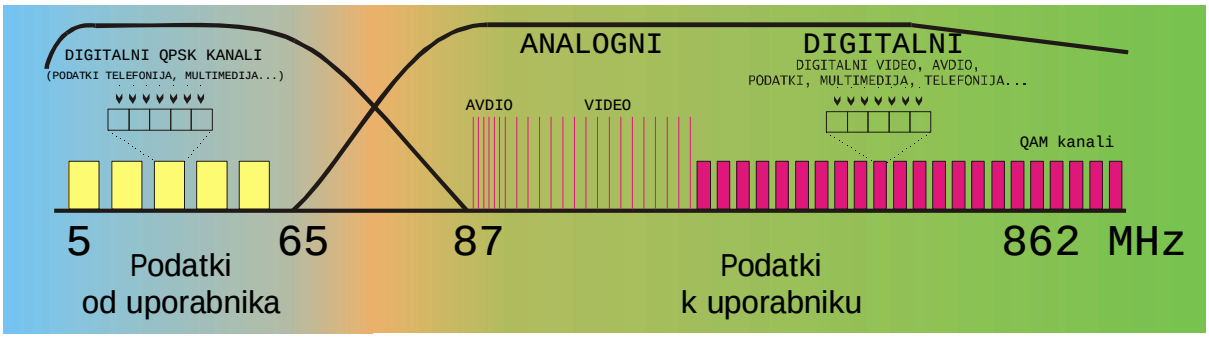
kabli, dodamo še en optični vodnik kot povratno pot za internet. Razvodne koaksialne vode moramo opremiti z dvosmernimi ojačevalniki, da se lahko razširjajo signali v obe smeri, seveda vsak v ločenem frekvenčnem področju. Omrežje, ki uporablja optične in koaksialne kable imenujemo hibridni sistem HFC (Hybrid-Fiber-Coax). Na sliki 2-3 je nakazana dopolnitev enosmernega omrežja kabelske televizije v dvosmerni sistem za priključitev naročnikov na internet. Koaksialne krake dopolnimo le z dvosmernimi ojačevalniki.



Slika 2-3. Dopolnitev hibridnega omrežja kabelske televizije iz enosmernega v dvosmerni sistem.

V optičnih vozliščih imamo električno-optični pretvornik za signale naročnikov proti strežniku in optično-električni pretvornik za signale proti naročnikom.

Promet interneta med strežnikom in naročniki je asimetričen. Proti naročnikom je promet znatno večji. Ker se sporočila proti naročnikom na skupnem razvodnem koaksialnem kablu prenašajo skupaj, govorimo o razpršenem oddajanju. Vsak naročnik dobi želeno sporočilo na osnovi svojega naslova, neželeno prisluškovanje pa preprečimo z ustreznim zaščitnim kodiranjem.



Slika 2-4. Frekvenčna delitev razpoložljive pasovne širine prenosnega sistema CATV.

V Sloveniji je priključek na internet prek televizijskega kabelskega omrežja zelo razširjen. Drugod po Evropi in v azijskih deželah internetni priključek na kabelskem omrežju ni tako pogost. Dopolnitev kabelskega omrežja s povratno potjo od naročnikov k ponudniku je finančno precej zahtevna. Digitalni prenos poteka s frekvenčno ločitvijo smeri prenosa preko dveh rezerviranih TV kanalov (slika 2-4). Za prenos do uporabnikov (downlink) je izbran TV kanal v frekvenčnem območju 87 - 862MHz, za povratni kanal (uplink) pa je izbran po frekvenci nižje ležeči TV kanal (5-65MHz). V TV kanalu, ki je namenjen prenosu proti naročnikoma, se uporabljata modulacijska postopka 64-QAM in 256-QAM. Za povratni kanal, kjer je dodeljena manjša pasovna širina (200 kHz - 3,2 MHz), sta izbrana modulacijska postopka QPSK in 16-QAM, novejši standard DOCSIS 3.0 pa predvideva za povratni kanal tudi uporabo modulacijskih postopkov 32-QAM, 64-QAM in 128-QAM in uporabo večje pasovne širine povratnega kanala 6,4 MHz. Zasebnost naročnikov je varovana z enkripcijo podatkov v obe smeri zveze (DES, RSA, …). Omenjene hitrosti niso na razpolago le enemu naročniku temveč vsem naročnikom, ki so vezani na posamezen kabelski krak omrežja. To število obsega od 600 do 2000 naročnikov. Ker si delijo isto prenosno pot, bodo v času večjega prometa lahko posamezni naročniki razpolagali z zmanjšano hitrostjo prenosa. Zmanjševanje hitrosti naročniku mora biti nadzorovano, tako da se ob naraščajočem skupnem prometu razpoložljiva pasovna širina enakomerno deli med naročniki. Tudi v času velikega prometa lahko pri uporabnikih pričakujemo prenosne hitrosti nad 1 Mb/s, kar je popolnoma zadovoljivo. Kot pri dostopu ADSL imamo tudi pri kabelskem priključku povezavo na internet stalno na razpolago.

Večina kabelskih modemov omogoča tudi mehanizme QoS, vgrajene imajo tudi pretvornike med sistemom IP telefonije in analogno telefonijo. To omogoča enostaven priklop analognih telefonov na ponudnika IP telefonije, omrežje pa zagotovi prioriteto govornemu prometu pred podatkovnim.

2.3 Optično omrežje

Sodobne telekomunikacijske storitve, predvsem pojav storitev trojčka – triple play, do katerih uporabniki v večini primerov dostopajo preko zelo razvejane infrastrukture bakrenih paric, so v celoti izkoristile vso razpoložljivo pasovno širino, ki jo fizični medij nudi. Z optimizacijo modulacijskih postopkov in postopkov kanalskega kodiranja smo se v praktičnimi prenosnimi hitrostmi precej približali teoretični prenosni hitrosti na danem mediju, ki jih narekuje razmerje signal šum in pasovna širina.
Ker se razvoj sodobnih telekomunikacijskih storitev na tej točki ne bo ustavil, temveč bodo uporabniki zahtevali vedno več, ugotavljamo, da je srednjeročno in dolgoročno nujna nadgradnja bakrene infrastrukture z

optično, ki nam lahko zaradi svojih fizikalnih zakonitosti nudi dovolj velike prenosne hitrosti.
Tehnologijo imenujemo FTTH in pomeni Fiber to the home ali vlakno do doma.

Za zagotavljanje trenutnega nivoja storitev trojčka zadostuje prenosna širina 10Mbit/s, ki jo še omogoča bakrena infrastruktura. Le-ta danes zagotavlja relativno hiter dostop do interneta, IP telefonsko linijo in en IP TV kanal standardne ločljivosti.
V bližnji kratkoročni prihodnosti bo potrebno storitev trojčka nadgraditi z dodatnim kanalom televizije visoke ločjivosti (HDTV – High Definition Television), več kanali televizije standardne ločljivosti in še hitrejših dostopom do interneta, še večji pomen pa bodo imele aplikacije P2P (Peer to Peer) za izmenjavo datotek med uporabniki. Tovrstni paketi bodo zahtevali prenosne hitrosti med 30 in 50 MBit/s, česar pa ni več mogoče zagotavljati preko bakrene infrastrukture. Prav tako storitve v srednjeročni prihodnosti, ki bodo poleg prej naštetega v paketu vključevale dodatne HDTV kanale in še hitrejši podatkovni prenos pri dostopu do storitev interneta.

Operaterji, ki se zavedajo, da bodo dolgoročno lahko ostali v konkurenčnem boju za uporabnike, že uvajajo tehnologijo FTTH do svojih končnih uporabnikov. Pri tem se zastavlja vprašanje kakšno tehnologijo izbrati, da bo gradnja čimbolj stroškovno učinkovita, hkrati pa bo dolgoročno zagotavljala dovolj visoke hitrosti prenosa podatkov do končnega uporabnika in nazaj.

V tem gradivu predstavljamo dva možna pristopa k izgradnjo tovrstnih omrežij in sicer omrežja točka-točka P2P (E-P2P) (Ethernet Point to Point) in omrežja točka-več točk P2MP, ki so večinoma realizirane s pasivno optično opremo, zato jih imenujemo omrežja PON (Passive Optical Network). Vsaka topologija ima svoje prednosti in slabosti.

2.3.1 Kako nadgraditi bakreno omrežje v optičnega

Vmesna faza med trenutnim stanjem in končnim stanjem, kjer bo celotno dostopovno omrežje temeljilo na tehnologiji optičnih vlaken, so tehnologije FTTC (Fiber-To-The Curb, FTTZ (Fiber to the Zone) ipd, kjer nadomestimo bakreno infrastrukturo do nekega področja ali razdelilnega jaška in s tem zmanjšamo oz. skrajšamo razdaljo bakrene infrastrukture med ponudnikom storitev in naročnikom. Bistveno cenejše je polaganje vlakna, ki lahko napaja več naročnikov kot pa gradnja infrastrukture do vsakega posameznega naročnika. Pri tovrstnih tehnologijah potem v razdelilnih raških oz. ustreznih objektih, kjer se optično omrežje zaključi

namestimo ustrezno opremo za pretvorbo signala iz optičnega v električnega.
Zaradi prej opisanih razvojnih smernic je opisana tehnologija lahko le vmesni korak do popolno optičnega omrežja, ki bo tudi končna stopnja razvoja optičnega telekomunikacijskega dostopovnega omrežja.

Pri gradnji optičnega omrežja do naročnika ugotovimo, da je glavnina stroškov povezanih z zemeljskimi deli pri gradnji infrastrukture, le manjši del pa je dejanski strošek kablov z optičnimi vlakni. To pomeni, da je ob takšni gradnji smiselno položiti več vlaken kot jih je v danem trenutku potrebno. Tudi življenjska doba položenih vlaken je nekaj desetletij, kar je bistveno več kot je življenjska doba aktivne opreme, ki zaključuje vlakna.

Optična omrežja do naročnika (FTTH), kot se gradijo po svetu v teh letih, lahko v grobem delimo na aktivna in pasivna. Osnovna definicija pravi, da so aktivna omrežja tista, ki imajo v omrežju elemente, ki za delovanje potrebujejo električno energijo, medtem ko pasivna omrežja napajanja ne potrebujejo. Tako aktivna kot pasivna omrežja so lahko zgrajena tako, da omogočajo dvosmerno komunikacijo med ponudnikom storitev in naročnikom preko enega samega vlakna ali pa za takšno komunikacijo potrebujejo par vlaken.

Arhitekture FTTH omrežij lahko razdelimo v dve skupini in sicer točka-točka P2P – Point to Point druga pa točka-več točk P2MP – Point to Multi Point.
P2P arhitektura uporablja zvezdno topologijo, P2MP pa drevesno topologijo, največkrat v kombinaciji s topologijo obroča in topologijo vodila.

2.3.2 Arhitektura P2P z zvezdno topologijo omrežja

Značilnost zvezdne topologijo je, da ima vsak uporabnik svoje vlakno, katerega si ne deli z ostalimi uporabniki. Takšen pristop bistveno podraži izgradnjo omrežja, saj je potrebno položiti mnogo vlaken, poleg tega pa moramo imeti za vsakega uporabnika na strani operaterja po eno sprejemno-oddajno enoto OLT optični linijski terminal (Optical Line Terminal) in pri naročniku OLT – optično omrežno enoto (Optical Network Terminal)

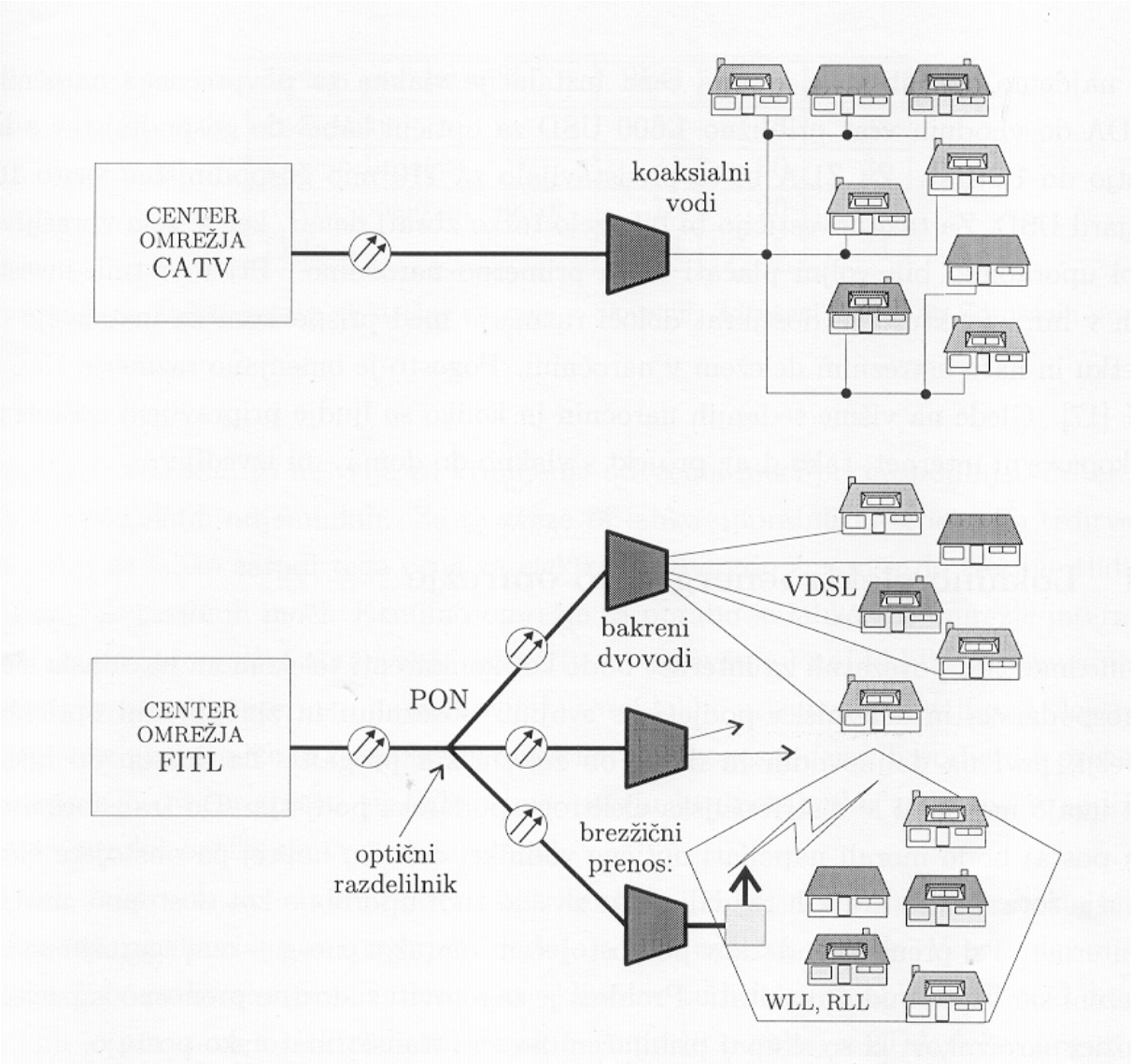
Protokol drugega sloja, ki ga uporabljamo v teh omrežjih je Ethernet. IEEE je v družini standardov Etherneta 802.3 definiral 802.3ah kot Ethernet v optičnih dostopovnih omrežjih na naslednje načine:

- 100 BASE-LX (100 Mbit/s simetrično, dvovlakenski sistem)
- 100 BASE-BX (100 Mbit/s simetrično, enovlakenski sistem)
- 1000 BASE-LX (1 Gbit/s simetrično, dvovlakenski sistem)
- 1000 BASE-BX (1 Gbit/s simetrično, enovlakenski sistem)

Zadnja nadgradnja standarda ima oznako 802.3ea in omogoča prenosne kapacitete do 10 Gbit/s simetrično.

2.3.3 Arhitektura P2MP z drevesno topologijo omrežja

Omrežja P2MP največkrat imenujemo Pasivna Optična Omrežja (PON), saj nanje ne moremo enostavno priključiti enostavne aktivne komunikacijske opreme, npr. Ethernet stikala, kot je to praksa v P2P zvezdnih topologijah omrežij.
Glavna prednost pasivnih optičnih omrežij PON je minimalno porabo vlakna za dostop do naročnikov in s tem povezani manjši stroški izgradnje omrežja. Slabost omrežij PON je višja cena terminalne oprema zaradi potrebe po multipleksiranju signalov in zagotavljanje ločevanja signalov, ki potujejo po isti infrastrukturi, vendar so namenjeni različnim naročnikom priključenim na isto vodilo. Zato uporabljamo različne načine multipleksiranja signalov in sicer časovno multipleksiranje, valovnodolžinsko multipleksiranje in multipleksiranje s pomočjo električnih podnosilcev.
Slika 2-5 prikazuje podobnost med omrežjem HFC in PON P2MP. V obeh primerih pripeljemo optično omrežje čim bližje uporabnikom, tam pa uporabimo brezžične tehnologije ali VDSL za hitri dostop do podatkovnih omrežij. Literatura za slednje uporablja izraz FITL (Fiber In The Loop), kjer eksplicitno povemo, da je PON omrežje pripeljano samo do področja pokrivanja in ne nujno do vsakega uporabnika.



Slika 2-5. Struktura omrežja za kabelsko televizijo z razpršenem oddajanjem in za optično omrežje FITL.

1. Optični signal pasivno razcepimo po moči na več enakih delov. Razcepniki moči so ponavadi izdelani za ločevanje na 16 ali 32 delov. Razdeljene optične signale vodimo po vlaknu do posameznega doma brez vsake elektronike. Če ima uporabnik le enosmerno komunikacijo, potrebuje le optični detektor. Za internet potrebujemo asimetrično dvosmerno komunikacijo, zato dodamo poleg razcepnika še združevalnik.
2. Optični signal pretvorimo v električnega in ga preko žične ali brezzične zveze povežemo do naročnika. Dolžina teh zvez ne more biti daljša od nekaj sto metrov, če hočemo zagotoviti zares širokopasovni prenos nad 100 Mb/s.

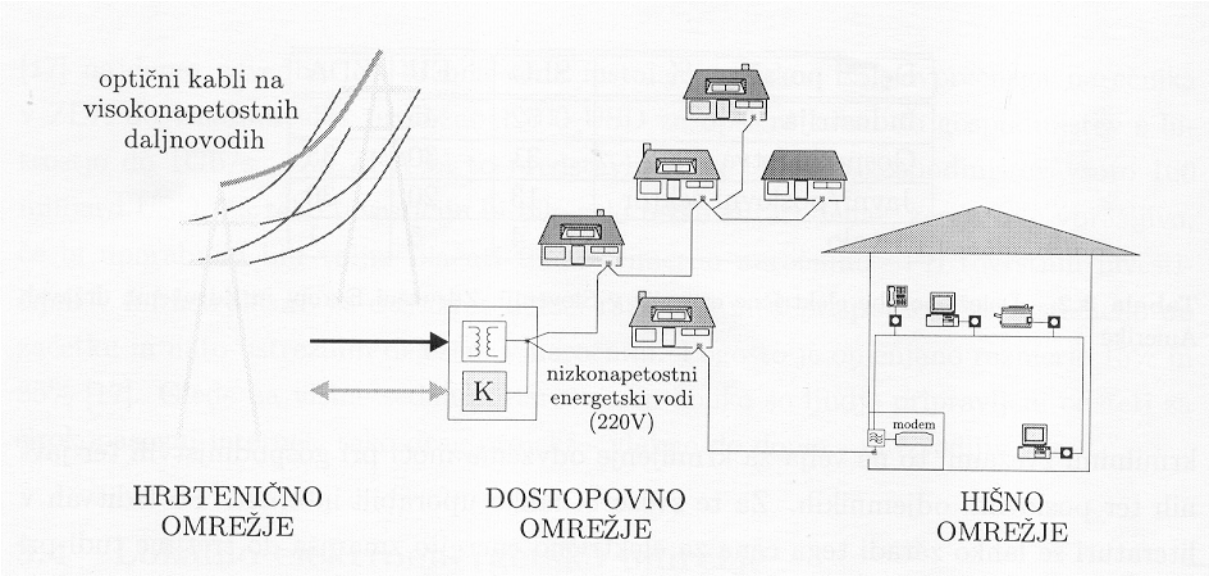
2.4 Lokalno elektroenergetsko omrežje

Pri medmestnih povezavah za internet kot konkurenti telekomom nastopajo elektrogospodarska in železniška podjetja s svojimi obsežnimi in zmogljivimi optičnimi omrežji, prvi na daljnovodih in drugi ob železniških progah. Za dostop do hišnih vrat imajo možnosti le distribucijska elektrogospodarska podjetja. Do transformatorskih postaj morajo napeljati optične vodnike, od tam naprej pa imamo obstoječe žično omrežje sorazmerno kratkih razdalj, ki ga lahko uprabimo kot dostopovno omrežje za internet. Pri prenosu podatkov po obstoječem energetskem omrežju so že bili doseženi vzpodbudni rezultati, vendar je kljub temu še vedno problem zagotoviti zadostno prenosno kapaciteto množici naročnikov, ki so skupaj priključeni na eno transformatorsko postajo.

Lep primer uporabe tehnologije je vas Vrsno na Primorskem. Tam Elektro Primorska zagotavlja 2 Mbit/s priključek vsaki hiši v vasi, kjer sicer alternativna infrastruktura ni na voljo.

Druga rešitev je napeljava optičnega kabla do vsakih vhodnih vrat, kar bi bilo sorazmerno drago, vendar ne neizvedljivo. To se v sedanjem času dogaja s pomočjo elektrodistribucijskih podjetij predvsem do poslovnih uporabnikov. Žal elektrogospodarstvo še vedno ne vidi možnosti, ki bi jih tovrsna infrastruktura prinašala. Vsaka novogradnja, ki potrebuje gradbeno dovoljenje vključuje obvezno soglasje elektrodistribucije za priključitev na elektroenergetsko omrežje. Vsem novim strankam bi lahko že v izhodišču ponudili polek elektrike tudi širokopasovni komunikacijski priključek in se tako izognili dvakratnim gradbenim delom – izkop za elektriko in izkop za optiko.

Možnosti, ki jih nudi omrežje elektrogospodarstva za dostop na internet, podaja slika 2-6. Transformatorske postaje naj bi bile za dvosmerni prenos internetnih signalov povezane s svetlobnimi vodniki, delno po že obstoječih zvezah daljnovodnega omrežja. V Evropi posamezni transformatorji napajajo z omrežno napetostjo 230 V približno 300-400 domov. Iz transformatorjev vodijo kovinski vodniki v vsak dom.



Slika 2-6. Omrežje elektrogospodarstva za dostop na internet.

Preko teh povezav moremo z ustrezno tehnologijo na kratkih razdaljah zagotoviti širokopasovni prenos na osnovi razpršene oddaje s hitrostjo do 10 Mb/s proti naročniku. Obstajajo tudi že rešitve za prenos s hitrostjo 2 Mb/s. Kot prenosni način se bo verjetno uveljavil postopek z razširjenim spektrom. V smeri od uporabnika bo tudi potrebno zagotoviti prenos ustrezno manjše hitrosti.

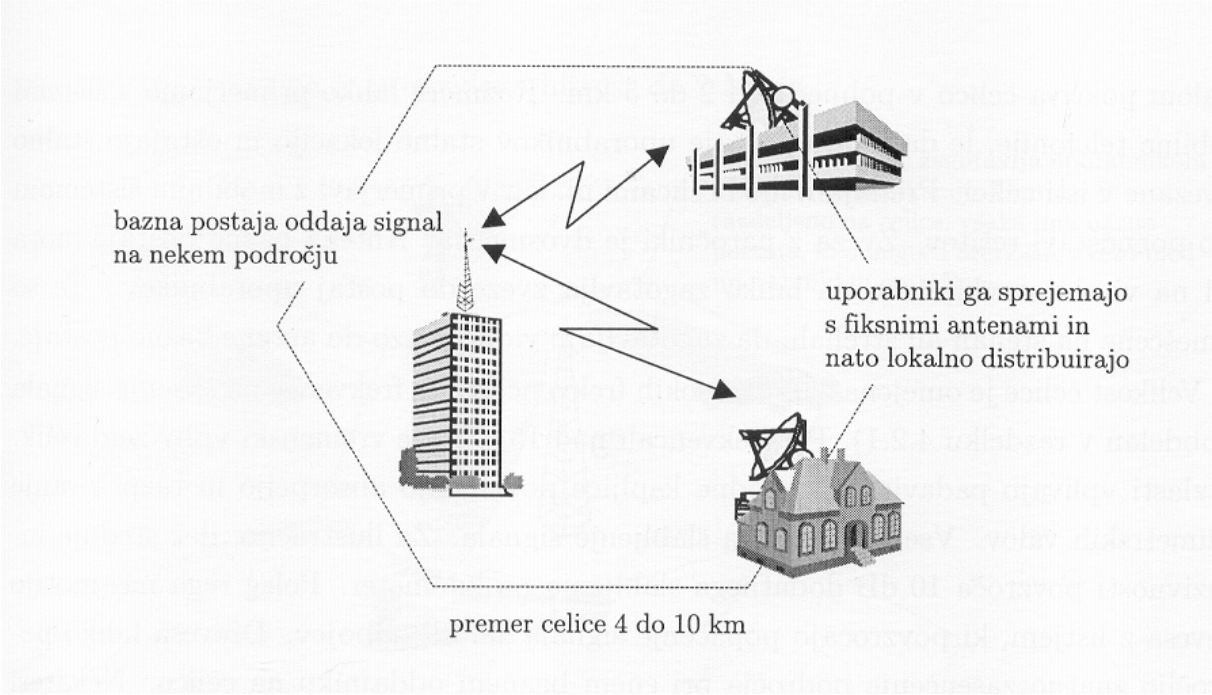
V zadnjem času so izredno zanimiva tudi hišna omrežja, ki so lokalna omrežja na osnovi energetske napeljave po stanovanju.

2.5 Brezžična razdelilna omrežja

To so omrežja, ki jih uporabljamo za brezžično premostitev razdalje do uporabnikov v zadnjih kilometrih. Takšen način je zanimiv zaradi hitrega in cenejšega pokrivanja terena z omrežjem brez polaganja žic ali optičnih vlaken. Značilnost teh omrežij je, da niso namenjena mobilnemu naročniku. Sprejemna antena uporabnika je fiksna, ponavadi montirana na strehi ali steni stavbe, do katere je speljan signal. Princip je prikazan na sliki 2-7.

Telefonska industrija že dolgo pozna takšne sisteme pod imenom brezžična lokalna zanka (WLL – Wireless Local Loop) ali radijska lokalna zanka (RLL – Radio Local Loop). Ti so služili za prenos telefonskih zvez.

Sistemi WLL se predvsem v telekomunikacijsko manj razvitih državah še vedno intenzivno gradijo.



Slika 2-7. Princip brezžičnega razdelilnega omrežja do fiksnih naročnikov.

Na tem področju se je zelo uveljavil tudi DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications), ki je bil sicer načrtovan za brezvrvično telefonijo bolj lokalnega značaja. Vendar pa telefonski sistemi praviloma ne nudijo večjih prenosnih hitrosti, zato jih ne bomo posebej obravnavali.

Bolj zanimiva za dostop uporabnikov do podatkovnih omrežij so širokopasovna brezžična razdelilna omrežja. V Ameriki sta se do nedavnega na tem področju uveljavljali kratici LMDS (Local Multipoint Distribution System) in MMDS (Microwave Multipoint Distribution System), v Evropi pa FWA (Fixed Wireless Access) in bolj splošna BWA (Broadband Wireless Access), zdaj pa je na tem področju nejpomembnejši standard IEEE 802.16 ali WiMAX.

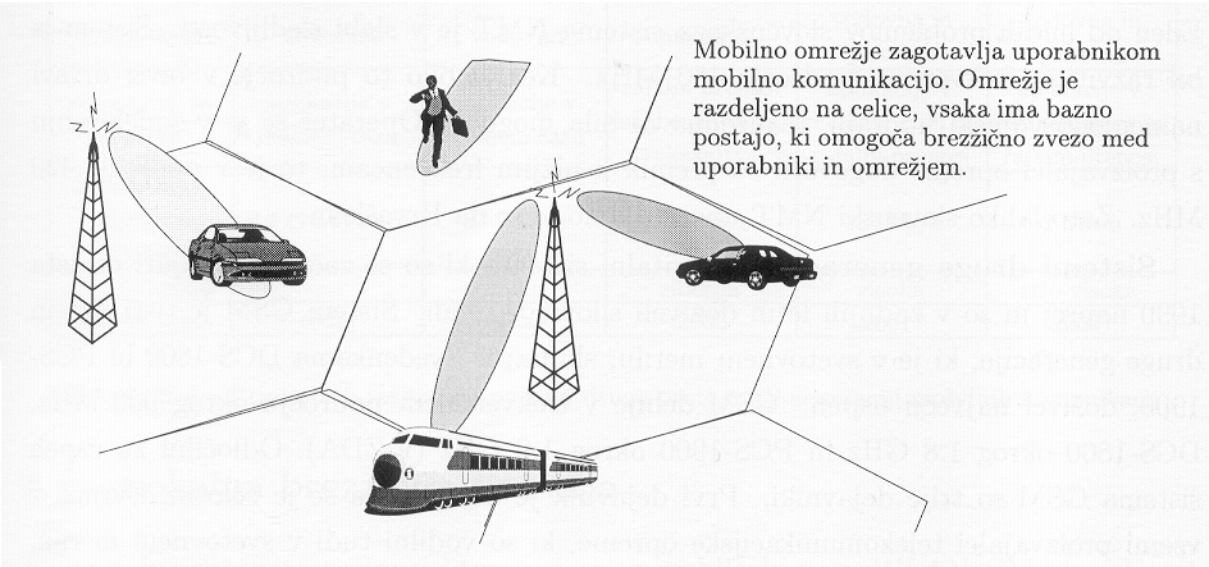
WiMAX (Worldwide interoperability for microwave access – svetovna interoperabilnost mikrovalovnega dostopa) je koalicija akterjev brezžične industrije, katere naloga je izpopolnitev in uvedba standarda IEEE 802.16 za brezžična širokopasovna omrežja. Tehnologija WiMAX 802.16 omogoča večpredstavne storitve prek brezžične povezave in ima domet okoli 50 kilometrov.

Brezžični širokopasovni trg je v porastu. V zadnjih letih beležimo hitro rast. Posledica rasti je padec cen terminalske opreme za končne uporabnike.

Sledila bo konvergenca sistema WiMAX s sistemi četrte generacije mobilnih komunikacij (4G).

2.6 Mobilna omrežja

Med vsemi brezžičnimi omrežji so danes v najširši uporabi mobilna telefonska omrežja. Osnovni namen teh omrežij je zagotavljanje komunikacij mobilnim uporabnikom (slika 2-8). Do nedavnega so bile to v glavnem govorne storitve, danes pa so razvojne aktivnosti močno usmerjene v smeri podatkovnih prenosov. Mobilna omrežja so postala eden od zelo pomembnih načinov dostopa do interneta.



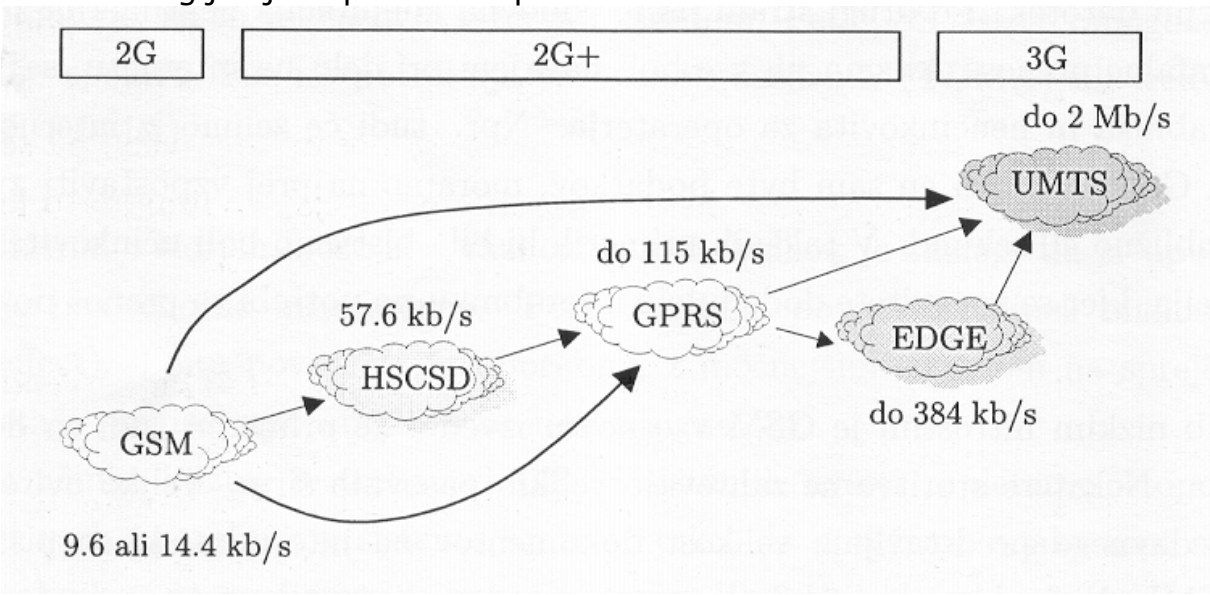
Slika 2-8. Dostop uporabnikov do storitev preko mobilnega omrežja.

Mobilna omrežja delimo na več generacij generacije, od katerih je tretja še vedno v razvojni fazi, a smo že kljub temu na poti proti četrti generaciji.

Sistemi prve generacije so analogni sistemi, ki jih časovno uvrščamo med leti 1980 in 1990. Načrtovani so bili izključno za prenos govornega signala, zato so za dostop do podatkovnih storitev neuporabni. Sistem te generacije, ki deluje v Sloveniji, je NMT. Deluje na frekvencah okrog 420 MHz. Ker se radijski signali nižjih frekvenc bolje razširjajo po prostoru (glej poglavje 3), sistem NMT v določenih predelih še danes izkazuje boljše pokrivanje od novejšega sistema GSM, ki deluje na višjih frekvencah.

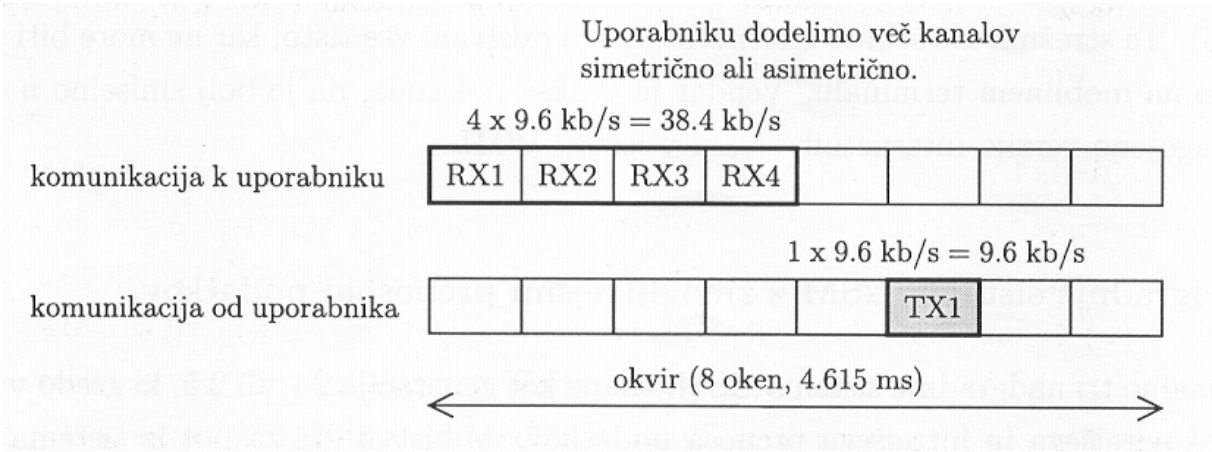
Sistemi druge generacije so digitalni sistemi, ki so se začeli pojavljati od leta 1990 naprej in so v zadnjih letih doživeli silovit razmah. Sistem GSM je tisti sistem druge generacije, ki je v svetovnem merilu, skupaj z izvedenkama DCS-1800 in PCS-1900, doživel največji uspeh. GSM deluje v frekvenčnem področju okrog 900 MHz, DCS-1800 okrog 1,8 GHz in PCS-1900 okrog 1,9 GHz (v ZDA). Odločilni za uspeh sistema GSM so trije dejavniki. Prvi dejavnik je dejstvo, da se je celotna Evropa z vsemi proizvajalci telekomunikacijske opreme, ki so vodilni tudi v svetovnem merilu, poenotila in sprejela en sam standard. Drugi dejavnik so tehnične značilnosti sistema, med katerimi je zelo pomembna zlasti možnost prehajanja uporabnika med omrežji različnih operaterjev. Tretji dejavnik je sprostitev monopolov na trgu telekomunikacij, kar je povzročilo padec cen storitev mobilnih komunikacij.

Prehod med drugo in tretjo generacijo pomeni nadgradnjo sistema GSM z zmogljivejšim prenosom podatkov.



Slika 2-9. Razvoj mobilnih sistemov iz druge v tretjo generacijo.

HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) omogoča simetrično in asimetrično dodeljevanje več kanalov sočasno istemu uporabniku. Princip je prikazan na sliki 2-10. Komutacija je še vedno vodovna. V prvi fazi se predvideva dodelitev največ štirih kanalov v smeri k uporabniku, kar omogoča podatkovne hitrosti do 4 • 9600 b/ s = 38400 b/ s pri navadnem in 4 • 14400 b/ s = 57600 b/ s pri izboljšanem kanalu. Te hitrosti so za današnje razmere že kar solidne in primerljive z dostopi z analognim modemom preko telefonskega omrežja.



Slika 2-10. Dodeljevanje več kanalov istemu uporabniku pri HSCSD nadgradnji sistema GSM.

GPRS (General Packet Radio Service) uvaja v sistem GSM paketni prenos. To pomeni, da omrežje uporabniku ne dodeli kanala za ves čas komunikacije, temveč mu ga dodeljuje po potrebi za prenos posameznih paketov, dinamično in v skladu s prostimi kapacitetami. Takšen način je zelo primeren za kratkotrajne rafalne prenose podatkov. Druga sprememba, ki jo uvaja GPRS, je sprememba kanalskega kodiranja. S postopkom kanalskega kodiranja podatkom dodajamo redundantne bite, ki omogočajo zaščito podatkov na prenosu. Z manjšanjem velikosti posameznih celic pa se razmere na prenosni poti izboljšujejo. Tako lahko uporabimo šibkejše kodiranje, to je dodamo manj redundantnih bitov, kar omogoča višje podatkovne hitrosti.

Hitrosti GPRS presegajo 100 kb/s. GPRS je pomembna nadgradnja, ki se je brez dvoma uveljavila, saj v vodovno komutirani sistem GSM prvič uvaja paketno komutacijo. Ta je primernejša za rafalne prenose podatkov. GPRS je uporabnike mobilnih komunikacij je zelo približal internetnemu omrežju.

EDGE (Enhanced Data Rates for GSM/Global Evolution) je zadnja iz serije nadgradenj sistema GSM, ki predvideva spremembo modulacije. V GSM se uporablja modulacija z minimalnim frekvenčnim pomikom z Gaussovim filtriranjem GMSK. To je zelo robustna modulacija, kjer prenašamo 1 bit na simbol. Zaradi boljših razmer na prenosni poti, je možno dodati tudi manj robustno modulacijo. EDGE bo dosedanji modulaciji GMSK dodal še modulacijo 8-PSK, kjer z enim simbolom opišemo 3 bite. To v principu omogoča trikrat višje hitrosti. EDGE omogoča podatkovne hitrosti do 384 kb/s.

Sistemi tretje in četrte generacije, poznamo jih pod kratico IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000). Odpravljajo marsikatero slabost sistemov prve in druge generacije.

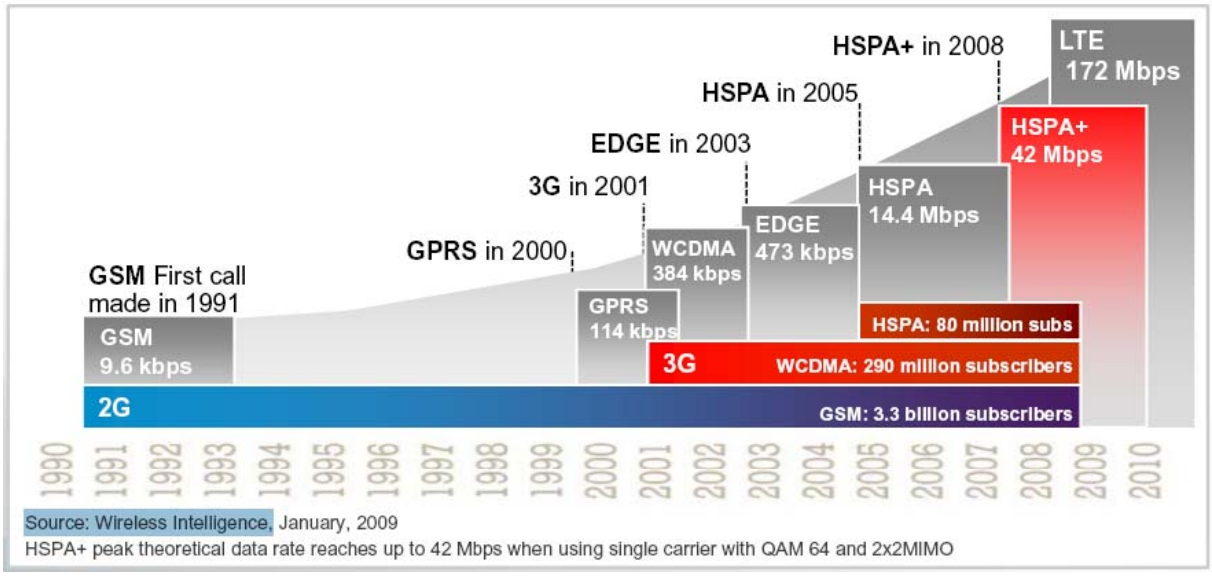
Sistem tretje generacije v Evropi je UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Razvija tudi kot tehnologija bodoče četrte generacije mobilnih telekomunikacij. Najpogosteje prenos podatkov poteka prek tehnologije W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access), ki omogoča hkratni prenos podatkov v obe smeri (uplink in downlink). Radiofrekvenčni kanali so široki 5 MHz, hkratni uplink in downlink pa potekata pri različnih frekvencah, kar teoretično pomeni hitrosti prenosa podatkov do 14 Mbit/s, ki pa jih uporabniki v praksi ne morejo polno izkoristiti.

V smeri razvoja proti četrti generaciji srečamo tehnologije HSPA (High Speed Packet Access) in LTE (Long Term Evolution).

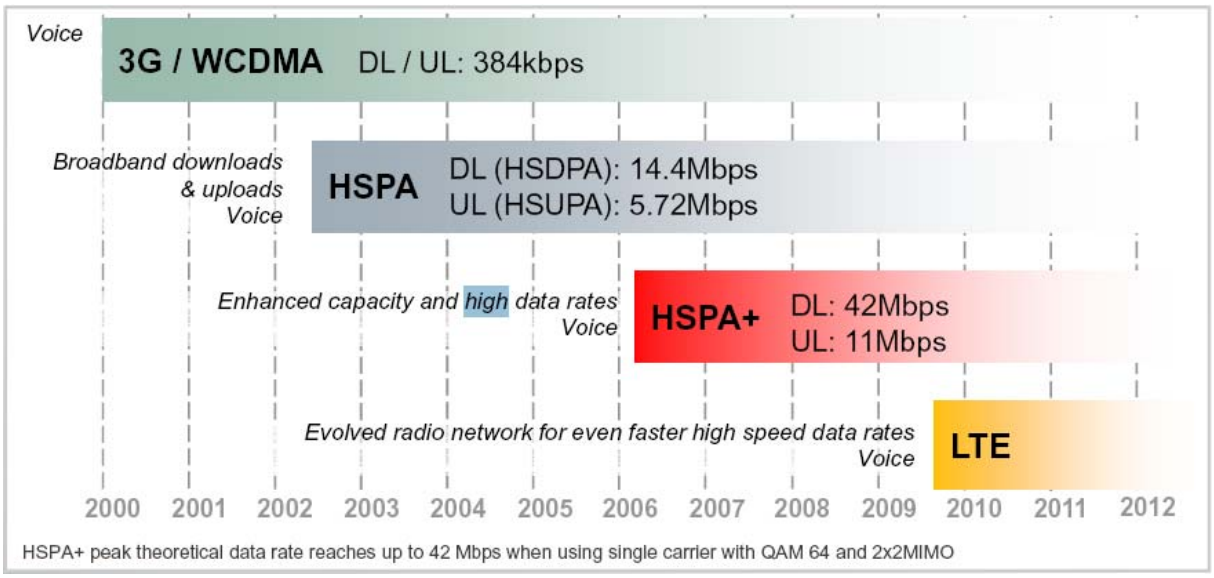
Sistemi mobilnih komunikacij so gotovo med bolj zanimivimi in obetajočimi dostopovnimi tehnologijami. Časovni plani in hitra rast števila uporabnikov kažejo na izredno propulzivnost področja mobilnih komunikacij. Prenosne hitrosti, ki jih bodo omogočali sistemi 3,5 in četrte generacije, obetajo hiter brezžičen dostop do interneta. Razvoj sistemov bo v Evropi v prihodnje nedvomno ena od glavnih smernic razvoja ne samo brezžičnih, temveč podatkovnih komunikacij nasploh.

	GSM	HSCSD	GPRS	EDGE	HSPA	HSPA+	LTE
komutacija	vodovna	vodovna	paketna	paketna	paketna	paketna	paketna
najvišja hitrost prenosa	9,6(14,4) kb/s	57,6 kb/s	115 kb/s	384 kb/s	14,4 Mb/s	42 Mb/s	172 Mb/s

Tabela 2-2. Primerjava rešitev na poti od druge proti četrti generaciji mobilnih komunikacij.



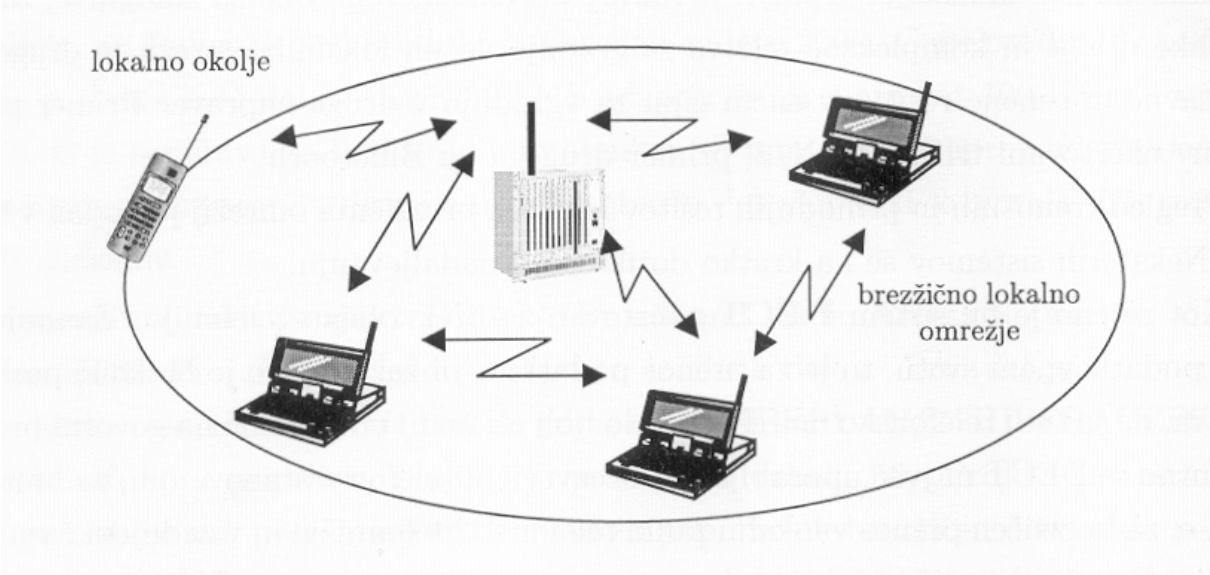
Slika 2-11. Hitrosti prenosa podatkov pri različnih tehnologijah mobilnih komunikacij.



Slika 2-12. Hitrosti prenosa podatkov pri različnih tehnologijah mobilnih komunikacij.

2.7 Lokalna brezžična omrežja

Lokalna brezžična omrežja, v literaturi se uporablja kratica WLAN (Wireless Local Area Network), so postala pomemben način gradnje lokalnih omrežij. Gre za način brezžične povezave uporabnikov v lokalno omrežje, npr. znotraj poslovne zgradbe ali stanovanjske hiše. Rešitve so praviloma omejene na notranje prostore (angl. indoor). Pogosto se uporablja tudi ime domača omrežja (angl. home networks).



Slika 2-13. Princip lokalnega brezžičnega omrežja.

Omrežja WLAN odlikuje predvsem hitra postavitev, fleksibilnost in lokalna mobilnost uporabnika. To pomeni, da ni potrebno ob vsaki najmanjši spremembi v pisarni na novo vleči žic do novega priključnega mesta. Rešitve, ki so na voljo v tem trenutku, že nudijo prenosne hitrosti preko 100 Mb/s.

Zgodovinsko gledano je razvoj lokalnih brezžičnih omrežij potekal v dveh smereh, ki sta vezani na že preteklo delitev govornih in podatkovnih komunikacij.

- Uporabniki telefonskih omrežij so uporabljali **brezvrvične sisteme** (angl. cordless) kot brezžičen podaljšek telefonskih omrežij.
- Po drugi strani so se na pobudo računalnikarjev razvijali sistemi za **brezžičen dostop do lokalnih podatkovnih omrežij**, ki so bili namenjeni izključno podatkovni komunikaciji. Prvi takšni produkti so se na tržišču pojavili že okrog leta 1990.

Z zlivanjem govornih in podatkovnih omrežij pa opisane delitve izginjajo. Večina novih sistemov, ki so že na trgu ali pa še v fazi načrtovanja, podpira tako govorno kot podatkovno komunikacijo. Opaziti je razvoj v dveh smereh. Eno so zmogljive, zato pa nekoliko dražje in kompleksne rešitve za gradnjo večjih lokalnih omrežij in drugo zelo enostavne in cenene rešitve v enem čipu za vgradnjo v druge naprave. Primer prvega je npr. IEEE 802.11, primer drugega pa Bluetooth.

Pregled trenutnih in prihodnjih rešitev lokalnih brezžičnih omrežij je podan v tabeli 2-3. Nekaterih sistemov se na kratko dotikamo v nadaljevanju.

Kot rečeno je bil sistem **DECT** načrtovan za brezvrvično telefonijo. Zanimivo je, da v podatkovnem svetu, torej za prenos podatkov, ni zaživel.

Pomembna rešitev med omrežji majhnega dosega je postal **IEEE 802.11** (standardiziral IEEE leta 1997). Pred nekaj leti so bila pričakovanja v Evropi predvsem v smeri uveljavitve sistema **HIPERLAN/1** (standardiziral ETSI leta 1997), vendar je v praksi prevladal ameriški standard, tako da danes produktov, ki bazirajo na HIPERLAN tehnologijah skoraj ne najdemo.

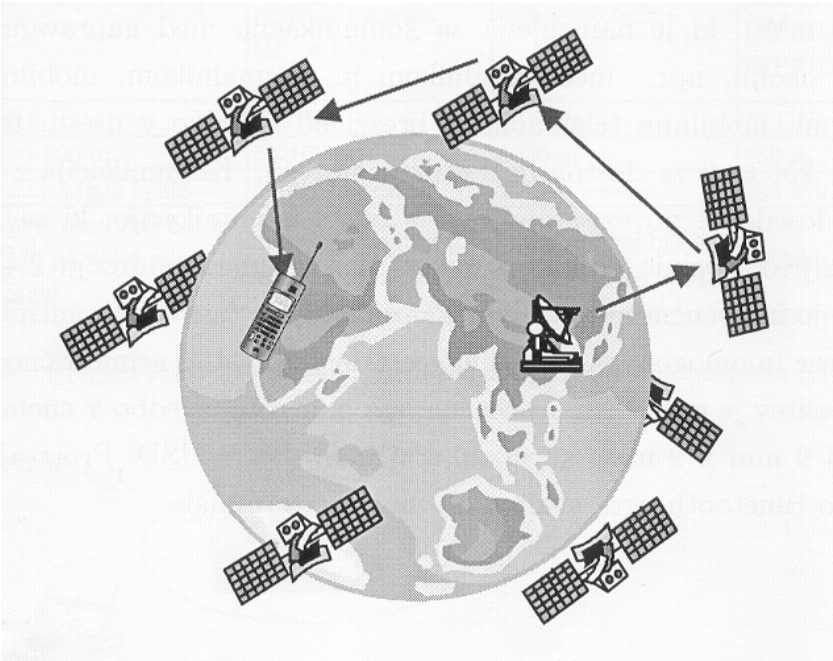
Rešitev	delovanje fizičnega sloja	sodostop	frekvenčno področje	maksimalna prenosna hitrost	razpoložljivost produktov
DECT	GMSK	TDD/TDMA	2 GHz	1152 kb/s (24x32 kb/s neto)	na voljo
Open Air	FHSS	CSMA/CA	2,4 GHz (ISM)	1,6 Mb/s	na voljo
HomeRF	FHSS	CSMA/CA	2,4 GHz (ISM)	1 Mb/s	na voljo
802.11	FHSS, DSSS, IR	CSMA/CA	2,4 GHz (ISM)	1 ali 2 Mb/s	na voljo
802.11b	CCK DSSS	CSMA/CA	2,4 GHz (ISM)	11 Mb/s	na voljo
802.11a	OFDM	CSMA/CA	5 GHz (ISM)	54 Mb/s	na voljo
802.11g	OFDM oz. CCK DSSS ali DBPSK/DQPSK+DSSS za nižje hitrosti	CSMA/CA	2,4 GHz (ISM)	54 Mb/s	na voljo
HIPERLAN1	GMSK	EY-NPMA	5 GHz	23,5 Mb/s	ni uspel
HIPERLAN2	BPSK, QPSK ali 16-QAM na OFDM	TDD/TDMA	5 GHz	54 Mb/s	ni uspel
Bluetooth	FHSS	TDD/FH	2,4 GHz (ISM)	1 Mb/s	na voljo

Tabela 2-3. Pregled rešitev lokalnih brezžičnih omrežij majhnega dosega. Opomba: Pri navajanju hitrosti je potrebno upoštevati, da so to bruto prenosne hitrosti, ki si jih pri sodostopu z zaseganjem kanala deli več uporabnikov sistema. Uporabne podatkovne hitrosti znašajo v praksi med 50 in 70% prenosne hitrosti.

Bluetooth je radijska tehnologija kratkega dosega (reda 10 m) in zelo majhnih moči (do 100 mW), ki je namenjena za komunikacijo med napravami v domačem in poslovnem okolju, npr. med tiskalnikom in računalnikom, mobilnim telefonom in računalnikom, mobilnim telefonom in brezžično slušalko v ušesu, televizorjem in štedilnikom ..., kot tudi za dostop do lokalnih omrežij. Komunikacija z Bluetooth bo nadomeščala dosedanje povezovanje s kabli in IR komunikacijo, ki se je izkazala za precej nezanesljivo. Deluje v nelicenciranem frekvenčnem področju 2.4 GHz, uporablja kombinacijo frekvenčnega in časovnega sodostopa s časovnim multipleksiranjem za dvosmerne zveze in omogoča prenosne hitrosti do 723,2 kb/s asimetrično in 433,9 kb/s simetrično. Rešitev je enostavna in cenena, saj omogoča izvedbo v enem integriranem vezju velikosti 9 mm x 9 mm, ki naj bi stal manj kot 2 EUR. Proizvajalci mobilnih telefonov Bluetooth pospešeno vgrajujejo v mobilne terminale.

2.8 Satelitska omrežja

Prihodnosti komunikacij si ne moremo zamisliti brez satelitskih sistemov (slika 16). Satelitski sistemi nedvomno imajo kar nekaj prednosti pred prizemnimi sistemi. Najbolj očitni sta globalno pokrivanje ter enostavno doseganje nedostopnih in redko naseljenih predelov. V ZDA naj bi to bila edina rešitev za tretjino prebivalstva. Po oceni je okrog 80% zemeljske površine nepokrite s signali prizemnih sistemov. Problem satelitskih sistemov je predvsem v velikih zagonskih stroških, saj satelitskega sistema ni moč graditi postopno. To predstavlja veliko začetno tveganje.

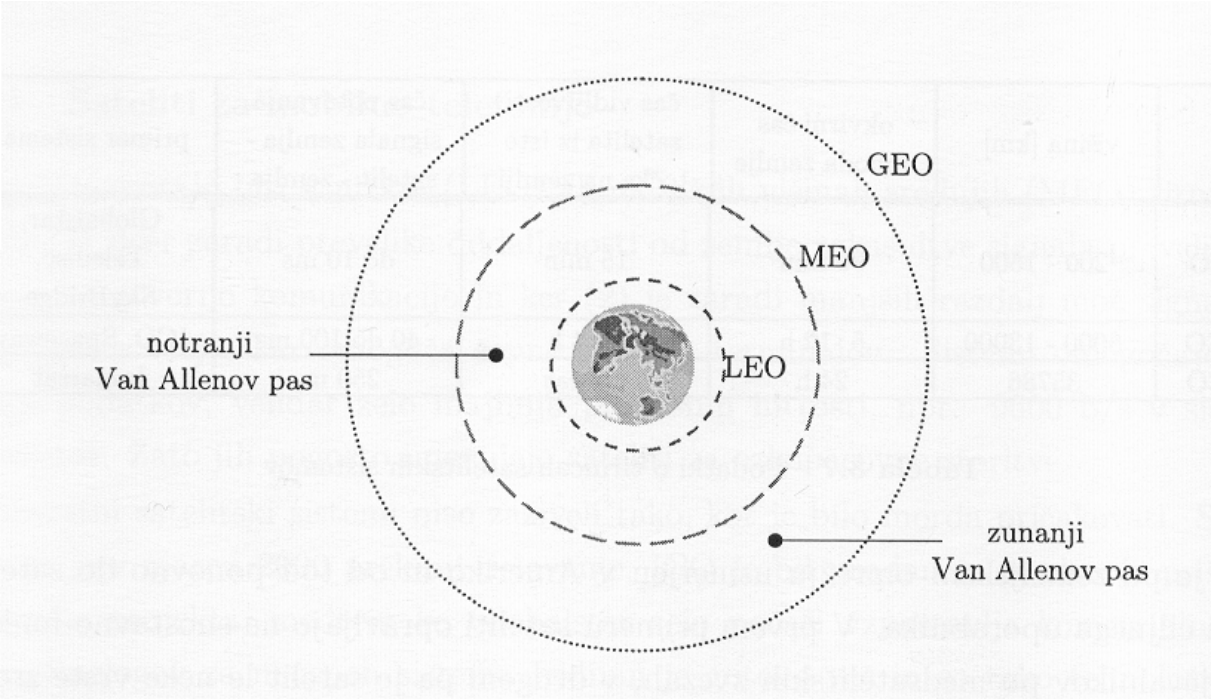


Slika 2-14. Princip delovanja satelitskega omrežja.

Tirnice satelitov

Satelitski sistemi za javno uporabo uporabljajo tri vrste krožnih tirnic, ki jih prikazuje slika (slika 2-15):

- **nizke tirnice** (LEO - Low Earth Orbit) na višini od 200 do 1.500 km nad površjem Zemlje,
- **srednje tirnice** (MEO - Medium Earth Orbit) od 5.000 do 13.000 km nad površjem Zemlje in
- **geostacionarno tirnico** (GEO - Geostationary Orbit) na višini 35.786 km nad ekvatorjem.



Slika 2-15. Krožne tirnice LEO, MEO in GEO.

Geostacionarni sateliti krožijo v višini 35.786 km nad Zemljo nad ekvatorjem z enako kotno hitrostjo, kot jo ima vrtenje Zemlje. Zaradi tega sateliti GEO glede na površino Zemlje navidez mirujejo. Komunikacija med sateliti in uporabniki poteka preko fiksnih usmerjenih anten. S tremi sateliti GEO lahko pokrijemo večino zemeljske površine, razen polarnih področij. Hibi geostacionarnih sistemov sta

(1) **v veliki zakasnitvi signala na prenosni poti**, saj prelet signala iz Zemlje do satelita in nazaj traja približno 250 ms. To povzroča težave pri govornih in interaktivnih podatkovnih komunikacijah. Težava je tudi

(2) **v precejšnji velikosti sprejemnih anten**, ki jih potrebujemo na Zemlji za sprejem signala.

Sateliti LEO in MEO potujejo okoli Zemlje po nižjih tirnicah, zato za obhod okoli Zemlje potrebujejo manj časa. Dobri strani nižjih tirnic sta majhna zakasnitev zaradi preleta signala in manjše antene, ki so potrebne za sprejem. Po drugi strani pa kratki obhodni časi predstavljajo oviro, saj je vidljivost določenega satelita iz fiksne točke na Zemlji relativno kratka. To pomeni, da mora biti komunikacija med trajanjem zveze preusmerjena na drug satelit. Zaradi manjših višin potrebujemo bistveno več satelitov za pokrivanje celotne zemeljske oble, npr. 48 pri sistemu Globalstar na višini približno 1.400 km.

Okvirni podatki o tirnicah satelitov so podani v tabeli 2-4.

Usmerjanje na nebu ali usmerjanje na Zemlji

Predstavljajmo si, da vzpostavljamo komunikacijo preko satelitskega sistema iz Evrope v Ameriko. Signal gre od uporabnikove postaje do satelita. Od tu dalje obstajata dve možnosti. Signal lahko nadaljuje pot po satelitskem omrežju do končnega satelita, ki vidi ciljnega uporabnika, ali pa ga satelit le preusmeri nazaj do centra na Zemlji, od koder je po zemeljskem omrežju usmerjen v Ameriko in od tod ponovno do satelita, ki vidi ciljnega uporabnika. V prvem primeru sateliti opravljajo ne enostavno funkcijo usmerjevalnikov po medsatelitskih zvezah, v drugem pa je satelit le neke vrste zrcalo, ki signal transparentno pošlje nazaj na Zemljo. Seveda potrebujemo v drugem primeru več infrastrukture na Zemlji. Primer sistema z usmerjanjem v satelitih sta npr. Iridium in Teledisc, z usmerjanjem na Zemlji pa Globalstar in SkyBridge.

	Višina [km]	Okvirni čas obhoda Zemlje	Čas vidljivosti satelita iz iste točke na Zemlji	Čas potovanja signala Zemlja–satelit-Zemlja	Primer sistema
LEO	200–1500	90 min	15 min	do 10 ms	Globalstar, Teledisc, SkyBridge
MEO	5000–13000	5 – 12 h	2 – 4 h	40 do 100 ms	ICO, Spaceway
GEO	35786	24 h	ves čas	250 ms	Inmarsat

Tabela 2-4. Podatki o tirnicah satelitskih sistemov.

Oblikovanje ozkih snopov

Zaradi velike oddaljenosti satelitov od Zemlje nastopa tudi problem oblikovanja dovolj ozkega snopa za pokrivanje sorazmerno majhnih površin s ciljno skupino uporabnikov. To je se posebno aktualno pri komunikaciji na osnovi frekvenčnega sodostopa. Če želimo uporabljati iste frekvenčne kanale v več celicah sočasno brez medsebojnih motenj, potrebujemo na satelitih zelo zahtevne in tudi mehansko velike antene v izvedbi antenskih skupin.

Delitev satelitskih sistemov

Na področju javnih satelitskih komunikacij ločimo dve vrsti sistemov:

- satelitski sistemi za mobilno telefonijo. Ti so načrtovani za zagotavljanje mobilnih govornih komunikacij na celi zemeljski obli. Sem spadajo npr. Iridium, Globalstar, ICO, Odyssey.
- satelitski sistemi za širokopasovne podatkovne komunikacije. Ti so načrtovani za podatkovne prenose velikih hitrosti in opravljajo funkcijo razdelilnega omrežja.

V nobeno od teh skupin pa ne spadajo aeronavtične ploščadi. Običajni sateliti se gibljejo okrog Zemlje izven Zemljine atmosfere. Aeronavtične ploščadi pa so bistveno nižje, to je v Zemljini atmosferi. Gre za novo tehnologijo, ki se bo šele uveljavila. V nadaljevanju si bomo na kratko ogledali omenjene vrste sistemov.

2.8.1 Sateliti za mobilno telefonijo

Sateliti za mobilno telefonijo morajo biti v nizkih (LEO) ali na nižjih višinah srednjih (MEO) tirnic, ker bi bile sicer prvič zaradi prevelike oddaljenosti od Zemlje zakasnitve signala prevelike ter moteče za govorno komunikacijo in drugič, ker je zaradi manjših razdalj moč signala na sprejemniku večja, kar omogoča žepne izvedbe terminalov. Sistemi omogočajo tudi prenos podatkov, vendar zelo majhnih prenosnih hitrosti, npr. 9600 b/s v sistemu Globalstar. Zato jih pogosto imenujejo sateliti za ozkopasovne storitve.

Tovrstni satelitski sistemi niso zaživeli tako, kot je bilo morda pričakovati. Izgradnja globalnega satelitskega sistema je tehnološko še vedno zelo zahteven in drag projekt. Zato so tudi cene storitev visoke. Več kot 80% evropske populacije je pokrite z zemeljskimi mobilnimi sistemi. Podobno velja za ostali razviti svet. To pomeni, da uporabniki, ki bi si ekonomsko lahko privoščili uporabo, teh storitev skoraj ne potrebujejo. Za nerazviti svet pa so bile cene občutno previsoke.

Kljub temu satelitski sistemi za mobilno komunikacijo imajo prihodnost, saj je manj kot 20% zemeljske oble pokrite z prizemnimi mobilnimi sistemi. To pomeni, da bodo satelitski sistemi za globalno pokrivanje v prihodnosti nujni, saj bodo predstavljali edino možnost komunikacije v mnogih odročnih in nerazvitih predelih zemeljske oble. Pri tem bo cena storitev igrala zelo pomembno vlogo.

2.8.2 Sateliti za širokopasovne podatkovne komunikacije

Pravi širokopasovni satelitski sistemi so šele v načrtovanju. Po napovedih bodo zagotavljali uporabnikom interneta cenene zveze s hitrostmi od 2 do 155 Mb/s za fiksne uporabnike. Te hitrosti bodo primerljive s tistimi, ki jih bodo nudili prizemni sistemi. Ti sistemi lahko uporabljajo tudi geostacionarno orbito, kar pa bo zaradi zakasnitev pri interaktivnih podatkovnih komunikacijah že predstavljalo določeno oviro. Cena nove generacije satelitskih sistemov naj bila znatno manjša na enoto prenosne kapacitete v primerjavi s sedanjimi sateliti. Učinkovito bodo izrabljali digitalno tehnologijo, ki bo zagotavljala povečano kapaciteto, zanesljivost in varnost prenosa. Sateliti bodo delovali pri zelo visokih frekvencah, kjer

je moč zagotoviti zadostno širino frekvenčnega spektra in tako zadostne kapacitete ter prenosne hitrosti. Pri višjih frekvencah imamo lahko manjše antene in ožje snope proti Zemlji. Vendar se pri višjih frekvencah poveča tudi slabljenje signala, predvsem v primeru padavin, kar pa ponovno zahteva večje antene. Obe zahtevi je potrebno razumno uravnovesiti. Pri trenutnih projektih prevladuje uporaba frekvenčnega pasu Ka (frekvence okrog 30 GHz v smeri navzgor in okrog 20 GHz v smeri navzdol), analizirajo se tudi možnosti v pasu V (40-50 GHz) in na 60 GHz.

Potrebno je dodati, da so bili načrti uvajanja sistemov že v preteklosti večkrat spremenjeni. Cene sistemov so zastrašujoče, saj so ocenjene za globalne sisteme med 3 in 10 milijardami USD. Velikost cen zbledi ob njihovih kapacitetah, saj naj bi združene kapacitete načrtovanih širokopasovnih satelitov zadoščale za nekajkratno množino vsega današnjega telefonskega prometa. Ne glede na to pa je pri uvajanju satelitskih sistemov potrebno zbrati ogromen kapital za vzpostavitev sistema. Tudi pri naročnikih bodo stroški nekoliko višji, saj je potrebna postavitev antene na strehi in ustrezne opreme. Stroški pri naročnikih naj bi znašali nekaj 100 EUR. Investicije v sisteme si bodo lahko privoščila le največja telekomunikacijska podjetja.

Npr. v sistem **Teledisc** so investirali 9 milijard USD Bill Gates, saudski princ Alwaleed Bin Talal, Boeing in Motorola, pa vendar projekt ni bil uspešen.

Prav tako so v sistem **Astrolink** investirali 1,33 milijard USD Lockheed Martin, Liberty Media, TRW in italijanski Telespazio. Tudi ta projekt ni uspel.

Vprašanje je tudi kaj bo s sistemom **SkyBridge** v katerega je evropski konzorcij na čelu z Alcatelom investiral 3,5 milijard USD …

Poglejmo si uspešen projekt SPACEWAY.

2.8.2.1 Primer projekta širokopasovnega satelitskega sistema SPACEWAY-3

SPACEWAY-3 je del konstelacije Hughes Network Systems satelitov za širokopasovne omrežne storitve, ki temeljijo na protokolu IP. Tretji satelit v seriji SPACEWAY je bil uspešno lansiran v orbito v 14. avgusta 2007 s pomočjo nosilne rakete Ariane 5.

Njegov glavni namen bo zagotavljanje širikopasovnih komunikacijskih storitev, ki temeljijo na IP protokolu.

Prejšnja satelita iz serije SPACEWAY, imenovana SPACEWAY-1 and SPACEWAY-2 nudita storitve televizije visoke ločljivosti za uporabnike DirecTV. SPACEWAY-1 (lansiran 26. aprila 2005) in SPACEWAY-2 (lansiran 16. novembra 2006) sta bila prvotno namenjena za globalne širokopasovne komunikacije, vendar ju je operater DirecTV (pod kontrolo News Corporation's Fox Entertainment Group) uporabil za druge namene.

SPACEWAY-3 – splošni podatki

Datum lansiranja: *14. avgust 2007*

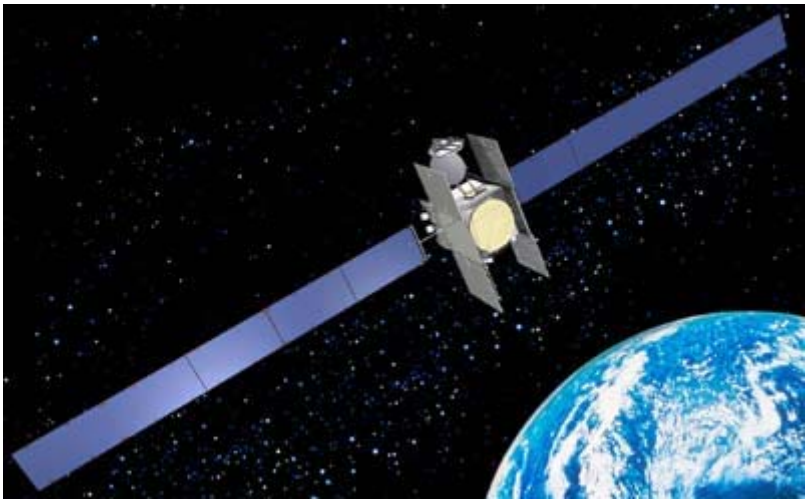
Proizvajalec: *Boeing*

Model: *702*

Način lansiranja: N*osilna raketa Ariane 5*

Življenska doba: *12 let*

Kapaciteta transponderja : *500MHz, 10Gbit/s*



Slika 2-16. Spaceway-1.

3 Tehnični opis dostopov

V poglavju želimo predstaviti načela delovanja prej obravnavanih dostopov. Obravnavo bomo ločili za vrvične in brezvrvične dostope.
Pri vrvičnih dostopih se bomo omejili predvsem na lastnosti žičnih zvez in probleme, ki omejujejo hitrosti prenosa. Obravnavali bomo prenosne lastnosti kovinskih žičnih vodov, načine ločevanja smeri prenosa in vrste modulacij. Pogledali si bomo osnovne principe izvornega kodiranja. Predstavili bomo teoretične in praktične omejitve za hitrost prenosa informacij po naročniških vodih. Zanimiva je tudi obravnava učinkovitih prenosnih sistemov, ki se uporabljajo v žičnih dostopovnih omrežjih.
Pri brezžičnih dostopih bomo nakazali osnovne probleme prenosa po mobilnem prenosnem kanalu, načine sodostopa do skupnega prenosnega kanala v večuporabniških sistemih, principe delovanja sistemov z razpršenim spektrom, na katerih temeljijo tudi sistemi tretje generacije mobilnih komunikacij, in rešitve na prehodu iz druge v tretjo generacijo mobilnih komunikacij.

3.1 Tehnika žičnih dostopov

V prejšnjem poglavju smo se med drugim seznanili, da nastopajo v dostopovnih omrežjih različne vrste kovinskih žičnih vodov: prepleteni dvovodi, koaksialni vodi in izrazito nedefinirani nizkonapetostni energetski vodi. Med osnovne skupne značilnosti kovinskih žičnih vodov sodijo slabljenje in disperzija, odboji in razne vrste šuma. Poudarek bo predvsem na obravnavi prenosnih lastnosti prepletenega dvovoda, ki se trenutno tudi najpogosteje uporablja. Pogoji za hitri digitalni prenos so izrazito neugodni in se zelo strmo slabšajo z razdaljami v dostopovnih omrežjih. Predstavili bomo tudi osnovne probleme in rešitve izvornega kodiranja signalov. Kljub temu, da spada modulacija tako pod vrvične, kot tudi brezvrvične zveze, bomo opisali osnovne principe modulacij v analognem in anto še v digitalnem svetu. Srečali se bomo z osnovnimi teoretičnimi omejitvami in odvisnosti razpoložljivih prenosnih kapacitet od značilnih parametrov linij. Razložili bomo tudi osnovne principe delovanja modemov, ki omogočajo učinkovito izkoriščanje prenosnih kapacitet pri žičnih dostopih.

3.1.1 Lastnosti prenosnega medija

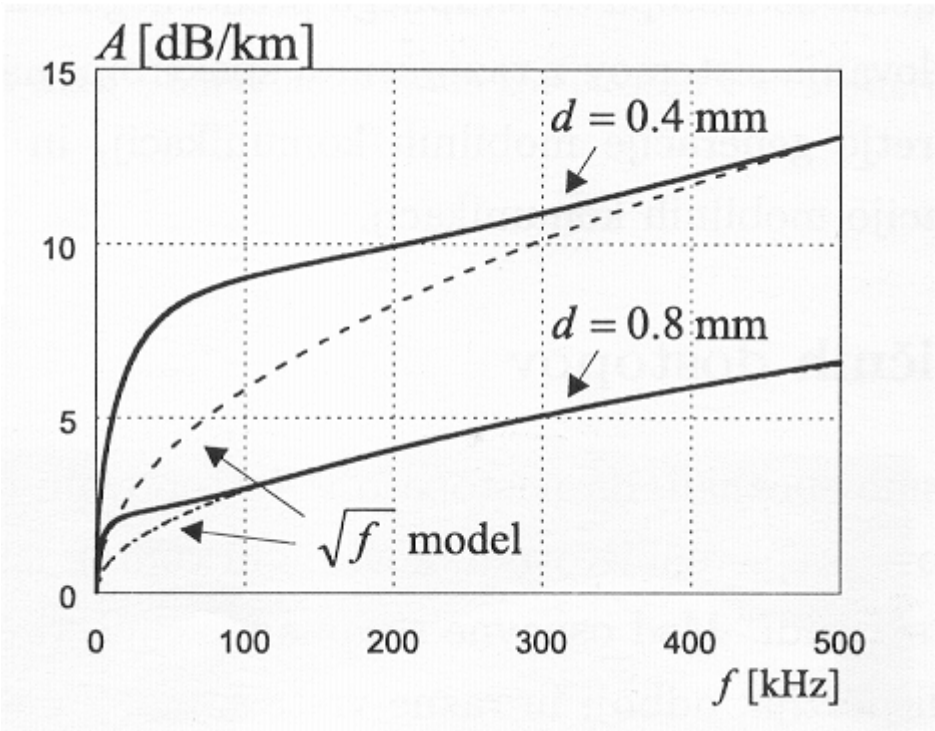
Simetrični kovinski vod nudi v primerjavi z optičnim vlaknom in tudi s koaksialnim vodom zelo slabe pogoje za hitri prenos digitalnih signalov. Prenosno zmogljivost naročniškega voda določajo predvsem naslednje lastnosti:

- slabljenje in disperzija,
- odboji,
- različne vrste šuma, od katerih ima prevladujoč vpliv presluh iz sosednih dvovodov.

Slabljenje naročniških vodov s frekvenco narašča, kar je posledica izriva toka proti površini vodnika in dielektričnih izgub izolatorja. Slabljenje simetričnega dvovoda narašča linearno z dolžino in približno s kvadratnim korenom frekvence, kar se pogosto uporablja tudi za preprosti model prenosne karakteristike naročniške linije:

$$A(f) = A(f_0, l_0, d_0)\frac{d_0}{d}\frac{l}{l_0}\sqrt{\frac{f}{f_0}} \qquad (3\text{-}1)$$

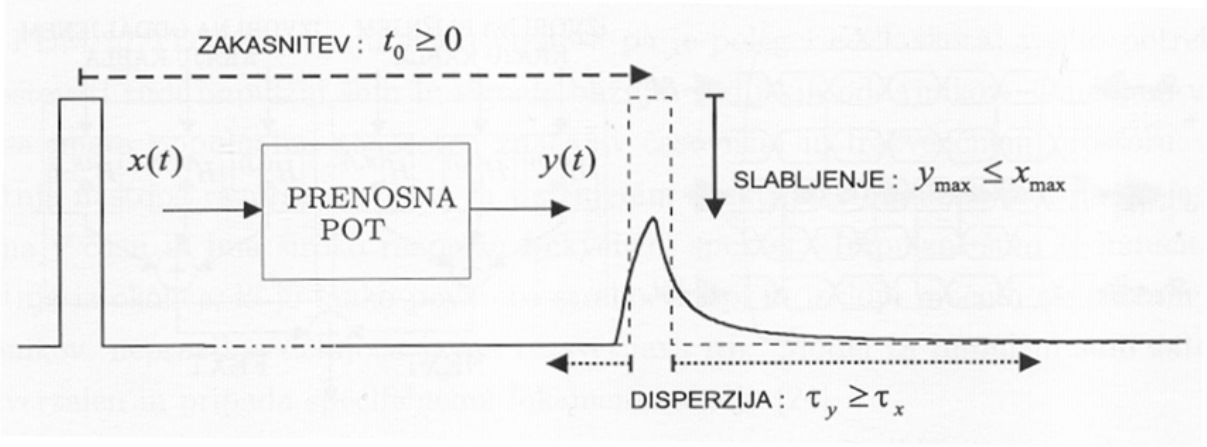
Približni in natančni potek slabljenja za nekaj primerov vodov podaja slika 3-1.



Slika 3-1. Poteki slabljenja vodov.

Disperzija signalov pri prenosu je posledica razlik v fazni hitrosti. Slika 3-2 podaja primer slabljenja in razpršitve pravokotnega impulza na naročniški liniji. Na prenosnem kanalu z zelo spremenljivim slabljenjem imamo vedno tudi izrazit pojav disperzije. Glavni učinek disperzije pri digitalnem prenosu je ***intersimbolna interferenca***, ki jo lahko kompenziramo z izravnalnikom v sprejemniku. Če uporabimo najbolj enostavni sistem za prenos po naročniški liniji, ki ne vsebuje izravnalnika

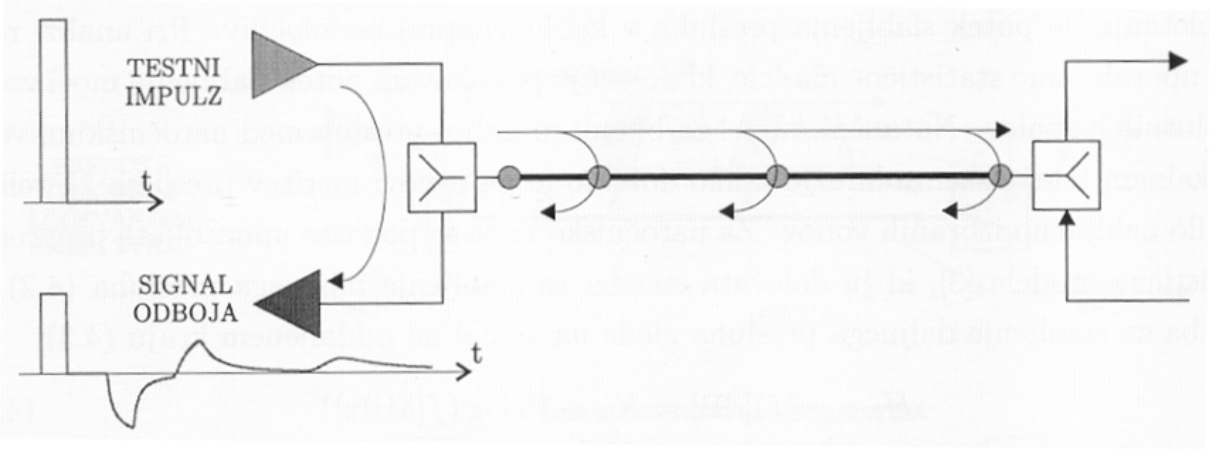
v sprejemniku, je intersimbolna interferenca, ki nastopa zaradi disperzije prvi omejevalni dejavnik.



Slika 3-2. Disperzija impulza pri prenosu po naročniškem vodu.

O prenosu brez intersimbolne interference govori Nyquistov kriterij, o katerem bo tekla beseda še v nadaljevanju.

Odboji nastopajo zaradi sprememb karakteristične impedance, ki jih povzročajo različne nehomogenosti na naročniški liniji. Težava zaradi odbojev ni samo izguba moči signala, ki potuje v želeni smeri, pač pa tudi neželeni odbiti signal v sprejemniku. Na vhodu sprejemnika dobimo množico različno zakasnjenih in oslabljenih komponent signala iz oddajnika. Primer odbitega signala v sprejemniku podaja slika 3-3. Odbiti signal predstavlja neželeno motnjo pri sočasnem prenosu frekvenčnega ločevanja smeri prenosa. Odboje izločamo z adaptivnim sitom v sprejemniku, ki ga imenujemo izločevalnik odbojev.

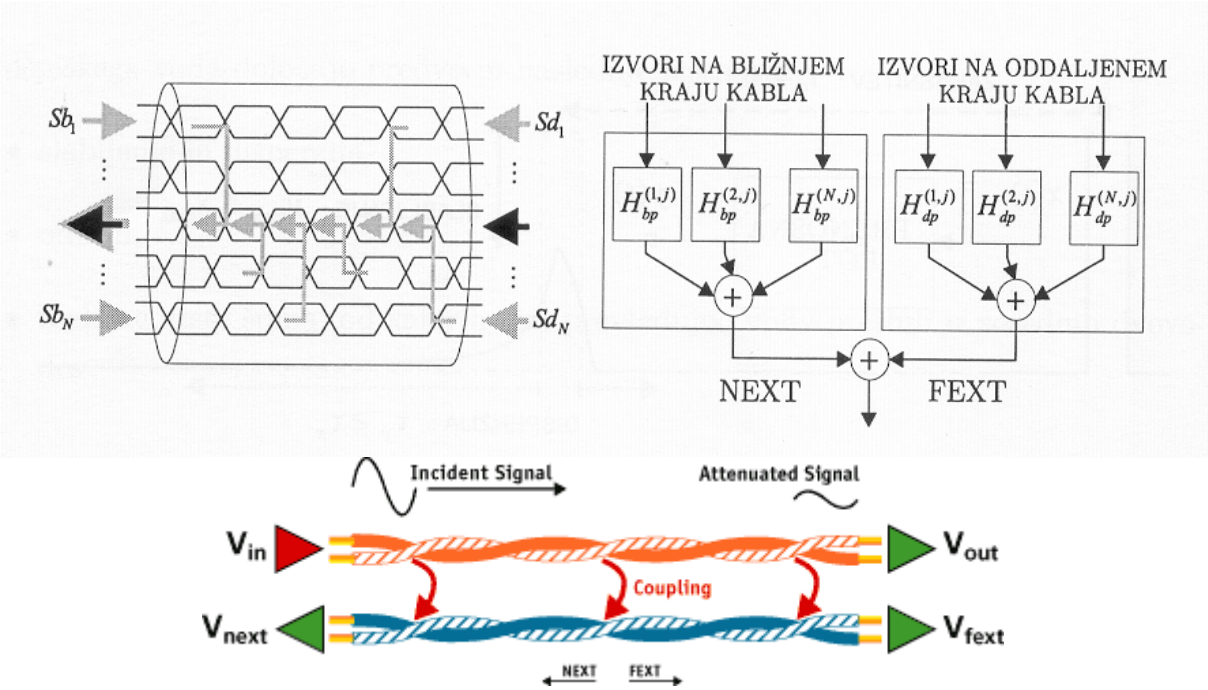


Slika 3-3. Odboji na naročniškem vodu.

Presluh med dvovodi je posledica elektromagnetnega sklopa, ki nastopa zaradi bližine parov dvovodov. Presluh med dvovodi proizvajalci kablov zmanjšajo s prepletanjem dvovodov. Postopek kompenzacije presluha s

prepletanjem je učinkovit predvsem pri nizkih frekvencah, zato presluh narašča s frekvenco. Ker je v enem kablu mnogo dvovodov, uporabljamo za mero presluha v kablu slabljenje moči vsote preslušnih signalov vseh tujih aktivnih izvorov. Model za presluh med dvovodi podaja slika 3-4. Glede na kraj nastopanja ločimo bližnji presluh (*ang. Near-End-Crosstalk*) in daljni presluh (*ang. Far-End-Crosstalk*). Ločevanje preslušnih signalov zaradi različnega vpliva pri različnih na načinih ločevanja smeri prenosa:

- NEXT je zaradi krajših poti prevladujoč, vendar ne vpliva na prenosne razmere pri TCM in FDM načinu ločevanja smeri prenosa.
- FEXT povzroča motnjo pri TDM in FDM prenosu, ne vpliva na prenosne razmere pri sočasnem prenosu.



Far End Crosstalk (FEXT)

Far End Crosstalk is similar to Near End Cross Talk (NEXT), except that the signal is sent from the local end and crosstalk is measured at the far end. Because of attenuation, signals that induce FEXT can be much weaker, especially for longer cable lengths. This effect means that for a given quality of cabling, more FEXT will be seen on a short link than a long link. For reason, FEXT results are not meaningful without an indication of the corresponding attenuation on the link. Thus, FEXT is measured but rarely reported. FEXT results are used to derive Equal Level Far End Crosstalk (ELFEXT).

Slika 3-4. Bližnji in daljni presluh.

Ker je presluh med dvovodi predvsem posledica spremenljive geometrije in nenatančnega prepletanja, je potek slabljenja presluha v kablu vnaprej nedoločljiv. Pri analizi razmer uporabljamo statistične modele, ki določajo pričakovani potek slabljenja moči vsote preslušnih signalov. Natančni model za bližnji in daljni presluh med naročniškimi vodi v lokalnem telefonskem omrežju lahko dobimo le na osnovi meritev presluha za veliko število naključno izbranih vodov. Za naročniške vode se pogosto uporabljata preprosta statistična modela, ki ju določata enačba za

slabljenje bližnjega presluha (2) in enačba za slabljenje daljnega presluha glede na signal na oddaljenem kraju (3):

$$H_{NEXT}(f)[dB] = K_n - 15\log(f[MHz]) \tag{3-2}$$

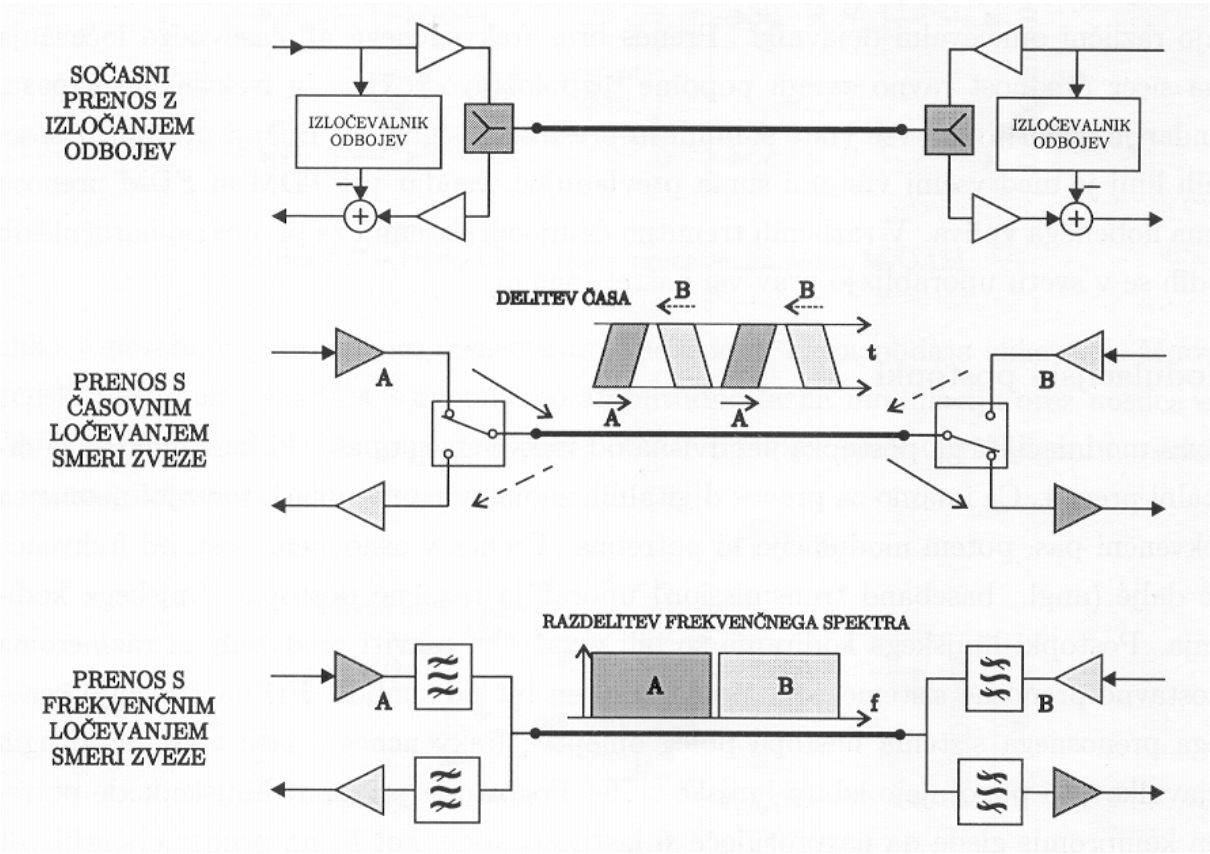
$$H_{ELFEXT}(f,l)[dB] = K_f - 20\log(f[MHz]) + 10\log(l[km]) \tag{3-3}$$

Večina signala bližnjega presluha prehaja na kratki razdalji, zato je v modelu preslušno slabljenje neodvisno od celotne dolžine linije. Kot tipičen podatek lahko vzamemo K_n = 46dB in K_f = 50dB. Natančnost opisanih modelov za domače razmere ni preverjena.

Šum na naročniškem vodu povzročajo poleg signalov presluha tudi tujerodni izvori. Vrsta motenj, ki jih moramo upoštevati je zopet odvisna od načina ločevanja smeri prenosa. Pri sočasnem prenosu v obe smeri zveze je NEXT v večini primerov prevladujoč, pri FDM in TDM ločevanju smeri prenosa pa je poleg FEXT skoraj vedno potrebno upoštevati tudi impulzni šum in signale bližnjih radijskih oddajnikov. Omenjeni vrsti šuma imata popolnoma nasproten značaj v časovnem in frekvenčnem prostoru: RF motnja nastopa razpršeno v času in s strnjenim spektrom, impulzna motnja pa je strnjena v času in ima široko razpršen frekvenčni spekter. Impulzni šum je inducirana motnja iz okolice, ki jo lahko povzroča strela, vklopi in izklopi močnih električnih porabnikov, nepravilno delujoča javna razsvetljava itn. Model za impulzni šum zato ni univerzalen in pripada specifičnemu lokalnemu okolju.

3.1.2 Ločevanje smeri prenosa

Dvosmerno digitalno povezavo želimo v večini primerov vzpostaviti preko ene naročniške linije. Dvosmerni prenos (angl. full duplex) lahko po eni liniji poteka na več načinov. Različne postopke ločevanja smeri prenosa ilustrira slika 3-5:



Slika 3-5. Načini izvedbe dvosmernega prenosa.

- Sočasni prenos brez frekvenčnega ločevanja zahteva izločanje signala lastnega oddajnika. Za ločevanje smeri prenosa se pri analognem telefonu že od leta 1918 uporablja balančno vezje, ki ga v telefoniji imenujemo **vilice (*angl. hybrid*)**. Za hitri digitalni prenos signalov ni mogoče izdelati vilic, ki bi popolnoma izločile signal lastnega oddajnika, zato uporabljamo izločevalnike odbojev (*angl. echo-canceller*). Izločevalnik odbojev je adaptivno digitalno sito, ki ustvari kopijo signala odboja in z njo kompenzira odboje.

- Prenos s časovno ločitvijo v istem frekvenčnem pasu imenujemo TDM (*angl. Time Division Multiplexing*) ali ping-pong prenos. Ker imamo za prenos v eno smer na razpolago manj kot polovico časa, mora biti prenosna hitrost več kot dvakrat večja kot pri sočasnem prenosu. Izgubljeni čas je vsota zakasnitve na liniji in varnostnega intervala.

- Sočasni prenos s frekvenčnim ločevanjem smeri zveze imenujemo FDM (*angl. Frequency Division Multiplexing*). Tudi pri FDM prenosu moramo razpoložljivo prenosno kapaciteto prenosnega medija razdeliti na dva dela.

Razpoložljiva prenosna kapaciteta linije je odvisna od načina prenosa, kjer nastopajo različni omejevalni dejavniki. Prenos brez frekvenčnega ali

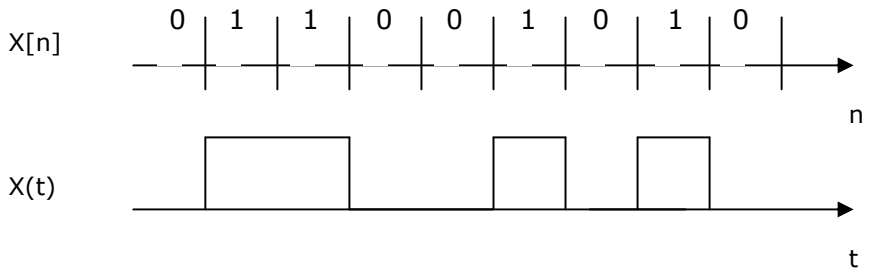
časovnega ločevanja ima sicer prednost ravno zaradi popolne razpoložljivosti časa in frekvenčnega pasu, vendar je občutljiv na vse vrste šumnih in preslušnih signalov. Bližnji presluh iz sosednih linij je med vsemi vrstami šuma prevladujoč, vendar pri TDM in FDM prenosu nima nobenega vpliva. V različnih trenutno delujočih sistemih za prenos po naročniških vodih se v svetu uporabljajo prav vsi našteti načini.

3.1.3 Kanalno kodiranje signala

Pri digitalnem prenosu je preko kanala potrebno prenesti niz simbolov. Če želimo niz simbolov prenesti preko realnega kanala, ga moramo prej kanalno zakodirati, kar pomeni pretvoriti v signal.
Pri digitalnem prenosu je najpomembnejša napaka, ki je definirana kot odstopanje prejetega in oddanega signala.

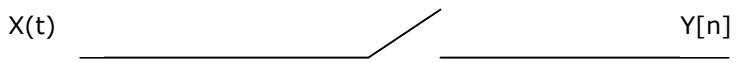
$$X[n] \rightarrow Y[n] \qquad (3\text{-}4)$$

Če želimo prenašati simbole preko nekega realnega medija, jih je potrebno pretvoriti v realen signal. Najenostavnejša oblika je grenerator impulzov.
Kadar uporabljamo takšen generator in na vhod pripeljemo signal, dobimo *binarno kodo.*



Slika 3-6. Generator binarne kode.

Bistvo je, da znamo poslani signal na sprejemniku pretvoriti v digitalni niz, oziroma ga kanalno dekodirati.



Slika 3-7. Kanalno dekodiranje.

Ob pravih trenutkih je potrebno sprejeti signal odčitovati. Ker ne moremo popolnoma natančno določiti frekvence, s katero moramo odčitovati signal,

je potrebna sinhronizacija faze. Brez sinhronizacije, faza leze in prihaja do opuščanja simbolov. Faza se popravlja ob prehodih signala (iz 0 v 1 ali iz 1 v 0). Kadar nastopi več ničel ali enic, nastane problem, ker se faza ne more sinhronizirati. Zaradi tega problema in ker na linijah nastopajo linijski transformatorji, ki ne dovoljujejo enosmerne komponente, je potrebno dodajati *redundanco*.

Redundanco lahko definiramo kot:

$$R = 1 - \frac{\check{s}tevilo_informacijskih_bitov}{\check{s}tevilo_kodnih_bitov} \qquad (3\text{-}5)$$

ali pa kot

$$R = 1 - \frac{\check{s}tevilo_informacijskih_bitov}{\log_2 L} \qquad (3\text{-}6)$$

pri čemer je *L* število nivojev kode.

Redundanca je uporabna tudi za detekcijo napak.

Primer kode z redundanco je *bifazna koda.* Na vsak vhodni bit dodamo dva izhodna:

X[n]	X1[n]
1	1, -1
0	-1, 1

Tabela 3-1. Bifazna koda.

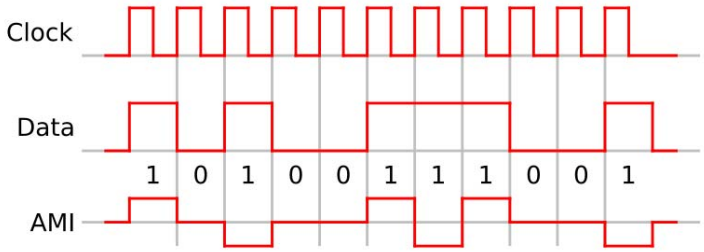
V primeru te kode znaša redundanca:

$$R=1-1/2=0.5, \qquad (3\text{-}7)$$

kar pomeni, da smo dodali 50 % redundance. To je zelo veliko. Poiskati moramo bolj učinkovito kodo. Ena takšnih je *AMI koda (Alternate Mark Inversion Code).*Pri *AMI kodi* predstavlja ničlo 0, enico pa izmenično 1 in -1. Izmenjujočo 1 in -1 imenujemo B. Redundanca pri *AMI kodi* je

$$R=1-1/\log_2 3=0.37 \qquad (3\text{-}8)$$

Vidimo, da je takšna koda učinkovitejša, poleg tega pa je primerna za detekcijo napak in sinhronizacijo okvirjev.



Slika 3-7. AMI koda.

AMI koda ne rešuje problema sinhronizacije, kadar v simbolnem nizu nastopajo same ničle. Zaradi tega je bila razvita skupina kod, ki so v osnovi modificirana AMI koda.
To so ***HDB_n kode (High Density Bipolar Code)***. Pri tej skupini kod je določeno maksimalno število ničel (n), ki se lahko pojavijo. Kadar je v signalu več ničel kot je n, se naslednja ničla (n+1) pojavi kot enica, vendar takšna, da krši AMI kodo. Enico, ki ustreza temu pogoju imenujemo „V". HDB_n kode upoštevajo še naslednje: Kadar je od zadnje kršitve (V) minilo liho število enic, potem n ničel zakodiramo kot 00...0V, pri sodem številu pa kot B0...0V.
Koda HDB_3 se uporablja v evropskem in japonskem ISDN.

V sodobnih komunikacijah so zelo popularne **bločne kode**. Ideja bločnih kod je zakodirati N informacijskih bitov z M kodnimi, pri čemer je M>N. V večini primerov teh kod je razalika med M in N ena. Skupino bločnih kod imenujemo tudi NBMB.
V primeru bločenih kod lahko zapišemo modificirano enačbo za izračun redundance kot

$$R = 1 - \frac{M}{N} \qquad (3\text{-}9)$$

Večja kot sta M in N, manjša je redundanca kode. V primeru 3B4B kode je redundanca

$$R = 1 - \frac{3}{4} = 0.25 \qquad (3\text{-}10)$$

Vidimo, da že s 3B4B kodo dosežemo bistveno manjšo redundanco kot pri AMI kodi, poleg tega pa se tudi izognemo vsakršnim monotonim zaporedjem samih ničel, oziroma enic.
Kot primer si lahko ogledamo kodno tabelo za 3B4B kodo. Pri tej kodi kodiramo tri informacijske bite s štirimi kodnimi biti. Iz nabora možnosti kombinacij štirih bitov, kjer enica predstavlja logično enico, negativna enica pa logično ničlo izberemo tiste, ki so najbolj uravnoteženi.

Koda	***Zakodiran niz***
0 0 0	-1 -1 1 1
0 0 1	-1 1 -1 1
0 1 0	-1 1 1 -1
0 1 1	1 -1 -1 1
1 0 0	1 -1 1 -1
1 0 1	1 1 -1 -1
1 1 0	-1 -1 -1 1 ali 1 1 1 -1
1 1 1	-1 1 -1 -1 ali 1 -1 1 1

Tabela 3-2. 3B4B koda.

Iz tabele je razvidno, da vseh kombinacij ne moremo zakodirati z uravnoteženo kodo, zato zadnja dva niza zakodiramo z ne povsem uravnoteženimi kodami.
Pri kodah, kjer ne moremo uporabiti enakega števila pozitivnih in negativnih vrednosti, zavisi odločitev katero kodo uporabiti od predhodne sprotne vsote niza. Kadar je vsota predhodnih vrednosti negativna, uporabimo več pozitivnih vrednosti, kadar pa je vsota pozitivna, uporabimo več negativnih vrednosti.
Pri prenosu podatkov lahko uporabimo seveda tudi **večnivojske bločne kode**, ki jih imenujemo tudi MBNL kode.
Oglejmo si nekaj osnovnih lastnosti večnivojskega prenosa.

- Ker pasovna širina ni odvisna od števila nivojev, je pri večnivojskem prenosu enaka kot pri binarnem prenosu, čeprav smo povečali bitni pretok
- S povečanjem števila nivojev se na isti razdalji med nivoji poveča moč signala. Če ohranimo enako moč signala, se torej zmanjša razdalja med nivoji
- Ker je od razdalje med sosednjimi nivoji odvisna občutljivost na šum, se z večanjem števila nivojev povečuje verjetnost napake
- Napaka pri sprejemu enega simbola, lahko povzroči napako več bitov
- Dolga zaporedja enakih simbolov nam še vedno povzročajo enosmerno komponento in možen izpad sinhronizacije

Pri računanju redundance, uporabimo že znano formulo

$$R = 1 - \frac{M}{N \cdot \log_2 L} \qquad (11)$$

Upoštevati pa moramo:

$$M \leq N \cdot \log_2 L \qquad (12)$$

Kot primer večnivojske bločne kode si lahko ogledamo kodo 2B1Q kodo. Dva bita zakodiramo z enim štiriškim simbolom.
Kodna tabela za 2B1Q kodo izgleda takole.

Inf. biti	Koda
0 0	-3
0 1	-1
1 0	1
1 1	3

Tabela 3-3. 2B1Q koda.

Ker ponavadi prihaja do napak pri prenosu med sosednjimi nivoji, je predvsem kritičen preskok med nivojema -1 in 1, saj se v tem primeru napačno preneseta kar dva bita. V izogib temu je bila uvedena Grayeva koda, ki je modifikacija 2B1Q. Grayeva koda zakodira dva bita po spodnji tabeli

Inf. biti	Koda
0 0	-3
0 1	-1
1 1	1
1 0	3

Tabela 3-4. Grayeva koda.

Zanimiv je izračun redundance teh kod.

$$R = 1 - \frac{2}{\log_2 4} = 0 \qquad (3\text{-}13)$$

Ta koda je brez redundance. Z njo lahko povečamo bitni pretok brez povečanja pasovne širine, vendar nam ne izloča enosmerne komponente in ne pomaga pri sinhronizaciji.

3.1.4 Modulacijski postopki

V elektrotehniki pomeni moduliranje spreminjanje lastnosti nosilnega signala z nekim drugim informacijskim signalom. Nosilnemu signalu lahko spreminjamo amplitudo, fazo in frekvenco. Glede na to, kakšen je informacijski signal, ločimo analogne in digitalne modulacijske postopke. V današnjem času prednjačijo digitalni modulacijski postopki.
Pri digitalnih modulacijah želimo digitalni signal pretvoriti v signalno obliko, ki bo najbolj primerna za prenos preko določenega kanala. Prenašamo lahko v osnovnem pasu ali pa v višjih frekvenčnih legah. V osnovnem pasu je pomembno zgolj oblikovanje impulzov, medtem ko je za prenos v

višjih pasovih potrebno oblikovane impulze modulirati z nosilnim sinusnim signalom. Prestavitev signala v višje pasove nam prinese kar nekaj prednosti, saj omogoča:

- prilagoditev signala s karakteristikami prenosne linije oz. kanala
- frekvenčno multipleksiranje
- učinkovite antene sprejemljivih velikosti za prenos po RF kanalu
- dodeljevanje frekvenčnih pasov različnim aplikacijam

Glede na obliko ovojnice moduliranega signala lahko modulacije razvrstimo v dve skupini:

- modulacije z ravno ovojnico (constant envelope)
- modulacije s spremenljivo ovojnico (non-constant envelope)

Ta lastnost je pomembna zaradi nelinearnosti uporabljenih ojačevalnikov, ki popačijo amplitudo signala.

Analogni modulacijski postopki

Prvi modulacijski postopki so bili analogni. Ime analogni se nanaša na to, da je modulacijski signal v osnovnem pasu analogen. Tako ločimo tri osnovne modulacije amplitudno, frekvenčno in fazno, kjer se vse tri veličine spreminjajo zvezno. Kasneje so nastale še nekatere izboljšane verzije analognih modulacij kot so AM-SC (AM brez nosilca) AM-SSB (enobočna AM), vendar so v današnjem svetu digitalnih komunikacij skoraj zamrle. FM je široko uporabljena v analognem radiu.

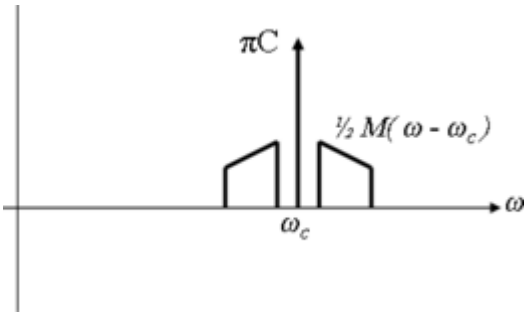
AM modulacije so v elektrotehniki uporabne večinoma za brezžični prenos podatkov. Amplitudna modulacija AM deluje tako, da spreminja amplitudo signala in s tem nosi informacijo. Amplitudna modulacija ima torej spremenljivo ovojnico.

Amplitudno moduliran analogni signal lahko opišemo kot

$$y(t) = A \cdot (1 + m \cdot x(t)) \cdot \cos(f_0 \cdot t) \qquad (3\text{-}14)$$

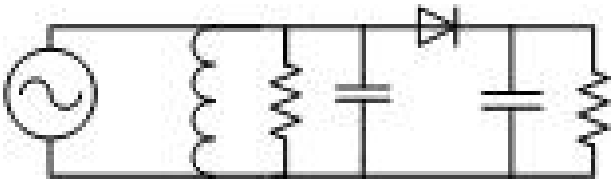
m je modulacijski indeks, ki lahko zavzame vrednosti med 0 in 1.

Če naredimo Fourierovo transformacijo moduliranega signala, hitro ugotovimo, da se poleg osnovnega nosilca pojavita še dva bočna signala. Amplitudno moduliran signal v frekvenčnem spektru je prikazan na spodnji sliki.



Slika 3-8. Frekvenčni spekter amplitudno moduliranega signala.

Amplitudno moduliran signal lahko demoduliramo na dva načina. Eno je detektor ovojnice. To je povsem enostavno vezje, ki se ujame na frekvenco nosilca in z diodnim vezjem detektira ovojnico.
Vezje je prikazano na spodnji sliki.



Slika 3-9. Demodulator.

Druga varianta detekcije je produktni detektor, ki množi modulirani signal s signalom lokalnega oscilatorja, ki ima enako frekvenco in fazo kot nosilec. Po filtriranju dobimo iz takšnega demodulatorja originalni signal.

Iz opisanega lahko takoj vidimo dve slabosti amplitudno moduliranega signala.

- Nosilec ne nosi nobene informacije, vendar je v njem skoncentriran velik del moči
- Pasovna širina se podvoji

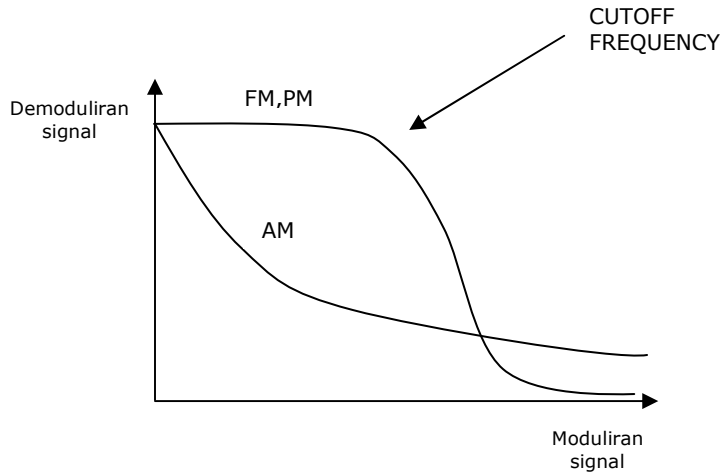
Oba problema sta rešljiva, zato obstaja več vrst modificiranih amplitudnih modulacij, ki so učinkovitejše pri porabi moči in pasovne širine, vendar na račun kompleksnosti naprav.
Prvi problem rešimo z AM modulacijo brez nosilca (SCAM – Surpressed Carrier Amplitude Modulation). V takšnem primeru potrebujemo na demodulatorju lokalni oscilator, ki ima enako frekvenco in fazo kot originalni. Če ta frekvenca ni povsem enaka, lahko pride do interference.
Drugi problem rešimo z enobočno amplitudno modulacijo. V tem primeru od celotnega AM signala odfiltriramo en bočni pas. Pri tem je problem samo filtriranje. Bolj kot so strmi boki, višjega reda mora biti sito. V praksi se to rešuje tako, da signal najprej moduliramo z neko nižjo frekvenco. Pri tej nižji frekvenci odrežemo nosilec, nato pa s frekvenčnim mešanjem signal prestavmo v višji frekvenčni pas.

V analognih amlitudnih modulacijah obstaja še kvadraturna amplitudna modulacija (QAM). Pri QAM lahko prenašamo v isti pasovni širini dva signala (drugi signal pomnožimo z nosilcem, ki je ortogonalen na osnovni nosilec). To se bi lahko uporabljalo za stereo prenos analognih signalov, vendar se to v praksi ni uveljavilo zaradi

- Bistveno boljše kvalitete frekvenčne modulacije
- Nekompatibilnosti z starim sistemom

V analognem svetu je demodulator za QAM zelo kompleksen.

Kotne modulacije so precej bolj zapletene, vendar nudijo pred amplitudnimi modulacijami veliko prednosti.
Ker je amplituda sprejetega signala konstantna (informacijo nosi sprememba frekvence ali faze in ne amplitude) in gre torej za modulacijo s konstantno ovojnico, lahko uporabljamo nelinearne ojačevalnike, ki bistveno poenostavijo sistem.
Če opazujemo razmerje SNR (Signal to Noise Ratio – razmerje signal šum) ugotovimo, da ima do neke mere demoduliran signal, ki je bil moduliran s kotnimi modulacijami boljše razmerje, kadar pa SNR moduliranega signala zelo pade, nam nudi amplitudna modulacija nudi boljše razmerje SNR. Razmere prikazuje spodnja slika.

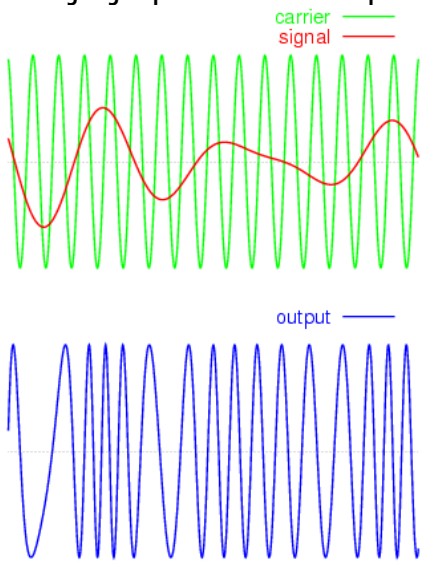


Slika 3-10. Primerjava poteka SNR pri amplitudni in frekvenčni modulaciji.

Zaradi tega je večina vojaških sistemov grajena tako, da v normalnih razmerah deluje s frekvenčno moduliranimi signali, kadar pa se razmere na prenosni poti poslabšajo, preklopi v amplitudno modulacijo. Zaradi tako dobrega razmerja S/N, so kotne modulacije danes tako množično uporabna.
Kotne modulacije razdelimo na dve vrsti modulacij, ki so med seboj zelo podobne, in sicer sta to:

- Fazna modulacija (PM)
- Frekvenčna modulacija (FM)

Primer frekvenčne modulacije je prikazan na spodnji sliki:



Slika 3-11. Primer frekvenčne modulacije.

Pri fazni modulaciji torej informacijo nosi sprememba faze, ki jo lahko zapišemo kot:

$$\Phi(t) = \omega_0 t + \Delta\Phi \cdot x(t) \qquad (3\text{-}15)$$

Fazno moduliran signal lahko tako zapišemo kot:

$$y(t) = \cos(\omega_0 t + \Delta\Phi \cdot x(t)) \qquad (3\text{-}16)$$

Nasprotno pa pri frekvenčni modulaciji, informacijo nosi sprememba frekvence.

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cdot x(t) \qquad (3\text{-}17)$$

Fazo dobimo z integracijo frekvence po času

$$\Phi(t) = \int \omega(t)dt = \omega_0 t + \Delta\omega \int x(t)dt \qquad (3\text{-}18)$$

In od tod sledi enačba frekvenčno moduliranega signala:

$$y(t) = \cos(\omega_0 t + \Delta\omega \int x(t)dt)$$

Vidimo, da sta signala fazno in frekvenčno moduliranega signala zelo podobna.

Frekvenčni modulator najpreprosteje izvedemo z napetostno krmiljenim oscilatorjem (VCO – Voltage Controlled Oscilator)

Digitalni modulacijski postopki

Tudi digitalne modulacije temeljijo na treh osnovnih modulacijah, ki so amplitudna frekvenčna in fazna. V digitalni tehniki lahko govorimo o preklapljanju. Od tod ime »keying«

- amplitudno skočna modulacija (ASK – Amplitude Shift Keying)
- frekvenčno skočna modulacija (FSK – Frequency Shift Keying)
- fazno skočna modulacija (PSK – Phase Shift Keying)

Z leti je bilo razvitih kar nekaj variacij in kombinacij teh osnovnih modulacij z namenom, da bi v dani situaciji, čim bolje izkoristili prenosni medij. Nekatere so naslednice, nekatere so le izpeljane iz osnovnih modulacij.

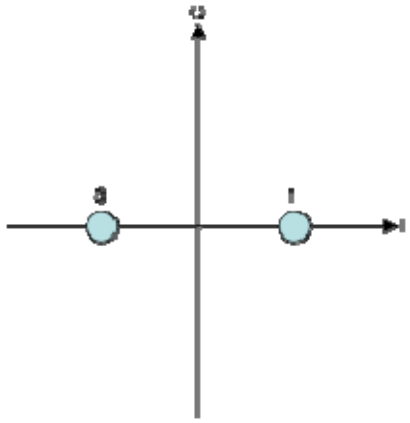
Amplitudne in fazne modulacije (in kombinacije le-teh) ponavadi predstavljamo v konstelacijskem diagramu. Točke na konstelacijskem diagramu imenujemo konstelacijske točke in predstavljajo abecedo modulacije. Oddaljenost točke od izhodišča predstavlja amplitudo, kot ki ga tvori daljica med točko in izhodiščem z realno osjo pa fazo signala.

Modulacijski postopki z ravno ovojnico so FSK in PSK modulacijski postopki, medtem ko imajo vsi ASK modulacijski postopki in kombinacije ASK modulacijskih postopkov s PSK modulacijskimi postopki spremenljivo ovojnico.

Najpogostejši digitalni modulacijski postopki so:

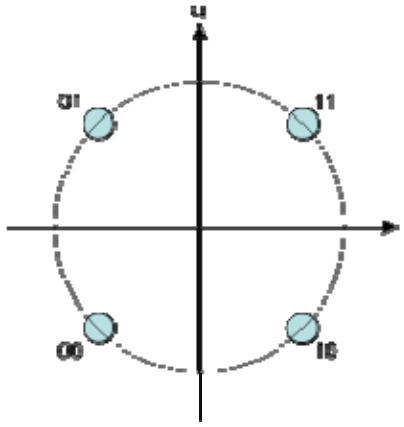
- Fazna modulacija (PSK – predvsem BPSK in QPSK)
- Frekvenčna modulacija (FSK)
- Amplitudna modulacija (ASK)
- Kvadraturna amplitudna modulacija (QAM)
- Minimum shift keying (MSK)
- Gaussian minumum shift keying (GMSK)

Fazna modulacija prenaša informacijo s spremembo faze nosilnega signala. Pri fazni modulaciji je uporabljeno končno število različnih faz, ki prenašajo informacijo, torej je vsaki fazi dodeljeno nek vzorec binarnih vrednosti.
Najpreprostejša fazna modulacija je **BPSK** (Binary Phase Shift Keying), poznana tudi pod imenom 2-PSK. BPSK uporablja dve fazi, ki se razlikujeta za 180 stopinj. Ta modulacija je najpreprostejša, saj se mora na kanalu zgoditi precejšnja motnja, da sprejme demodulator napačno odločitev. Seveda pa je tovrstna modulacija tudi najmanj učinkovita, saj lahko prenese zgolj 1 bit na simbol.
Konstelacijski diagram je prikazan na spodnji sliki:



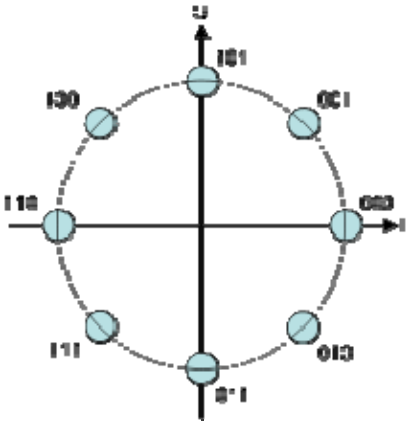
Slika 3-22. Konstelacijski diagram BPSK.

Učinkovitejša fazna modulacija je **QPSK** (Quadrature Phase Shift Keying), poznana tudi pod imenom 4-PSK. QPSK lahko zakodira dva bita na simbol. Simboli so ponavadi kodirani z Grayevo kodo, da minimiziramo BER. Vidimo, da z QPSK v primerjavi z BPSK porabimo za isto bitno hitrost dvakrat manjšo pasovno širino.
Konstelacijski diagram QPSK je prikazan na spodnji sliki.



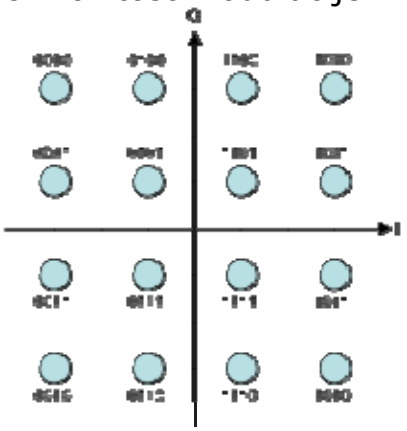
Slika 3-23. Konstelacijski diagram QPSK.

Obstajajo tudi višji redi faznih modulacij. Teh je seveda lahko poljubno, vendar se v praksi zaradi previsokega števila napak in zaradi drugih učinkovitejših modulacij uporablja maksimalno 8-PSK. Konstelacijski diagram 8-PSK z Grayevo kodo je predstavljen na spodnji sliki.



Slika 3-24. Konstelacijski diagram 8-PSK.

QAM modulacijski postopki so kombinacija PSK in ASK modulacijskih postopkov. Z večanjem stanj oz. simbolov modulacije, lahko zelo izboljšamo spektralno učinkovitost modulacije.



Slika 3-25. Konstelacijski diagram QAM.

V zadnjem času je vedno bolj aktualna OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) modulacija, saj je zaradi svojih lastnosti zelo primerna za disperzijske kanale. Gre za kombinacijo frekvenčnega multipleksa in modulacije. Celotno pasovno širino sistema razdelimo na več ozkih podkanalov, nato pa na vsakem od njih prenašamo različno informacijo (lahko tudi z različno modulacijo). Največja slabost OFDM-a je zahteva po uporabi linearnih ojačevalnikov.

Kriteriji za izbiro modulacijskega postopka

Osnovna kriterija po katerih ocenjujemo in primerjamo različne modulacijske postopke sta:

- spektralna učinkovitost
- močnostna učinkovitost

Spektralno učinkovitost η definiramo kot razmerje števila bitov na sekundo, ki jih prenesemo v izbranem frekvenčnem pasu. Pove nam kako učinkovito nek modulacijski postopek izrabi pasovno širino. Le-ta je omejena, še zlasti v radijskih komunikacijah, zato želimo po čim ožjem frekvenčnem pasu doseči čim večjo prenosno hitrost.

$$\eta = \frac{prenosna_hitrost}{pasovna_širina_kanala}\left[bit/s/Hz\right] \qquad (3\text{-}19)$$

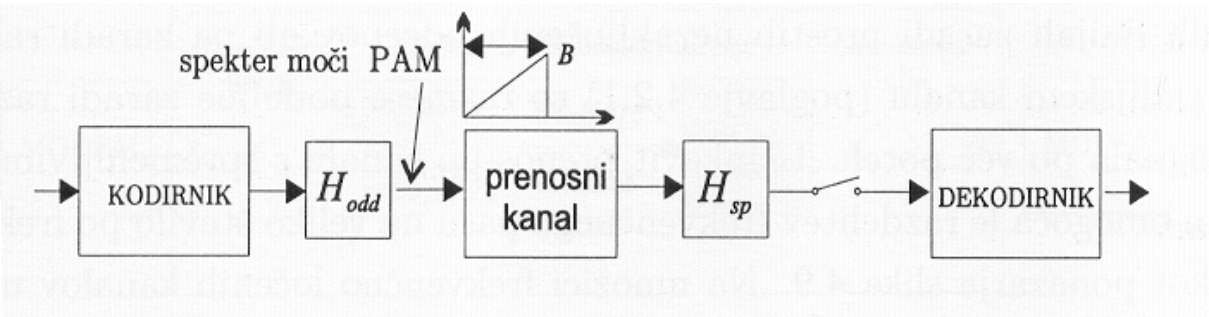
Močnostno učinkovitost bi lahko izračunali z enačbo (19), le da bi v imenovalcu uporabili moč *W*, vendar tak kazalec ne bi imel nobene veljave. Prenesena informacija namreč ni odvisna samo od oddajne moči temveč tudi od moči šuma. Zato za primerjavo uporabljamo razmerje moči signala proti moči šuma – SNR (Signal to Noise Ratio). Smiselno je, da medsebojno primerjamo digitalne sisteme na podlagi relativne moči potrebne za določeno prenosno hitrost, seveda v enakem šumnem okolju. Definicija močnostne učinkovitosti je definirana kot razmerje signal/šum potrebno za doseg izbrane bitne napake P_b pri prenosu signala preko Gaussovega kanala. Modulacijske postopke ponavadi primerjamo pri verjetnosti napake $P_b = 10^{-5}$.

Pri določenih sistemih so poleg spektralne in frekvenčne učinkovitosti pomembni še drugi kriteriji:

- občutljivost sistema na Dopplerjev premik frekvence in Rayleighov presih polja
- občutljivost sistema na selektivni presih polja
- občutljivost sistema na nelinearna popačenja v močnostnih ojačevalnikih
- občutljivost sistema na medkanalno in sokanalno interferenco
- kompleksnost sistema
- energetska poraba sistema

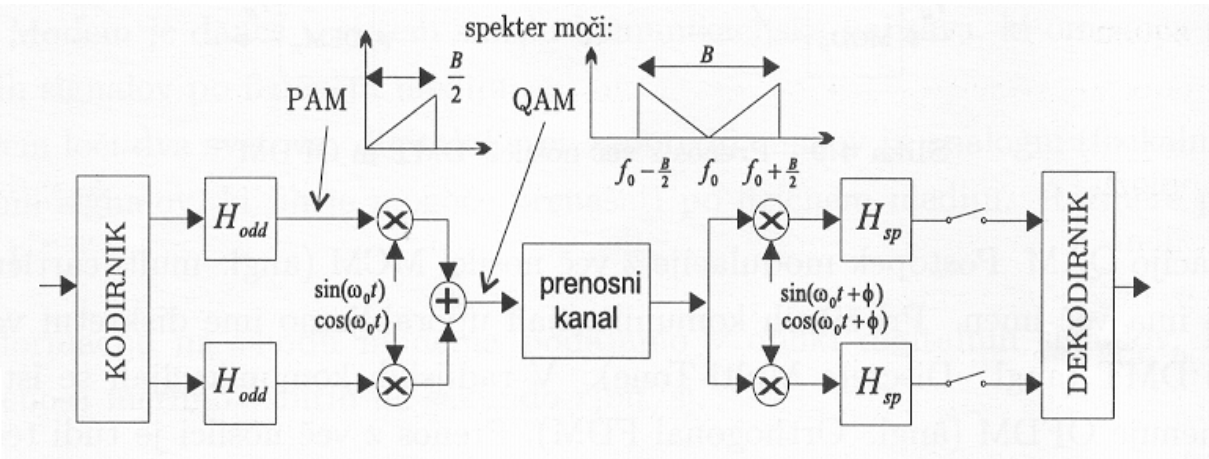
Izbira modulacijskega postopka je odvisna od frekvenčnega pasu, ki je namenjen za digitalni prenos. Če imamo za prenos digitalnih signalov na razpolago navzdol neomejen frekvenčni pas, potem modulacija ni potrebna. Prenos v osnovnem pasu od frekvence nič dalje (angl. baseband transmission) uporablja različne postopke linijskega kodiranja. Postopki linijskega kodiranja so bili v začetku razviti predvsem za razmeroma enostavne prenosne sisteme, kjer prenašamo en bit na simbol. Pri načrtovanju cenenega prenosnega sistema nastopa poleg omejitve frekvenčnega pasu tudi več drugih dejavnikov, ki pogojujejo izbiro linijske

kode. Pogosto je pri izbiri linijske kode potreben kompromis glede na nasprotujoče si lastnosti kode, kot so na primer občutljivost na disperzijo, širina spektra in možnosti ekstrakcije takta. V sodobnih prenosnih sistemih za prenos v osnovnem pasu pogosto uporabljamo večnivojsko kodiranje simbolov m-PAM (Pulse Amplitude Modulation), ki ga predstavlja slika 3-26.
Prenos v višji frekvenčni legi (angl. passband transmission) zahteva uporabo modulacijskega postopka. Med množico modulacijskih postopkov (amplitudnih, faznih in frekvenčnih) je za digitalni prenos po žičnih vodih največkrat v rabi amplitudno-fazna modulacija QAM (Quadrature Amplitude Modulation).



Slika 3-26. Digitalni prenos v osnovnem pasu: m-PAM.

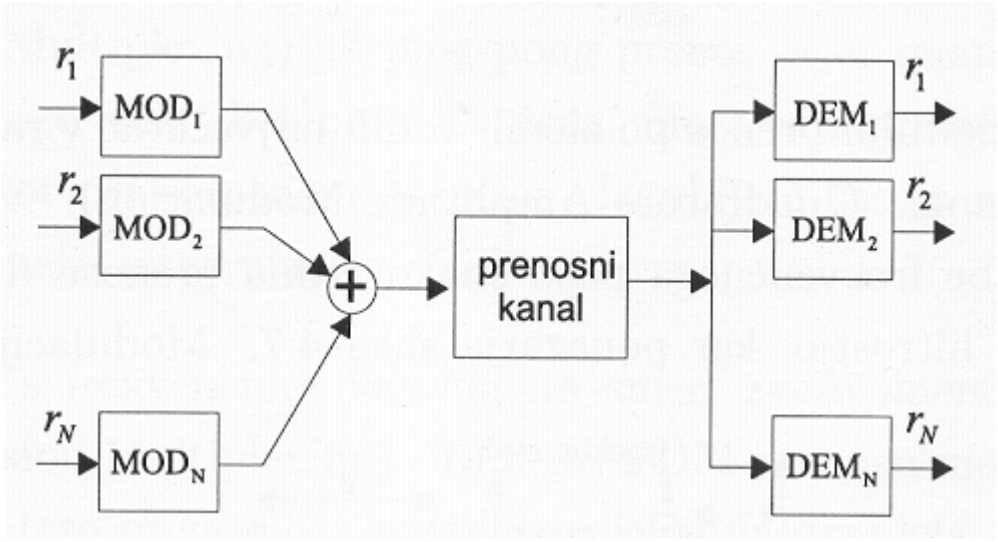
V osnovi je QAM po učinkovitosti uporabe frekvenčnega pasu enakovredna prenosu dveh PAM signalov s polovično simbolno hitrostjo, kar ponazarja slika 3-27.



Slika 3-27. Digitalni prenos v prenesenem pasu: M-QAM.

Pri žičnem prenosu in tudi pri brezžičnem prenosu mnogokrat nastopijo razmere, kjer so določeni deli razpoložljivega frekvenčnega pasu zaradi velikega slabljenja signalov ali pa zaradi motenj izrazito neugodni za prenos. Takšne razmere nastopajo na naročniških linijah zaradi prostih nezaključenih odcepov ali pa zaradi radijskih motenj. Na radijskem kanalu so razmere podobne zaradi razširjanja radijskega signala po več poteh.

Učinkovit prenos po kanalu s spremenljivim razmerjem signal-šum omogoča le razdelitev frekvenčnega pasu na veliko število po frekvenci ozkih kanalov, kot ponazarja slika 3-28. Na množici frekvenčno ločenih kanalov uporabljamo

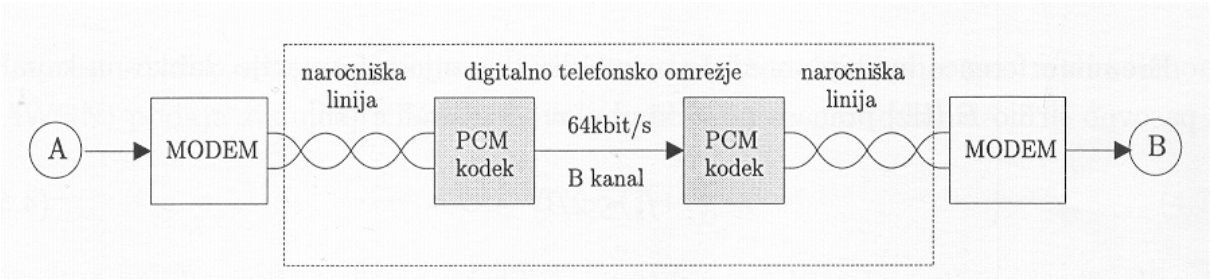


Slika 3-28. Prenos z več nosilci: DMT in OFDM.

modulacijo QAM. Postopek modulacije z več nosilci MCM (Multi Carrier Modulation) ima več imen. Pri žičnih komunikacijah uporabljamo ime diskretni večtonski prenos DMT (Discrete Multi-Tone). V radijskih komunikacijah se isti postopek imenuje OFDM (Orthogonal FDM). Prenos z več nosilci je tudi teoretično optimalen in edini omogoča približevanje k teoretični prenosni kapaciteti na kanalu z neenakomernim razmerjem signal-šum. Postopek prenosa z več nosilci je poznan že mnogo let, praktično uporabo postopka pa je omogočil šele razvoj tehnologij digitalne obdelave signalov v zadnjih desetih letih.

3.1.5 Omejitve prenosnih kapacitet

Komunikacija v fizikalnem svetu vedno poteka v obliki časovno zveznih signalov. Končno informacijo lahko posredujemo s pomočjo rezerviranih časovno zveznih signalnih oblik, ki jih moramo biti sposobni prepoznati pri sprejemu. Preprosti primeri so poznani iz zgodovine digitalnih komunikacij na primer: kurjenje kresov, dimni signali, zvoki bobna, mornariške zastavice itn. Vlogo sprejemnika in oddajnika je v naštetih primerih vedno opravljal človek.
Razmere v sodobnem svetu ponazorimo z modelom modemskega prenosa preko telefonskih naročniških vodov na sliki 3-29. Digitalni komunikacijski kanal povezuje točko A s točko B. Glavni značilni parametri povezave so prenosna hitrost r, pogostost napak pri prenosu bitov BER in zakasnitev pri prenosu T. Vzpostavitev digitalnega komunikacijskega kanala po fizikalnem prenosnem mediju omogoča par modemov.

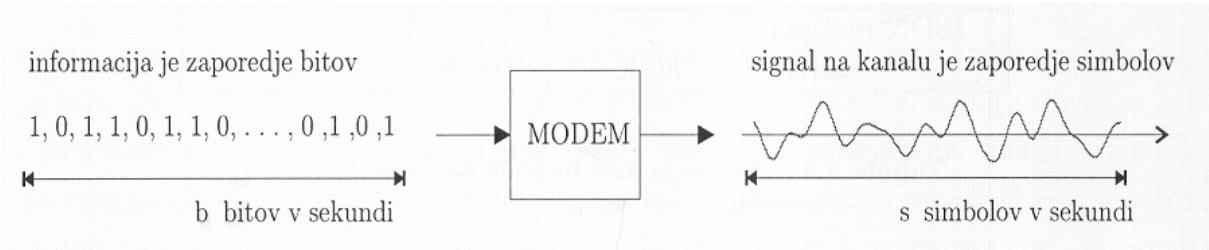


analogni (časovno zvezni) komunikacijski kanal

Slika 3-29. Model modemske povezave po telefonskem govornem kanalu.

Modem je dobil ime po osnovnih funkcijah modulacije in demodulacije, ki pa ju je že zdavnaj presegel. Sodobni modemi opravljajo poleg modulacije še relativno kompleksne postopke kanalskega kodiranja, izločanja odbojev in izravnave prenosne karakteristike kanala. Modem je danes v širšem smislu komunikacijska naprava, ki omogoča prenos digitalnih signalov po fizičnem mediju.
Modem loči dva svetova: digitalni svet zaporedij znakov in analogni (fizikalni) svet električnih signalov, ki jih je mogoče prenašati po fizičnem mediju. Razmere podaja slika 3-30:

- Informacijo na vhodu modema podajamo v obliki digitalnih signalov, hitrost prenosa merimo v bitih na sekundo *r[bit/s]*.
- Izhod modema oddaja zaporedja signalnih oblik, ki predstavljajo simbole iz omejene abecede. Hitrost niza simbolov merimo v simbolih na sekundo f_s*[simbol/s=baud].*[1]



Slika 3-30. Modem.

Hitrost prenosa bitov *r* je produkt simbolne hitrosti f_s in števila bitov b_s, ki jih predstavlja en simbol na izhodu kodirnika:

$$r = b_s f_s \tag{3-20}$$

Simbolna hitrost je omejena s širino frekvenčnega pasu *B*, ki je na razpolago za prenos po fizičnem mediju. Pasovna širina kanala je pri kovinskih žičnih vodih navzgor omejena s slabljenjem in šumom, dodatna omejitev razpoložljivega frekvenčnega pasu pa je lahko tudi posledica frekvenčnega razdeljevanja fizičnega medija na več kanalov.

Brez interference med zaporednimi simboli, ki nosijo informacijo, lahko na kanalu s pasovno širino *2B [Hz]* prenašamo f_s simbolov v sekundi:

$$f_s \leq 2B \tag{3-21}$$

Teoretično minimalno potrebno pasovno širino za prenos brez intersimbolne interference zato imenujemo Nyquistova pasovna širina:

$$B_N = \frac{f_s}{2} \tag{3-22}$$

Praktični prenosni sistemi lahko delujejo s pasovno širino, ki je le malo večja od Nyqustove. Zagotovitev pasovne širine na prenosnem mediju je potreben, ne pa tudi zadosten pogoj za kvaliteten digitalni prenos signalov. Pri prenosu po disperzivnem kanalu moramo v sprejemniku izločiti neželeno intersimbolno interferenco, za kar uporabljamo adaptivna digitalna sita (izravnalnike).
Število bitov na simbol b_s določata kodirni in modulacijski postopek in je merilo učinkovitosti modema. Za ponazoritev razmer podaja tabela 3-5 nekaj tipičnih zgledov. Na kanalu z dano pasovno širino lahko torej povečamo hitrost prenosa bitov, če uporabimo veliko število različnih simbolov (signalnih oblik) na izhodu modema. Prenos signalov je z naraščanjem števila simbolov vedno bolj občutljiv na šum, zato bs ne moremo neomejeno povečevati. Hitrost prenosa digitalnih signalov na danem kanalu je navzgor omejena z dopustno pogostostjo napak (BER), ki je glavno merilo kvalitete vsake digitalne zveze.

[1] francoski izumitelj Emile Baudot

prenosni sistem	f_s[simbol/s]	r[bit/s]	b_s[bit/simbol]
V.29 modem 16-QAM	2400	9600	4
V .32 modem 32- TCM	2400	9600	4
V.34 modem 960-TCM	3429	28800	8.4
ISDN modem 2B1Q	80 k	160 k	2

Tabela 3-5. Razmerja med bitno in simbolno hitrostjo.

Teoretično mejo za hitrost prenosa informacije brez izgub po šumnem komunikacijskem kanalu imenujemo tudi Shannonova prenosna kapaciteta kanala *C*. Praktični prenosni sistemi lahko delujejo le s hitrostjo, ki je manjša Shannonove kapacitete:

$$r < C \tag{3-23}$$

Nyquistov teorem

Preprost izračun teoretične mejne hitrosti za model kanala z belim gaussovim šumom (AWGN) podaja znamenita Shannonova formula za kapaciteto kanala:

$$C = B\log_2\left(1+\frac{P_s}{P_n}\right). \tag{3-24}$$

Pogoj za približevanje k Shannonovi kapaciteti je uporaba zahtevnih postopkov kanalskega kodiranja in dekodiranja, ki pa vnašajo tudi dodatne zakasnitve.
Kanalski kodirnik dodaja poleg zapisa informacije še dodatne (redundantne) bite, zato mora biti prenosna hitrost celo večja kot pri nekodiranem prenosu. Pozitivni učinek kanalskega kodiranja se izkaže v sprejemniku, kjer lahko kanalski dekodirnik zaradi vnešene redundance loči bolj verjetna zaporedja simbolov od manj verjetnih zaporedij simbolov. Učinek kanalskega kodiranja in dekodiranja izražamo s kodirnim ojačenjem. Kodirno ojačenje lahko razumemo v primerjavi kodiranega prenosa z nekodiranim prenosom z enako pogostostjo napak kot faktor navideznega zmanjšanja moči šuma na kanalu. Postopka kanalskega

kodiranja in kanalskega dekodiranja tako zmanjšata pogostost napak pri prenosu po šumnem kanalu. Večina sodobnih žičnih in brezžičnih prenosnih sistemov uporablja postopke kanalskega kodiranja. V modemih za prenos po govornih kanalih se uporablja konvolucijske mrežne (trellis) kode.

3.1.6 Učinkoviti prenosni sistemi

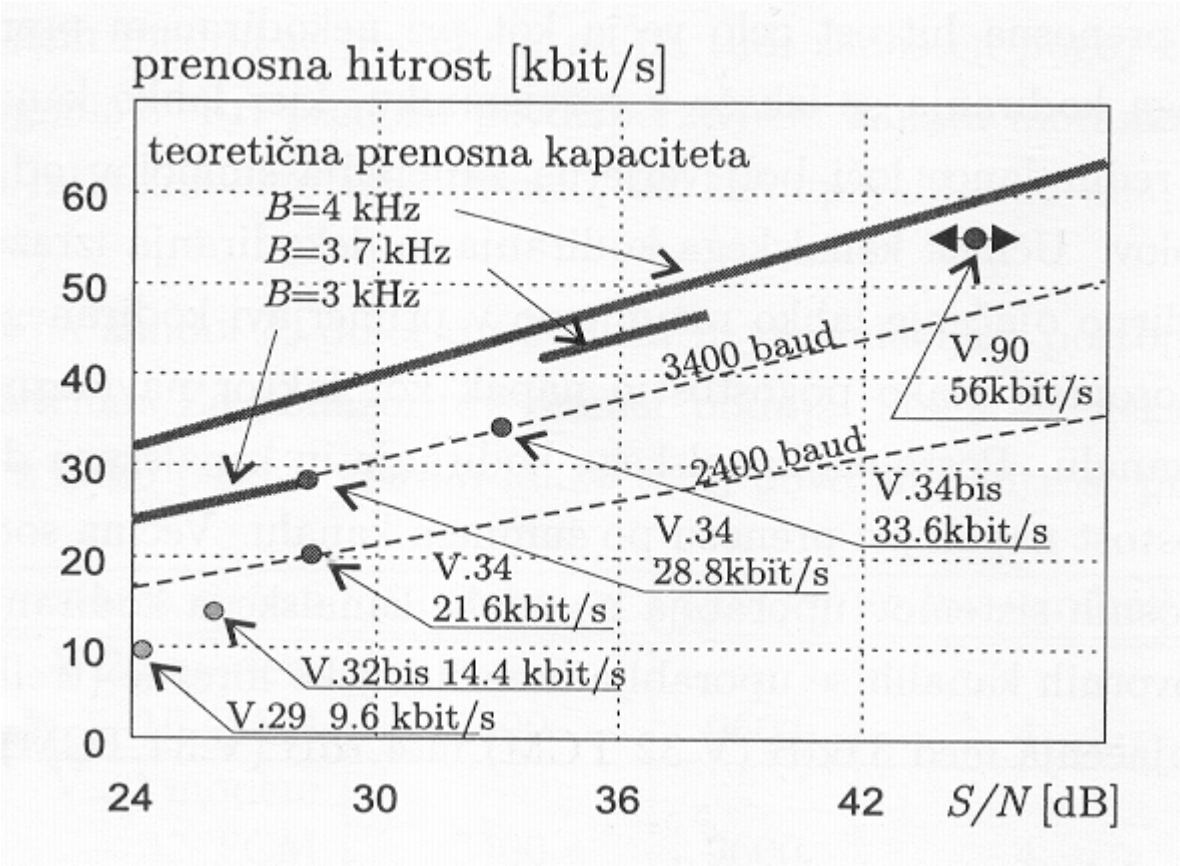
Razvoj telefonskih modemov

Sinonim za modem predstavljajo telefonski modemi. Ti delujejo v frekvenčnem območju, ki je bilo po CCITT na začetku omejeno od 300 Hz do 3400 Hz, z digitalizacijo hrbteničnega omrežja pa je frekvenčni pas zaradi vzorčenja omejen na 4000 Hz. Zgodba o razvoju modemov je odgovor na vprašanje kako maksimalno povečati razpoložljivo prenosno hitrost po mediju. Učinkovitost modemov je zaradi zmožnosti, ki jih ponuja tehnologija digitalne obdelave signalov pri nizkih frekvencah, trenutno največja ravno pri prenosu po analognem govornem kanalu.
Prenosne hitrosti sodobnih modemov (V.34bis) so že presegle stevilko, ki je vrsto let veljala za teoretično kapaciteto govornega kanala. Razlog navideznega konflikta je podcenjena kvaliteta statističnega modela prenosnega kanala za izračun teoretične kapacitete. Slika 3-31 podaja teoretične prenosne kapacitete in trenutno razpoložljive prenosne kapacitete analognega govornega kanala. Poteki odvisnosti teoretičnih prenosnih kapacitet od razmerja signal/šum so v skladu z enačbo 3-24:

- Analogni govorni kanali preko zastarelega analognega javnega telefonskega omrežja so imeli ocenjeno razmerje signal/šum 24-28 dB in pasovno širino približno 3 kHz. Teoretična prenosna kapaciteta je v takšnem omrežju manjša od 30 kbit/s.

- S popolno digitalizacijo hrbteničnega dela omrežja je šum na govornem kanalu v povprečju manjši za približno 10 dB, nekoliko pa se je povečala tudi pasovna širina B = 3,7 kHz.

- Zgornji graf določa potek Shannove kapacitete govornega kanala pri največji mogoči pasovni širini B = 4 kHz



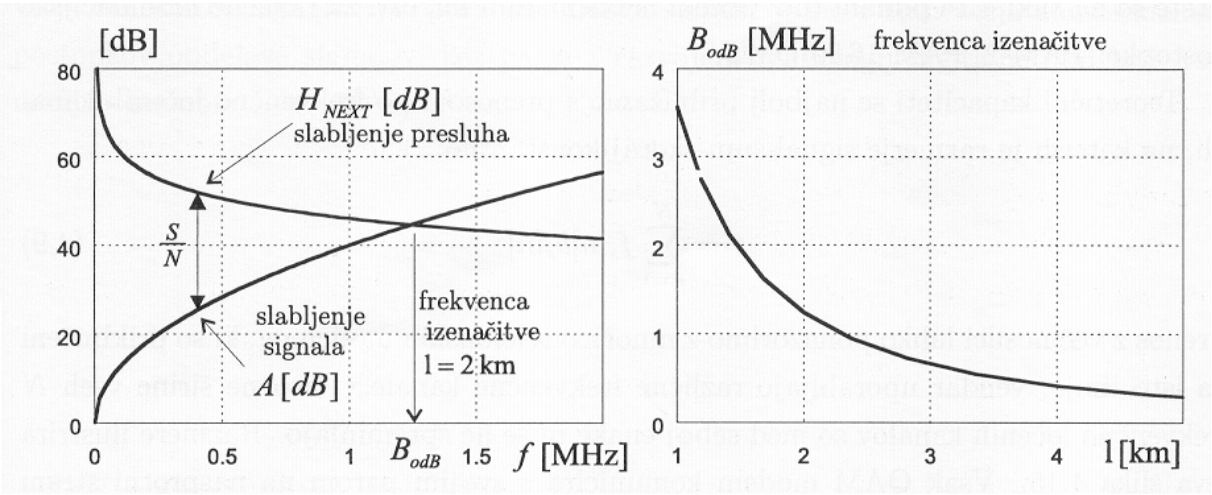
Slika 3-31. Prenosne hitrosti modemov.

Razpoložljive prenosne hitrosti standardnih modemov so podane s točkami v diagramu. Pri delovanju v načinu po starejših standardih (V.29, V.32, V.32bis) oddaja modem na naročniško linijo 2400 simbolov v sekundi, po novejših standardih (V.34) pa je simbolna hitrost lahko tudi do 3429 simbolov v sekundi. S prekinjeno črto sta na sliki 3-31 narisana poteka tehnološko razpoložljivih prenosnih kapacitet, ki jih omogoča uporaba kompleksnih postopkov modulacije, kodiranja, izločanja odbojev in izravnave prenosne karakteristike kanala. Tehnološko razpoložljiva prenosna kapaciteta govornega kanala je zaradi razvoja digitalne obdelave signalov vse bližje teoretični meji.

Najnovejši razpoložljivi modemi (V.90) izkoriščajo dejstvo, da ima ponudnik modemskega dostopa do interneta digitalno povezavo v javno telefonsko omrežje. Izločitev ene analogno-digitalne pretvorbe zmanjša šum in omogoči povečanje prenosne hitrosti proti uporabniku na 56kbit/s. Za povezave, ki imajo na obeh krajeh analogni dostop do javnega omrežja, je prenosna hitrost še vedno omejena na 33.6kbit/s.

Ključni funkciji modema sta tudi kontrola napak in kompresija podatkov. Postopek prepoznavanja in odpravljanja napak je vključen v protokolih za kontroliranje napak pri prenosu. Detekcija napak lahko temelji na preverjanju paritete ali CRC (angl. Cyclic Redundancy Check). Popravljanje napak pri prenosu je možno z dodajanjem redundance (FEC) ali pa s ponavljanjem prenosa (ARQ).

Prenosna zmogljivost naročniške linije je pri modemskem prenosu je zelo skromno izkoriščena, ker je frekvenčni pas omejen s sitom PCM kodeka v lokalni centrali. Omejitev je pogoj za izkoriščanje digitalnega telefonskega omrežja, ki prenaša govorni kanal s hitrostjo 64kbit/s.
Če dodamo naročniški liniji na obeh krajeh zveze nov par modemov, se pasovna širina lahko poveča do meje, ki jo določata slabljenje in šum (presluh) na liniji. Kot mejno frekvenco lahko vzamemo frekvenco izenačitve, ki jo lahko izračunamo na osnovi modela slabljenja in modela šuma. Oceno pasovne širine za primer naročniške linije podaja slika 3-32. Natančnost ocene je odvisna predvsem od veljavnosti modela šuma.

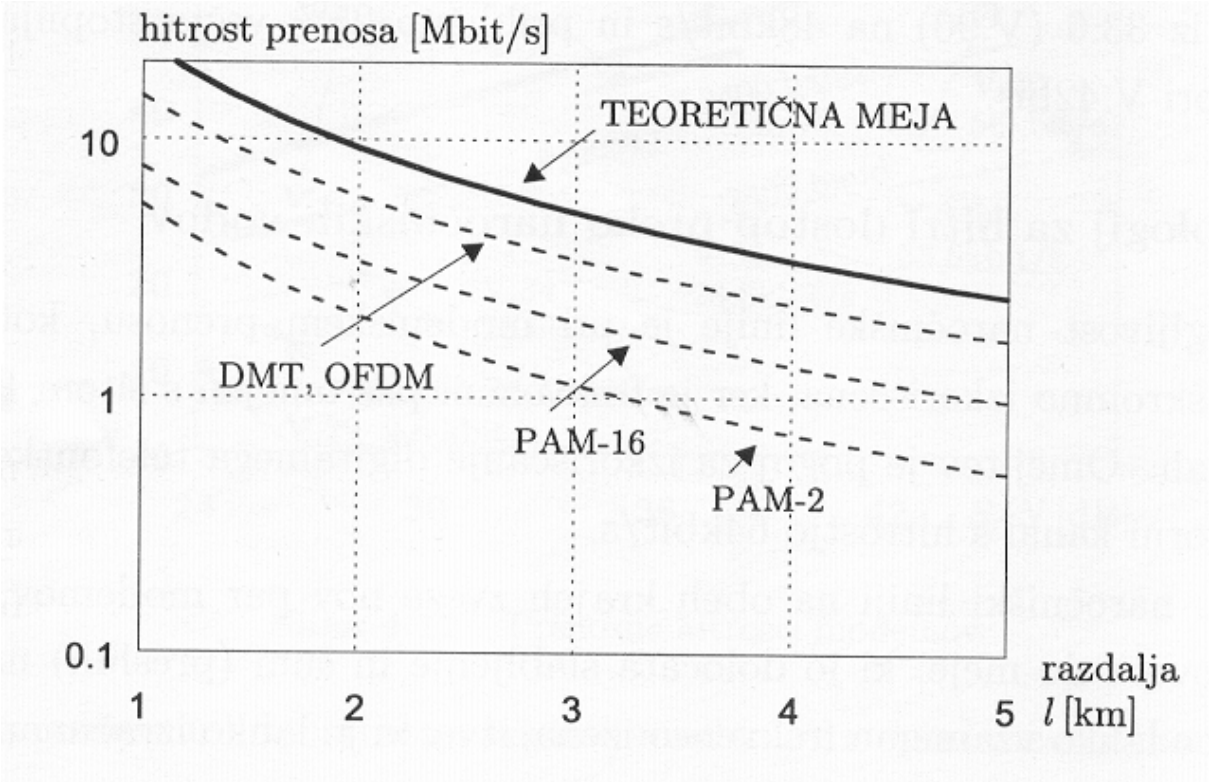


Slika 3-32. levo: Potek razmerja signal-šum v okolju bližnjega presluha. desno: Frekvenca izenačitve: $\frac{S}{N}$ = 0dB.

Razmere so zelo odvisne od načina ločevanja smeri prenosa. Pri sočasnem prenosu brez frekvenčnega ločevanja smeri je bližnji presluh glavni omejevalni dejavnik. Če sta kanal za prenos podatkov do uporabnika in kanal za prenos od uporabnika med seboj frekvenčno ločena, potem bližnji presluh ne moti. Glavna motnja je v tem primeru največkrat daljni presluh. Na osnovi poteka razmerja signal – šum lahko naredimo tudi oceno teoretične prenosne kapacitete, ki jo določa enačba:

$$C = \int_0^{\infty} \log\left(1 + \frac{S(f)}{N(f)}\right) df \qquad (3\text{-}25)$$

Potek teoretične prenosne kapacitete podaja slika 3-33. Poleg teoretične prenosne kapacitete so na sliki 3-33 podani tudi poteki maksimalnih hitrosti za različne modulacijske postopke: PAM-2, PAM-16 in DMT.

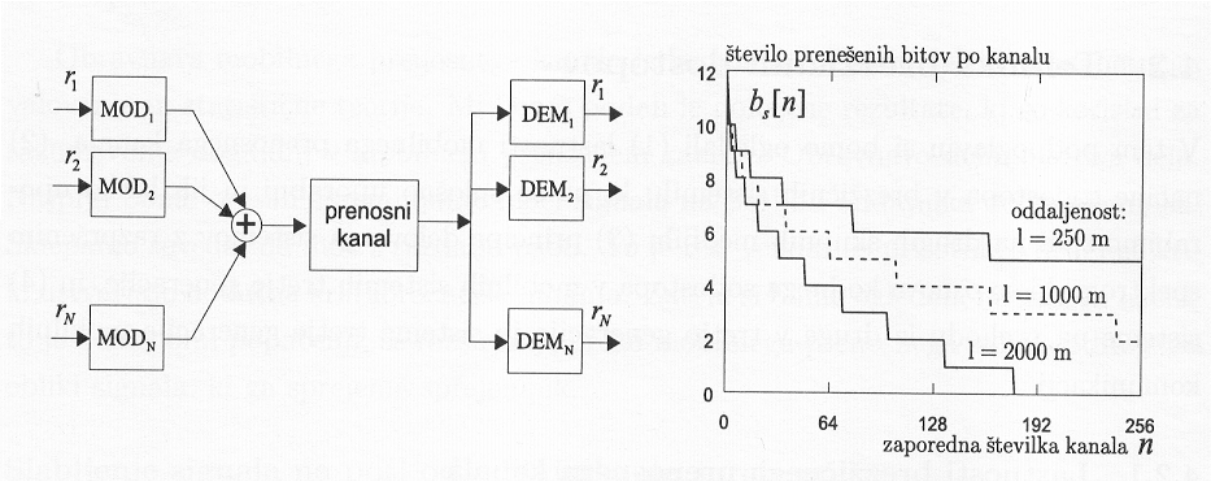


Slika 3-33. Meje prenosne kapacitete.

Teoretični kapaciteti se najbolj približamo s prenosom po frekvenčno ločenih kanalih, na katerih je razmerje signal-šum skoraj konstantno:

$$r = \sum_{n=1}^{N} f_s[n] b_s[n] \tag{3-26}$$

Prenos z več nosilci lahko ponazorimo z množico telefonskih modemov, ki so priključeni na isto linijo, vendar uporabljajo različne frekvenčne kanale. Pasovne širine vseh N frekvenčno ločenih kanalov so med seboj enake in se ne spreminjajo. Razmere ilustrira leva slika 3-34. Vsak QAM modem komunicira s svojim parom na nasprotni strani linije in vsak par modemov lahko adaptivno uravnava število simbolov $b_s[n]$ glede na število napak pri prenosu. Desna slika 3-34 prikazuje porazdelitev števila bitov po posameznih kanalih za vsak simbol, ki ga modem pošlje na linijo.



Slika 3-34. DMT modem.

Porazdelitve bitov so podane za primer razdelitve frekvenčnega pasu (0 Hz -1.024 MHz) na 256 kanalov. Na kanalih z velikim razmerjem signal-šum tako prenašamo več informacije, kot na kanalih z majhnim razmerjem signal-šum. Modemi, ki delujejo na najvišjih frekvencah, zato v primerjavi z modemi na nižje ležečih kanalih zelo malo prispevajo k skupni prenosni hitrosti *r*. Če omejimo maksimalno število bitov na simbol v vsakem "malem modemu" na 15, je največja hitrost prenosa v brezšumnem okolju omejena na približno 15Mbit/s.
Prenosna hitrost DMT modema se uravnava glede na razmere na prenosni poti. Če na primer nastopi motnja v zelo ozkem pasu okrog ene frekvence (npr. radijski AM oddajnik), se prenosna hitrost zmanjša za tisti del, ki ga izgubimo na kanalih z motnjo. Če nastopi impulzna motnja, se prenosne hitrosti zmanjšajo po vseh kanalih. Možnost prilagajanja na motnje je ena glavnih prednosti postopka modulacije z več nosilci. Slaba stran modulacije z več nosilci v primerjavi z QAM je predvsem večja zakasnitev signalov pri prenosu. Druga slabost je sicer tudi večja kompleksnost postopkov obdelave signalov, kar pa je z razvojem tehnologij digitalne obdelave vse manj pomembno.

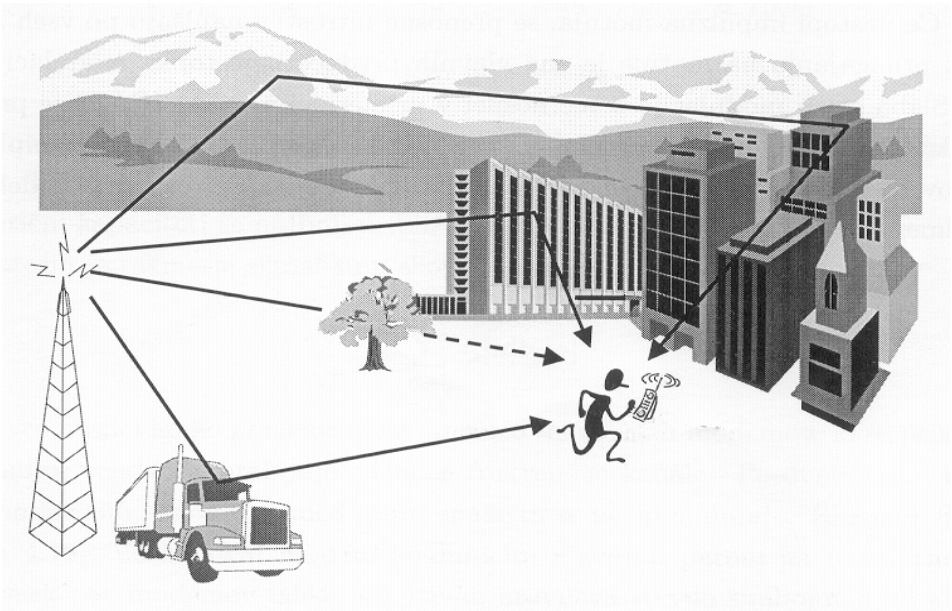
3.2 Tehnika brezžičnih dostopov

v tem podpoglavju si bomo ogledali:

1. lastnosti mobilnega prenosnega kanala,
2. načine sodostopa v brezžičnih sistemih, ki pa so splošno uporabni in jih lahko uporabimo tudi na drugih skupnih medijih,
3. principe delovanja sistemov z razpršenim spektrom, ki so osnova kodnega sodostopa v mobilnih sistemih tretje generacije, in
4. sisteme na prehodu iz druge v tretjo generacijo in sisteme tretje generacije mobilnih komunikacij.

3.2.1 Lastnosti brezžičnega prenosnega kanala

Če želimo razumeti delovanje brezžičnih sistemov, si moramo podrobneje ogledati lastnosti brezžičnega prenosnega kanala. Brezžični prenosni kanal je dokaj neprijazen za prenos signala. To se posebej velja takrat, kadar gre za mobilno varianto, to je, kadar se giblje uporabnik in/ali okolica. Takrat govorimo o mobilnem prenosnem kanalu. Signal se med oddajnikom in sprejemnikom širi po več poteh. Na poti prihaja do slabljenja, odbojev signala, lomov na ovirah in sipanja. Sprejemnik je pogosto, v urbanih okoljih pa celo praviloma, v senci, kar pomeni, da direktna pot (*angl. line of sight*) med oddajnikom in sprejemnikom ne obstaja. Hkrati pa se tako mobilni uporabnik kot tudi objekti v okolici, npr. vozila, lahko gibljejo. Predstavljamo si lahko, da takšne razmere za prenos signala niso nič kaj prijazne. Razmere so simbolično prikazane na sliki 3-35.



Slika 3-35. Širjenje signala v mobilnem prenosnem kanalu po več poteh.

Obravnava mobilnega prenosnega kanala je kombinacija teorije elektromagnetnega valovanja in statistične teorije. Obravnavo delimo v dva dela. Najprej bomo opisali spreminjanje moči signala na poti od oddajnika do sprejemnika. Sklepamo seveda, da moč z razdaljo pada. To je res, vendar so prisotni se drugi efekti, ki ustvarjajo dodatna kratkoročnejša nihanja. Zatem si bomo ogledali, na kakšen način, to je s kakšnimi popačenji, se razširjanje preko mobilnega prenosnega kanala odraža na obliki signala, ki ga sprejema sprejemnik.

Slabljenje signala na poti od oddajnika do sprejemnika

Moč signala na poti od oddajnika do sprejemnika se spreminja. Vse to je posledica pojavov slabljenja, odbojev, lomov in sipanja v okolju, kjer potuje signal. Spreminjanje moči lahko poenostavljeno strnemo v tri točke:

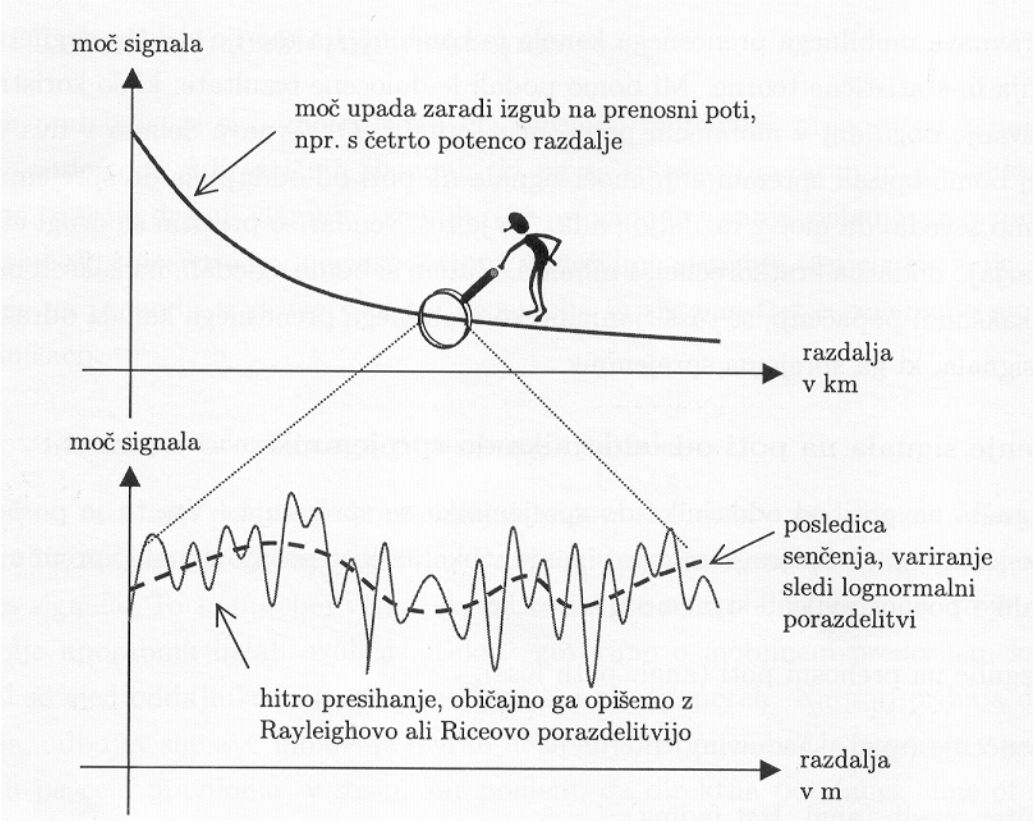
- izgube na prenosni poti (angl. path loss),
- senčenje (angl. shadowing) in
- hiter presih (angl. fast fading).

Prvi efekt je opazen pri večjih dimenzijah, to je pri razdaljah nekaj 100 m in več, drugi že pri manjših razdaljah nekaj 10 m (50 do 200 valovnih dolžin) in zadnji v mikrookolju razdalje nekaj valovnih dolžin (5 do 40 valovnih dolžin). Na izgube na poti vplivajo naravne značilnosti terena, npr. hriboviti predeli, mesto, podeželje, ravnina, na senčenje bližnja okolica, kot npr. zgradbe, drevesa, medtem ko je hiter presih občutljiv že na razmere v neposredni okolici sprejemnika. Pregled je podan na sliki 3-36.

Izgube na prenosni poti. Kot rečeno opazujemo ta efekt pri večjih razdaljah. Zaradi izgub na poti se moč signala z oddaljenostjo od oddajnika manjša. Če predpostavimo širjenje signala v praznem prostoru, vemo, da moč pada s kvadratom razdalje in s kvadratom frekvence signala. Če razdaljo ali frekvenco podvojimo, pade moč za faktor 4. Ne da bi šli v podrobnosti lahko to zapišemo:

$$P_S \propto P_O d^{-2} f^{-2} \qquad (3\text{-}27)$$

kjer je P_S sprejeta moč povprečena preko večje razdalje, npr. 100 m, P_O oddana moč, d razdalja med oddajnikom in sprejemnikom in f frekvenca signala. O povprečni moči govorimo zato, ker sicer moč varira okrog tega povprečja zaradi različnih razmer v neposredni okolici sprejemnika.



Slika 3-36. Moč signala v odvisnosti od razdalje. Vidimo vpliv izgub na prenosni poti, senčenja in hitrega presihanja.

Primer praznega prostora je seveda le teoretičen, zato tudi relacija v praksi ne velja. V praksi so razmere mnogo slabše. Potek moči je zelo odvisen od značilnosti terena, na katerem zveza poteka. Prav tako moč ni odvisna le od razdalje in frekvence, temveč tudi od višine oddajne antene, višine sprejemne antene in se česa. Za splošen primer nimamo analitične rešitve, ki bi vsaj približno veljala. V preteklosti so raziskovalci predlagali kar nekaj modelov (npr. model za odprt teren, Eglijev, Okumura-Hata, Leejev, Ikegamijev, Walfisch-Ikegami, ...), ki so bili večinoma razviti na podlagi izmerjenih podatkov. Modeli so različni in tudi omejeno veljavni le za določen razpon parametrov in določeno okolje. Vemo, na primer, da so signali od nekaj GHz naprej močno občutljivi tudi na vremenske razmere (dež, megla) in absorpcijo nekaterih plinov. Večina znanih modelov velja za nižje frekvence (pod 2 GHz) in obravnava izgube na poti oziroma moč sprejetega signala kot funkcijo oddaljenosti od oddajnika *d*, frekvence *f*, višine oddajne antene h_o in višine sprejemne antene h_s.
Zgolj za osnovno razumevanje lahko zapišemo:

$$P_S \propto P_O d^{\gamma} f^{\alpha} h_o^{\beta} h_s^{\delta} \qquad (3\text{-}28)$$

kjer so α, β, γ in δ ustrezne potence. Vrednosti γ je:

parameter	potenca	razpon vrednosti
d	γ	-2 do -5
f	α	-2 do -3
h_o	β	1,8 do 2
h_s	δ	1 do 2

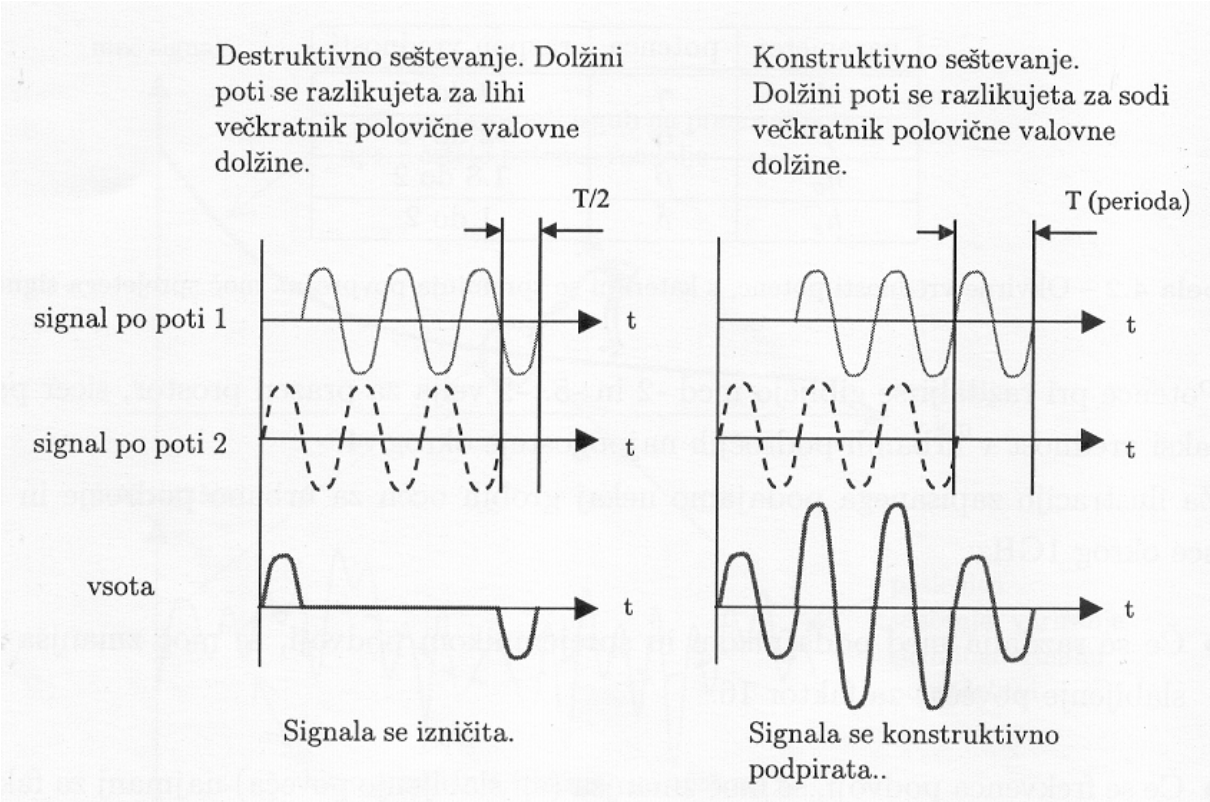
Tabela 3-6. Okvirne vrednosti potenc, s katerimi se spreminja povprečna moč sprejetega signala.

Potence pri razdalji se gibljejo med -2 in -5. -2 velja za prazen prostor, sicer pa je v praksi vrednost v urbanih področjih najpogosteje okrog -4.
Za ilustracijo zapisanega podajamo nekaj grobih ocen za urbano področje in frekvence okrog 1 GHz:

- Če se razdalja med oddajnikom in sprejemnikom podvoji, se moč zmanjša (ali slabljenje poveča) za faktor 16.
- Če se frekvenca podvoji, se moč zmanjša (ali slabljenje poveča) najmanj za faktor 4.
- Če višino katerekoli antene podvojimo, se sprejeta moč poveča (ali slabljenje zmanjša) za faktor 4.

Senčenje. Iz tega, kar smo zapisali v prejšnjem razdelku, bi lahko napačno sklepali, da je moč sprejetega signala odvisna le od razdalje, frekvence in višin anten. To bi pomenilo, da je moč sprejetega signala na neki fiksni razdalji popolnoma neodvisna od bližnje okolice, npr. ali smo sredi velikega križišča ali pa smo ravno zapeljali v ulico, ki ima na obeh straneh visoke zgradbe. V resnici ni tako. Moč signala se v odvisnosti od okolice spreminja. Kaj je v nekem trenutku v okolici sprejemnika, pa je popolnoma nepredvidljivo, naključno. Posledično je tudi variacije moči signala zaradi senčenja moč opisati z neko verjetnostno porazdelitvijo. Izkaže se, da najbolj ustreza lognormalna verjetnostna porazdelitev z variancami od 4 do 12 dB. To porazdelitev dobimo, če v Gaussovo (normalno) porazdelitev vstavimo logaritmirane vrednosti, to je vrednosti v decibelih (dB).

Hitro presihanje. Ugotovili smo že, da se signal med oddajnikom in sprejemnikom širi po več poteh. N a vsaki poti signal oslabi, zakasni in se fazno premakne. V sprejemniku se ti signali nato seštevajo. Signal na sprejemniku je tako vsota oslabljenih, zakasnjenih in fazno premaknjenih ponovitev oddanega signala. V odvisnosti od razlike dolžin posameznih poti se signali lahko seštevajo konstruktivno ali pa destruktivno. Pri



Slika 3-37. Destruktivno in konstruktivno seštevanje signalov, ki so prišli v sprejemnik časovno zamaknjeni zaradi različnih dolžin poti.

konstruktivnem seštevanju je moč vsote večja od moči najmočnejše komponente, pri destruktivnem seštevanju pa manjša. Mehanizem je prikazan na sliki 3-37.

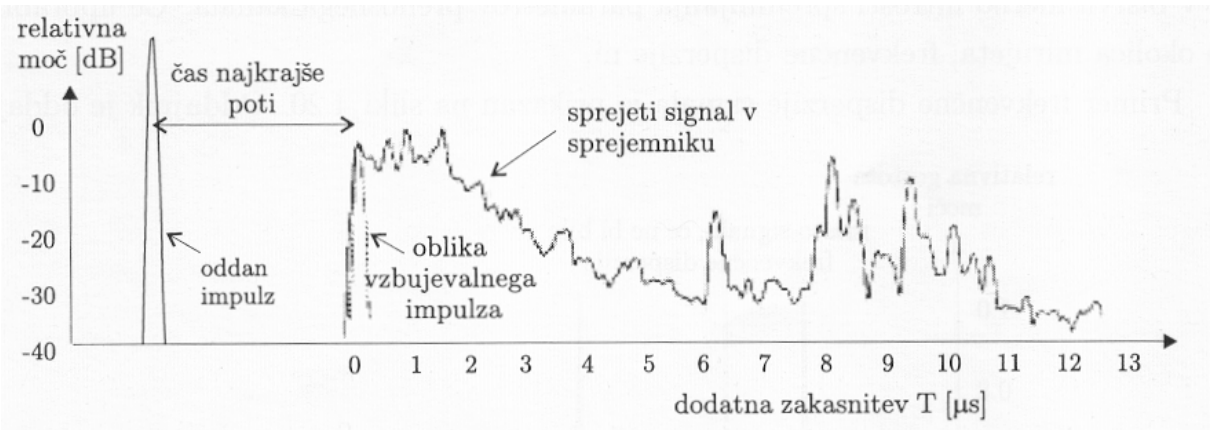
Za lažje razumevanje si lahko predstavljamo, da signal v prostoru ustvarja neke vrste stoječe valovanje (ki v resnici ni stoječe, ker se razmere s časom spreminjajo). Pri stoječem valovanju pa vemo, da nas premik za pol valovne dolžine (približno 17 cm pri 900 MHz) pripelje iz maksimuma v minimum ali obratno. Potek valovanja je močno odvisen od okolice sprejemnika. Hkrati pa se razmere na posameznih poteh tudi časovno spreminjajo, saj se lahko giblje tako sprejemnik kot njegova okolica. Vse to se odraža v hitrem nihanju moči signala v odvisnosti od mikrolokacije sprejemnika. Nihanje, imenujemo ga hitro presihanje, je zelo izrazito, saj doseže vrednosti do 40 dB (faktor 10000).

Kot v primeru senčenja je tudi hitro presihanje opisljivo le statistično. Razmere najbolj natančno popisuje Reyleighjeva statistična porazdelitev za primer, ko ni direktne poti med oddajnikom in sprejemnikom, in Rice-ova statistična porazdelitev, kadar direktna pot obstaja.

Popačitve sprejetega signala

Signal v sprejemniku je poleg tega, da je njegova moč bistveno manjša od oddane, kar smo spoznali v prejšnjem razdelku, tudi popačen. To popačenje se odraža tako v časovnem kot v frekvenčnem prostoru. Govorimo o časovni in frekvenčni disperziji sprejetega signala, ki ju bomo razložili v nadaljevanju.

Časovna disperzija. Zaradi širjenja po več poteh dobimo na vhodu sprejemnika vsoto več signalov, ki so se širili po različnih poteh. Ker so poti na splošno različno dolge in ker pride na poti tudi do popačitev, so ti signali med seboj zamaknjeni ter popačeni. To se na signalu manifestira v dveh oblikah. (1) Oblika sprejetega signala je zaradi časovnih zakasnitev časovno razmazana, pojavi se časovna disperzija. Dobimo prekrivanje sosednjih simbolov, ki mu rečemo intersimbolna interferenca. (2) Če bi pogledali signal na spektralnem analizatorju, torej v frekvenčnem prostoru, bi ugotovili, da določene komponente v frekvenčnem spektru manjkajo, čeprav so bile v oddanem signalu prisotne. Rečemo, da jih je izločil kanal. Dobimo presih, o katerem smo že govorili. Kadar je frekvenčni pas prenašanega signala tako ozek, da v celoti pade v takšen frekvenčni minimum, govorimo o frekvenčno neselektivnem presihu. Če je frekvenčni pas širši, pa minimum kanala prizadene le del signala. Govorimo o frekvenčno selektivnem pojemanju.
Primer časovne disperzije je prikazan na sliki 3-38. Oddani signal je bil kratek impulz. Primer na sliki kaže veliko razpršenost dodatnih zakasnitev. Takšen kanal je za prenos dokaj neugoden. Vidimo, da je zadnja komponenta prišla več kot 10 μs za prvo. Iz zakasnitev lahko dokaj točno ugotovimo razlike v dolžinah poti med posameznimi komponentami signala. Upoštevati je potrebno le hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja, ki je nekoliko nižja od svetlobne. Če poenostavljeno vzamemo svetlobno hitrost, potem signal napravi pot 1 km v 3,3 μs. 10 μs ustreza razliki v dolžinah poti 3 km.



Slika 3-38. Primer časovne disperzije. Oddajnik je oddal ozek impulz. Vidimo precejšnjo časovno razmazanost glede na prvo prispelo komponento. Komponente z dodatno zakasnitvijo 10 μs ustrezajo približno 3 km daljši poti signala.

Razpršenost dodatnih zakasnitev je v precejšnji meri odvisna od okolja, v katerem komunikacija poteka. V hribovitih predelih so vrednosti visoke, v urbanem okolju že nižje, v ruralnem in v notranjosti zgradb pa najnižje. Približne vrednosti so podane v tabeli 16.

okolje	povprečna razpršitev dodatne zakasnitve v μs
gorato	do 100
hribovito	5 do 10
mestno	1 do 3
Vaško	0,2 do 0,5
ruralno	do 0,2
notranjost zgradb	do 0,1

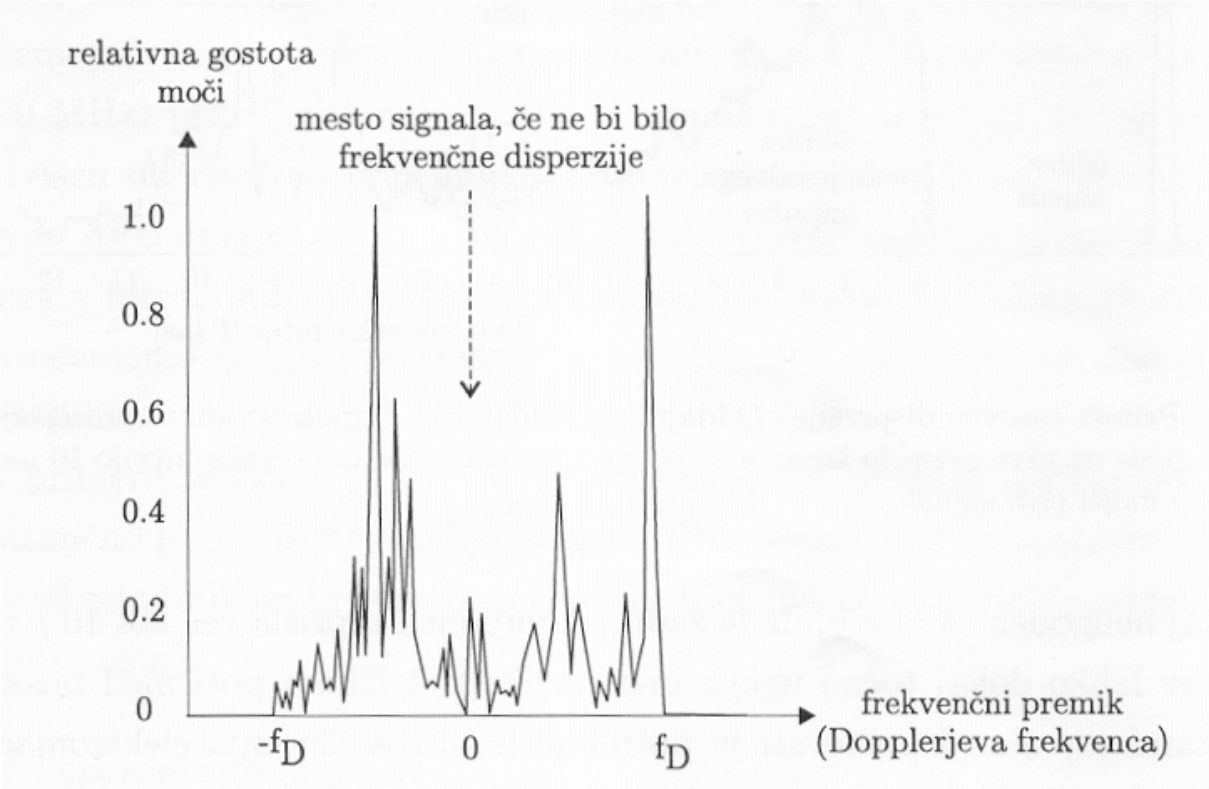
Tabela 3-7. Okvirne vrednosti povprečnih razpršitev zakasnitve.

Frekvenčna disperzija. Poti, po katerih se širi signal od oddajnika do sprejemnika, se s časom spreminjajo. To je razumljivo, saj govorimo o mobilni komunikaciji, kjer se giblje uporabnik in/ali objekti v okolici, npr. vozila. Znano je, da pride v primeru gibanja do Dopplerjevega pojava, ki se odraža v frekvenčni razmazanosti sprejetega signala. Govorimo o frekvenčni disperziji signala. Dopplerjev frekvenčni premik signala je v bistvu merilo hitrosti spreminjanja parametrov prenosnega kanala. Če uporabnik in okolica mirujeta, frekvenčne disperzije ni.

Primer frekvenčne disperzije signala je prikazan na sliki 3-39. Oddajnik je oddajal čisti harmonični signal ene same frekvence. Ta je na sliki pri frekvenčnem premiku 0.
Iz frekvenčnega poteka signala je moč določiti kote, pod katerimi sovpadajo v sprejemnik posamezne komponente signala. Vemo, da je Dopplerjev efekt najmočnejši, kadar se sprejemnik oddajniku približuje ali oddaljuje pod kotom 0. Takrat dobimo maksimalen Dopplerjev premik. Na splošno pa velja:

$$f_D = \frac{v}{c} f \cos \alpha \qquad (3\text{-}29)$$

kjer je v hitrost sprejemnika, c svetlobna hitrost, f frekvenca signala in α kot, pod katerim vpada valovanje.



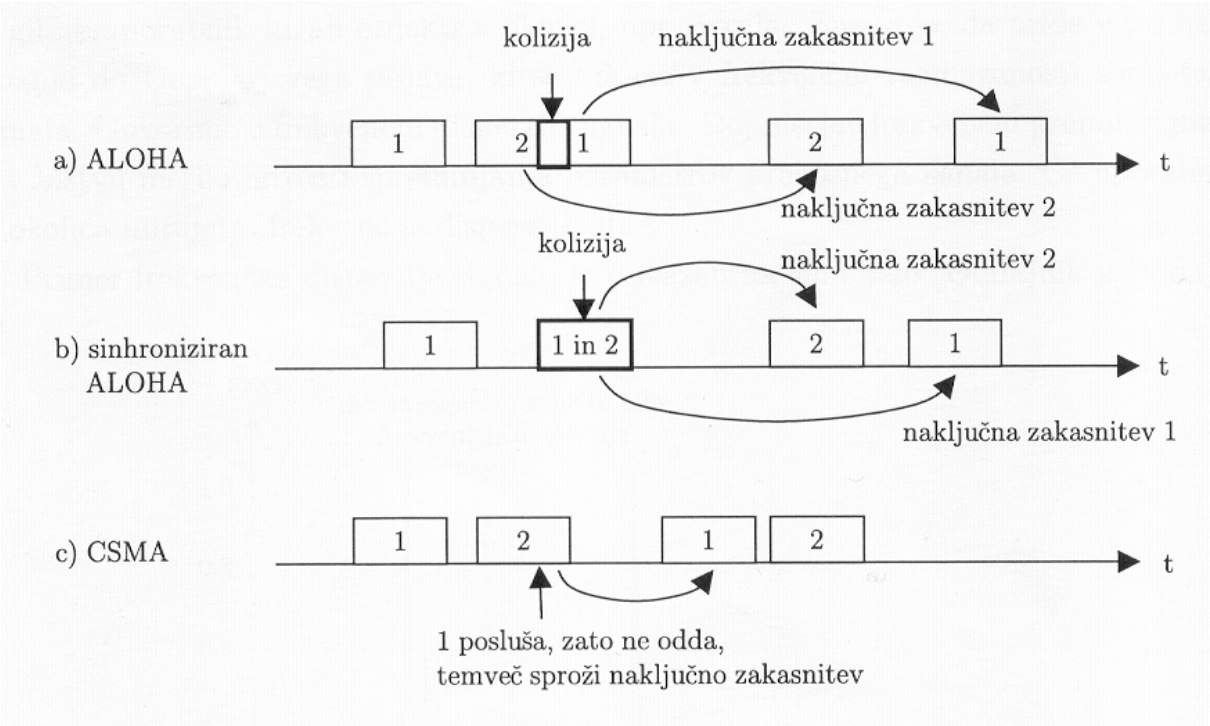
Slika 3-39. Primer frekvenčne disperzije. Oddajnik je oddajal signal ene same frekvence. Zaradi časovnega spreminjanja razmer na poti, npr. gibanja sprejemnika in okolice, je prišlo do frekvenčnih premikov.

3.2.2 Načini sodostopa do prenosnega kanala

V večupo rabniških telekomunikacijskih sistemih je potrebno zagotoviti učinkovit način sodostopa uporabnikov do skupnega prenosnega kanala oziroma medija. Uporabnikov je več, prenosni kanal pa je skupen. To pomeni, da se morajo uporabniki pri dostopu do prenosnega kanala na nek način razporediti. Obstaja več načinov, ki jih delimo na:

- sodostope z zaseganjem kanala in
- sodostope z delitvijo zmogljivosti.

Pri sodostopih z zaseganjem kanala zasegajo uporabniki medij v celoti. V trenutku, ko je eden od uporabnikov medij zasegel, ta ni na razpolago ostalim uporabnikom. Zaseganje se pogosto dogaja naključno, brez reda, kar povzroča konflikte, zmanjšuje učinkovitost pri večjih obremenitvah in otežkoča zagotavljanje kakovosti storitev. Kadar zaseg uspe, ima uporabnik na voljo celotno kapaciteto medija.
Trije primeri sodostopa z zaseganjem so prikazani na sliki 3-40. Prvi (a) je ALOHA,



Slika 3-40. Načini sodostopa z zaseganjem kanala: ALOHA, sinhronizirani ALOHA in CSMA.

kjer oddajajo uporabniki podatkovne pakete naključno po potrebi, ne oziraje se na to ali je kanal prost ali zaseden. Kadar se paketa dveh različnih uporabnikov časovno prekrijeta, pride do kolizije in potrebno je ponoviti oba. Predstavljamo si lahko, da postane način zelo neučinkovit pri veliki gostoti prometa.

Drugi (b) je sinhronizirani ALOHA (angl. slotted ALOHA), kjer je oddajanje paketov možno le ob vnaprej določenih periodično ponavljajočih časovnih trenutkih. Vse postaje so sinhronizirane na te trenutke. Pri tem načinu ne more priti le do delnega prekrivanja. Če paketa sovpadeta, sovpadeta v celoti in potrebno je ponoviti oba. Ta način je ravno tako občutljiv na velike gostote prometa, vendar je že boljši od navadnega ALOHA, saj je verjetnost kolizije manjša.

Še boljši je (c) način s prisluhom (CSMA - Carrier Sense Multiple Access), kjer pa vsaka postaja posluša, če je kanal v danem trenutku prost. Če ni, paketa ne odda. S tem se pogostost kolizij močno zmanjša. Izvedenka tega načina je način z detektiranjem kolizij (CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection), kjer postaja med oddajanjem paketa tudi posluša, če je morda prišlo do kolizije. Če je, z oddajanjem takoj preneha. S tem ne obremenjuje kanala po nepotrebnem, saj je že v primeru delne kolizije potrebno ponoviti oba paketa. Pri brezžičnem mediju pa način z detektiranjem kolizij ni izvedljiv.
Razloga sta dva. Prvi je, da izvedba postaje, ki lahko sočasno oddaja in sprejema, zelo podraži produkt. Druga pa je, da se v brezžičnem omrežju postaje med seboj pogosto ne slišijo. Za brezžičen medij se uporablja shema CSMA z izogibanjem kolizij (CSMA/CA - CSMA with Collision Avoidance). Ta deluje tako, da postaja posluša, kaj se dogaja na mediju. Ko ugotovi, da je medij prost, odda kratek paket z zahtevo za prenos (RTS - Request To Send), v kateri sporoča dolžino paketa, ki ga želi oddati. Ciljna postaja odgovori s potrditvijo (CTS - Clear To Send), v kateri ponovi dolžino paketa. Izvorna postaja zatem odda paket. Ker informacijo o dolžini paketa oddata tako izvorna kot ponorna postaja, se vse ostale postaje, ki slišijo vsaj eno od obeh, lahko uskladijo in v tem času ne poskušajo s prenosom.

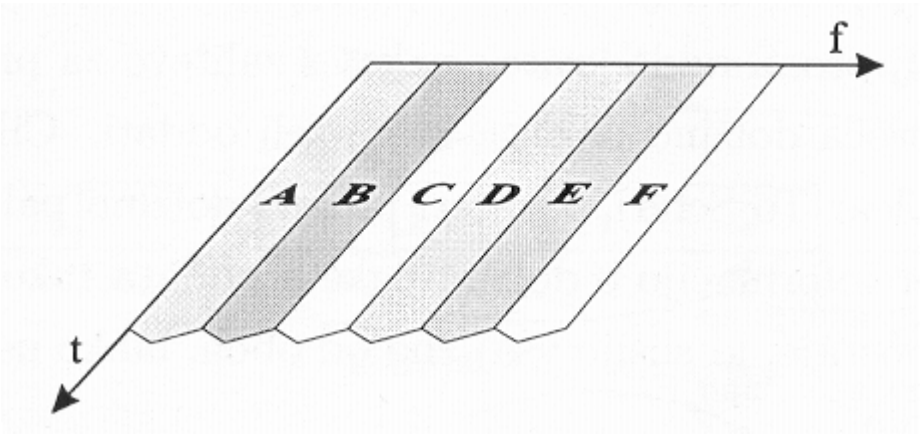
Oglejmo si nekaj praktičnih primerov uporabe opisanih načinov dostopa v brezžičnih sistemih. Sinhronizirani ALOHA se uporablja v večini sistemov mobilnih komunikacij, npr. v GSM, za naključni dostop do kanala. Ko želi mobilna postaja vzpostaviti komunikacijo, to sporoči preko sinhroniziranega ALOHA načina. Ko sistem zazna zahtevo, dodeli kanal. Nadaljnji sodostop se potem odvija na enega od načinov z delitvijo zmogljivosti. CSMA/CD se uporablja pri žičnem lokalnem omrežju Ethernet. CSMA/CA se uporablja v večini lokalnih brezžičnih omrežij.

Pri vseh sistemih, ki imajo dostop z zaseganjem, se je potrebno zavedati, da je prenosna hitrost kanala hkrati tudi prenosna hitrost uporabnika le v primeru, če se za medij ne potegujejo tudi drugi uporabniki. Če pa je aktivnih uporabnikov več, se kapaciteta deli, saj si uporabniki na nek način kradejo medij. Hkrati se del kapacitet izgubi zaradi kolizij. Hiba tovrstnih sistemov je v neučinkovitosti pri višjih gostotah prometa.
Pri **sodostopu z delitvijo zmogljivosti** pa se kapaciteta medija razdeli na več delov, kar omogoča sočasno komunikacijo več uporabnikov. Konfliktov pri takšnem sodostopu praviloma ni, saj je določen kanal v

nekem trenutku dodeljen enemu samemu uporabniku. Literatura navaja štiri načine sodostopa z delitvijo zmogljivosti:

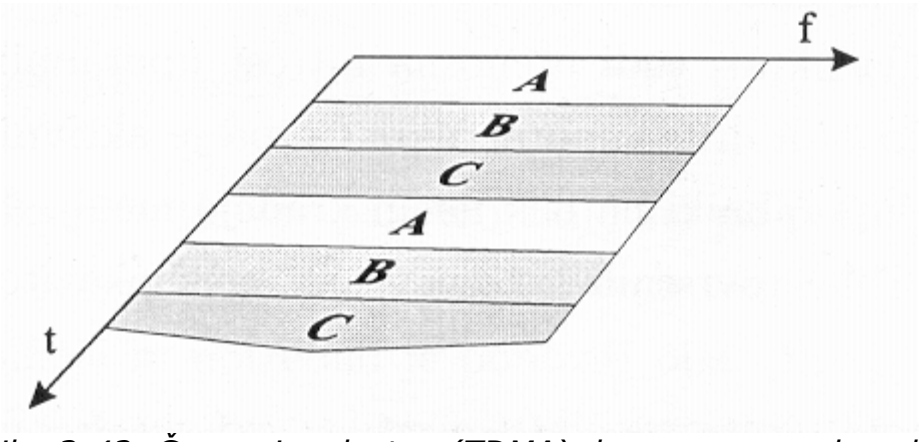
- frekvenčni sodostop (FDMA - Frequency Division Multiple Access),
- časovni sodostop (TDMA - Time Division Multiple Access),
- kodni sodostop (CDMA - Code Division Multiple Access) in
- prostorski sodostop (SDMA - Space Division Multiple Access).

V primeru *frekvenčnega sodostopa* so signali različnih uporabnikov ločeni frekvenčno.
Vsakemu aktivnemu uporabniku je dodeljen določen frekvenčni pas, ki je istočasno na voljo samo temu uporabniku. Signali uporabnikov so torej frekvenčno neprekrivajoči, kar je prikazano na sliki 3-41. V analognem mobilnem sistemu NMT se uporablja frekvenčni sodostop.



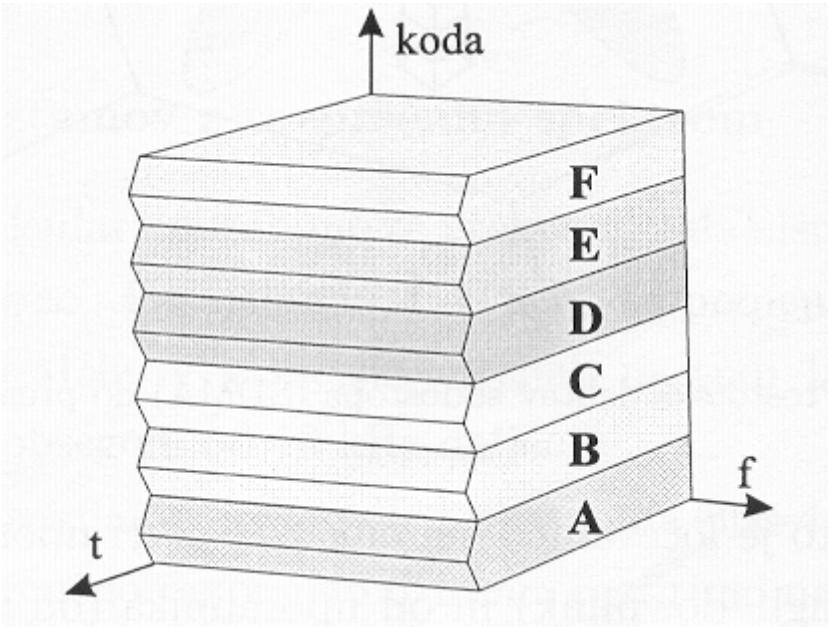
Slika 3-41. Frekvenčni sodostop (FDMA) do prenosnega kanala.

V primeru ***časovnega sodostopa*** so signali različnih uporabnikov ločeni časovno. Vsakemu aktivnemu uporabniku je dodeljen periodično ponavljajoč časovni interval, v katerem je celoten frekvenčni pas na razpolago le temu uporabniku. Signali različnih uporabnikov so časovno neprekrivajoči, kar je prikazano na sliki 3-42. V sistemu GSM je v uporabi kombinacija frekvenčnega in časovnega sodostopa.



Slika 3-42. Časovni sodostop (TDMA) do prenosnega kanala.

V primeru ***kodnega sodostopa*** so signali različnih uporabnikov ločeni s kodami. Vsi aktivni uporabniki komunicirajo sočasno v celotnem frekvenčnem pasu. Kode so izbrane tako, da se uporabniki med seboj preveč ne motijo. Princip kodnega sodostopa je prikazan na sliki 3-43. Kodni sodostop se uporablja v mobilnem sistemu CDMA - One (stara oznaka IS-95), prav tako pa je implementiran v mobilnem sistemu tretje generacije UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Podrobnejša analiza principa kodnega sodostopa pokaže, da sta frekvenčni in časovni sodostop le posebna primera kodnega sodostopa. S kodo določamo, katere dele frekvenčnega spektra in v katerem času bo zasedel posamezen signal. Če so deli frekvenčno neprekrivajoči, govorimo o frekvenčnem sodostopu, če so časovno neprekrivajoči o časovnem sodostopu. Če pa se signali prekrivajo tako v časovnem kot frekvenčnem prostoru imamo opravka s splošnim kodnim sodostopom.



Slika 3-43. Kodni sodostop (CDMA) do prenosnega kanala.

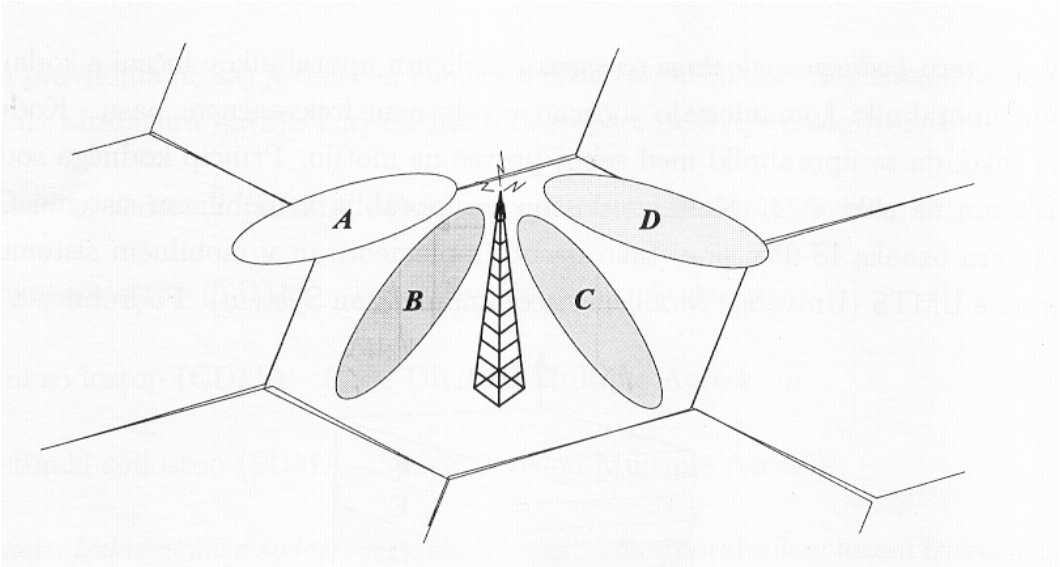
V primeru ***prostorskega sodostopa*** so signali ločeni prostorsko. To je v radijskem sistemu mogoče doseči z delitvijo geografskega področja na celice in sektorizacijo leteh. Signali, ki se prostorsko ne prekrivajo, se med seboj ne motijo. Pravzaprav ne moremo več govoriti o skupnem prenosnem kanalu, saj smo ga s prostorsko ločitvijo razdelili. Zato prostorski sodostop ne spada med načine sodostopa do skupnega prenosnega kanala. Princip prostorske delitve kanala je prikazan na sliki 3-44. Prostorska delitev prenosnega kanala je v uporabi v vseh celičnih sistemih, med katerimi so vsi do sedaj omenjeni sistemi (NMT, GSM, CDMAOne in UMTS). Z drobitvijo celičnih sistemov ter razvojem zmogljivih antenskih sistemov predstavlja prostorski sodostop velik potencial za povečevanje kapacitete sistemov.
Opisani načini niso enako primerni za vse vrste komunikacije. V praksi so običajni kombinirani sistemi.

- Prostorski sodostop se uporablja v vseh celičnih brezžičnih sistemih zaradi geografske delitve teritorija na celice in sektorizacije.

- Za dupleksiranje, to je ločevanje komunikacije proti uporabniku (od bazne proti mobilni postaji, angl. downlink) in od uporabnika (od mobilne proti bazni postaji, angl. uplink), se uporabljata frekvenčni (FDD - Frequency Division Duplexing) ali časovni način (TDD - Time Division Duplexing).

- Neke vrste frekvenčna delitev je tako ali drugače izvedena v vsakem sistemu, saj različni operaterji brezžičnih omrežij razpolagajo z različnimi širinami frekvenčnega spektra. Zato je vsak sistem potrebno načrtovati tako, da ga je možno prilagoditi razpoložljivemu spektru. To je izvedeno z delitvijo spektra na več frekvenčnih podpasov.

- Znotraj enega od teh podpasov pa je uporabljen eden ali kombinacija opisanih treh načinov sodostopa (frekvenčnega, časovnega in/ali kodnega).



Slika 3-44. Prostorska delitev sodostopa (SDMA) do prenosnega kanala.

sistem	dupleksiranje	širina podpasu	način sodostopa
NMT	frekvenčno	-	frekvenčni
GSM	frekvenčno	200 kHz	časovni
DECT	časovno	1728 kHz	časovni
CDMAOne	frekvenčno	1250 kHz	kodni
Iridium	časovno	41,5 kHz	časovni
UMTS FDD UMTS TDD	Frekvenčno časovno	5,10,20 MHz 5,10,20 MHz	Kodni časovno-kodni

Tabela 3-8. Pregled načinov sodostopa v nekaterih sistemih.

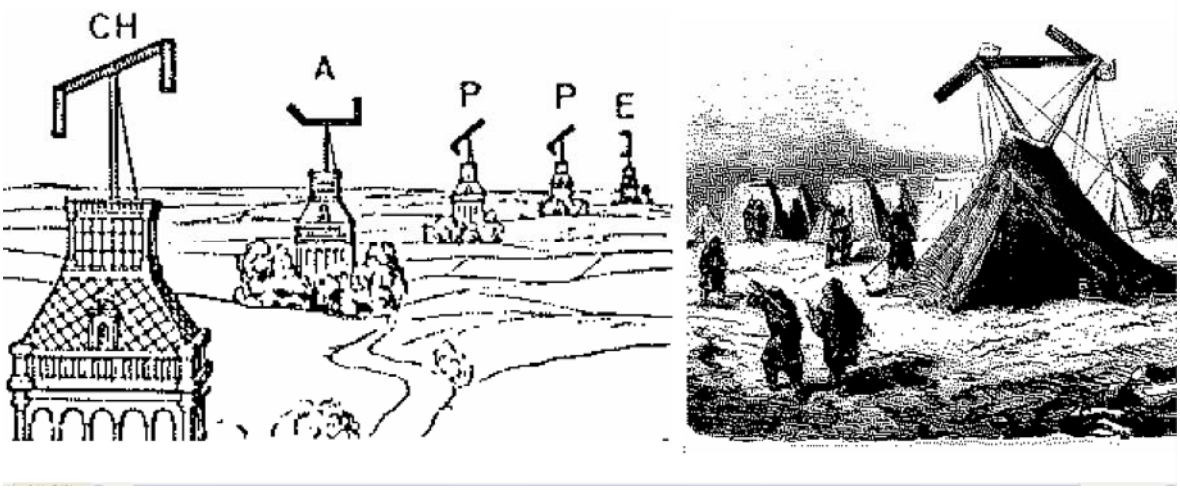
Načini sodostopa v sistemih NMT, GSM, DECT (Digital European Cordless Telecommunications System), CDMAOne, Iridium in UMTS so prikazani v tabeli 3-8.

4 Protokoli v sodobnih telekomunikacijah

4.1 Splošno o protokolih

4.1.1 Začetki komunikacij na daljavo

Že v zgodnjih časih razvoja, je človeštvo potrebovalo komunikacijo na daljavo. V ta namen so skupine, ki so želele komunicirati morale skleniti nek dogovor o načinu in pomenu sporazumevanja. Tako so se že v 5. st. pr.n.št. sporazumevali s kurjenjem kresov, bakel, ognja, ipd. Med 18. in 19. stoletjem našega štetja, se je pojavil prvi optični telegraf, kjer so s pomočjo položaja ročic prenašali sporočila.



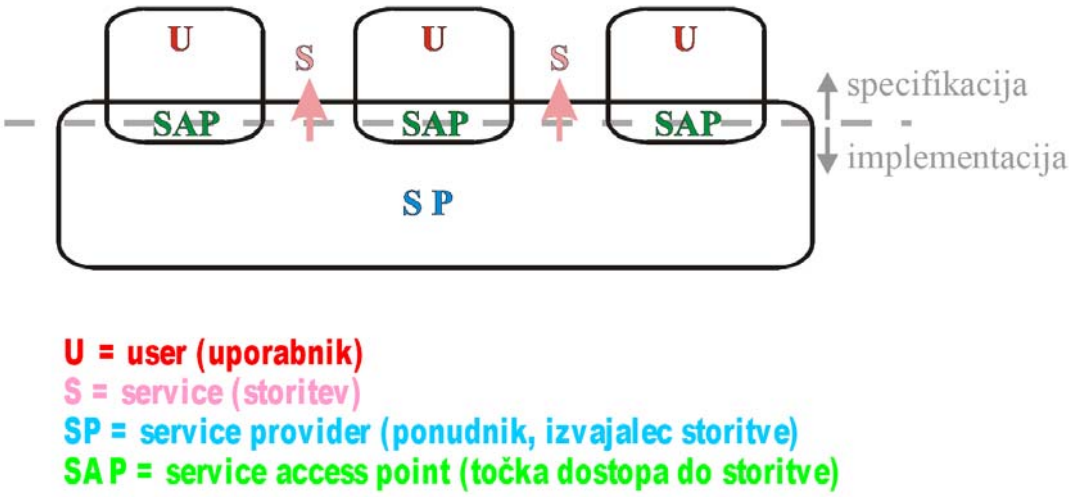
Slika 5-1. Omrežje telegrafskih naprav.

4.1.2 Kaj je protokol

Protokol izhaja iz grških besed protos (prvi) in kollan(lepiti). Protokol je v začetku pomenil podatke na prvi strani uradnih listin, danes pa je to širok pojem, ki v diplomatskem smislu predstavlja pravila za izvajanje diplomatskih postopkov ali uradni zapisnik o sklepih konference. V svetu telekomunikacij je to jezik za sporazumevanje med stroji.

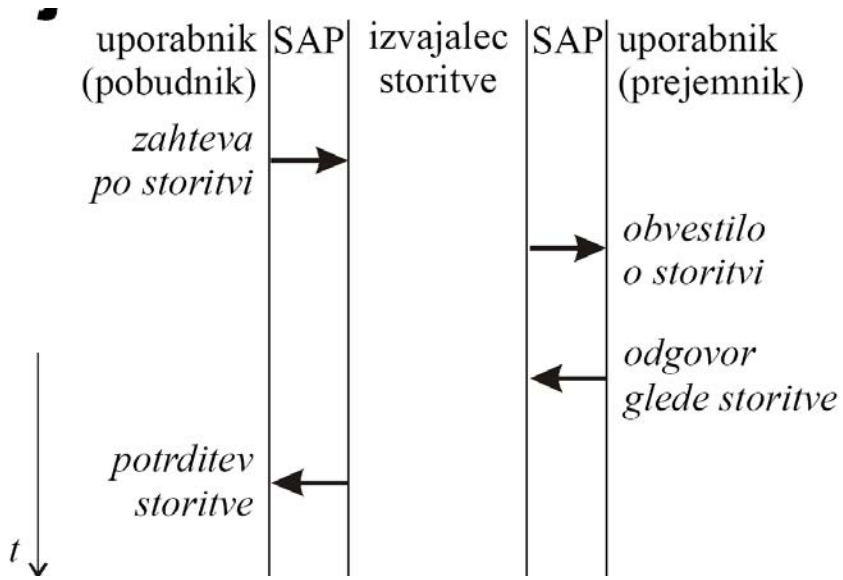
4.1.3 Storitve in protokoli

V telekomunikacijskih sistemih je glavni problem to, da sta sistem in informacija porazdeljena, noben komunikacijski osebek pa ne pozna stanja celotnega sistema. Protokoli skušajo v čim večji meri odpraviti te pomanjkljivosti.



Slika 5-2. Koncept storitve.

Osnovni namen komunikacije na daljavo je interakcija med dvema ali več uporabniki neke storitve, ki jo ponuja izvajalec storitve, oz. ponudnik. Uporabnik torej mora preko nekih mehanizmov dostopati do storitev, ki jih ponuja izvajalec. Mesto, kjer uporabnik komunicira s ponudnikom storitve imenujemo SAP (Service Access Point).
Vsak uporabnik mora izvajalcu storitve sporočiti, da želi koristiti storitev. Uporabnik (uporabnik 1) ponudniku torej pošlje zahtevo po storitvi (Request). Ponudnik storitve uporabniku (uporabnik 2), s katerim želi komunicirati uporabnik 1 pošlje obvestilo o storitvi (Indication). Uporabnik 2 poda odgovor glede storitve (Response), izvajalec storitve pa uporabniku 1 poda potrditev storitve (Confirmation).
Request, Indication, Response **in** ***Confirmation*** so temeljni tipi interakcije med uporabnikom in izvajalcem **(primitivi)**.



Slika 5-3. Osnovni tipi interakcije med uporabnikom in ponudnikom.

Storitev je zahteva uporabnikov in ponudba operaterja, protokol pa je širok pojem, ki definira naslednje:

- Implementacija storitve
- Nabor sporočil
- Format sporočil
- Pravila za pošiljanje sporočil

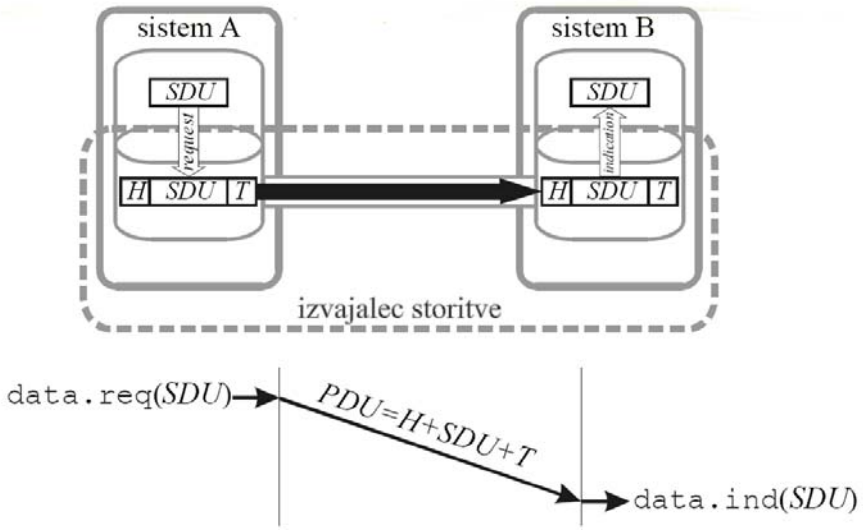
Vsako protokolno sporočilo je v splošnem sestavljeno iz *uporabniškega sporočila*, t.j. informacije, ki jo želi prenesti iz enega na drugo mesto in *nadzorne protokolne informacije*.

Celotno sporočilo imenujemo Protokolna podatkovna enota (Protocol Data Unit) in jo označimo s PDU. Uporabniško informacijo označimo kot Storitvena podatkovna enota (Service Data Unit) ali SDU. Nadzorno protokolno informacijo pa imenujemo PCI (Protocol Control information).

Tako lahko protokolno podatkovno enoto zapišemo kot

$$PDU=SDU+PCI$$

Pravimo, da uporabno sporočilo ovijemo v nadzorna sporočila. To imenujemo inkapsulacija.



Slika 5-4. Osnovni tipi interakcije med uporabnikom in ponudnikom.

Vsak napisan in potrjen protokol mora ustrezati naslednjim kriterijem:

- Logična pravilnost
- Popolnost, nedvoumnost, skladnost specifikacije
- Pravičnost
- Robustnost, konvergenca
- Učinkovitost
- Standardiziranost

Predvsem zaradi standardiziranosti so se v svetu pojavile različne organizacije, ki skušajo skrbeti, da so množično uporabljeni protokoli standardizirani in veljajo povsod po svetu. V nekaterih primerih jim to uspeva, spet v drugih pa je to lahko zelo težavno.

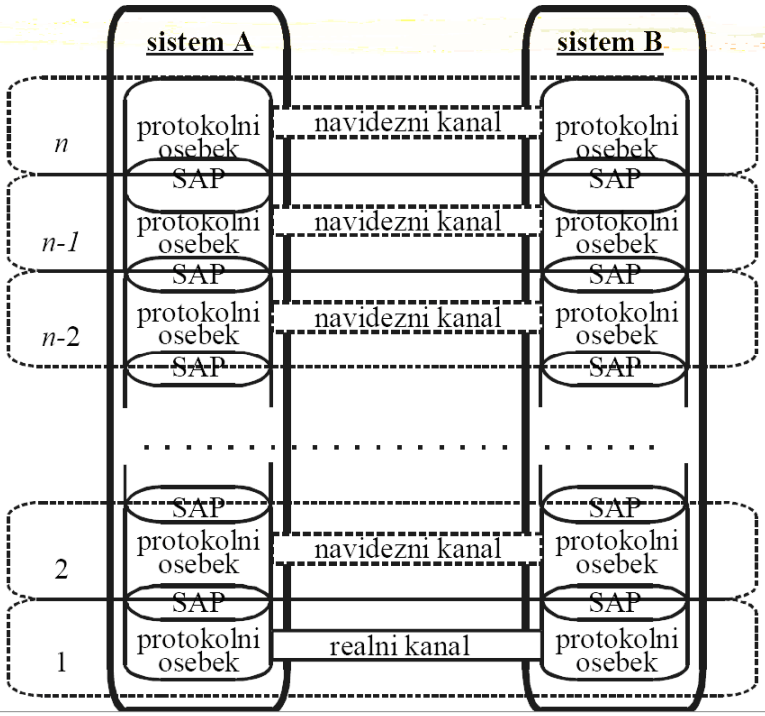
Organizacije lahko razdelimo na tri osnovne tipe:

- Mednarodne (ISO, ITU, ETSI)
- Strokovna združenja (IEEE, W3C, ATM Forum)
- Nacionalni (SIST, ANSI, DIN)

4.1.4 Protokolni sklad

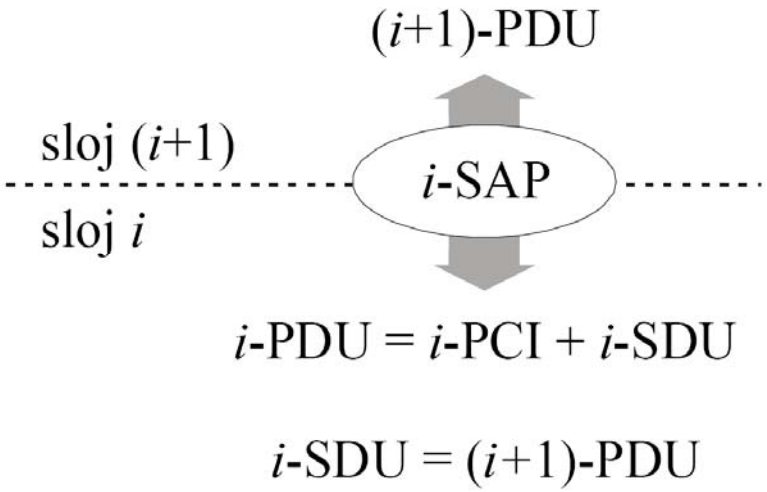
V moderni dobi komunikacij, je razvoj tako hiter, kompleksnost storitev pa narašča z bliskovito hitrostjo, zato je sistem nemogoče zasnovati tako, da bi bil definiran en sam protokol, ki bi skrbel za vse vrste problemov, ki se na komunikacijskih vodih dogajajo, hkrati pa še skrbel za pravilen prenos podatkov in hkrati komuniciral transparentno z uporabnikom.

Zato je bil definiran protokolni sklad, ki je razdeljen na sloje (Layers). Vsak sloj komunicira s svojim partnerjem istega sloja preko navideznih kanalov, posamezni nivoji pa med seboj komunicirajo preko SAP (Service Access point). Tako je vsak sloj svoj protokolni osebek in skrbi za specializirano področje, ki mu je dodeljeno.



Slika 5-5. Protokolni sklad.

Vsak sloj sporočilo prejšnjega sloja inkapsulira, torej mu doda nek svoj PCI. Razmere prikazuje slika 5-6:



Slika 5-6. Terminologija v slojih protokolnega sklada.

ISO je definiral referenčni model, ki bi naj bil osnova za vse sodobne protokole. Vsak realen protokol uporablja nekoliko prirejen ISO OSI model, kjer lahko posamezne nivoje bodisi še podrobneje razčleni ali pa nekatere združi. V spodnji tabeli so navedeni posamezni sloji

7	A	Application layer	Aplikacijski sloj
6	P	Presentation layer	Prikazni (prezentacijski) sloj
5	S	Session layer	Sejni (Konferenčni) sloj
4	T	Transport layer	Transportni sloj
3	N	Network layer	Omrežni sloj
2	DL	Data-Link layer	Kanalni (Povezavni) sloj
1	Phy	Physical layer	Fizični sloj

Fizični sloj definira vse fizične in električne lastnosti kanala, kar vključuje specifikacijo pinov, kablov, napetosti, kodiranja,…

Povezavni sloj Skrbi za prenos podatkov med omrežnimi entitetami. Popravlja napake, ki so se zgodili v fizičnem sloju.

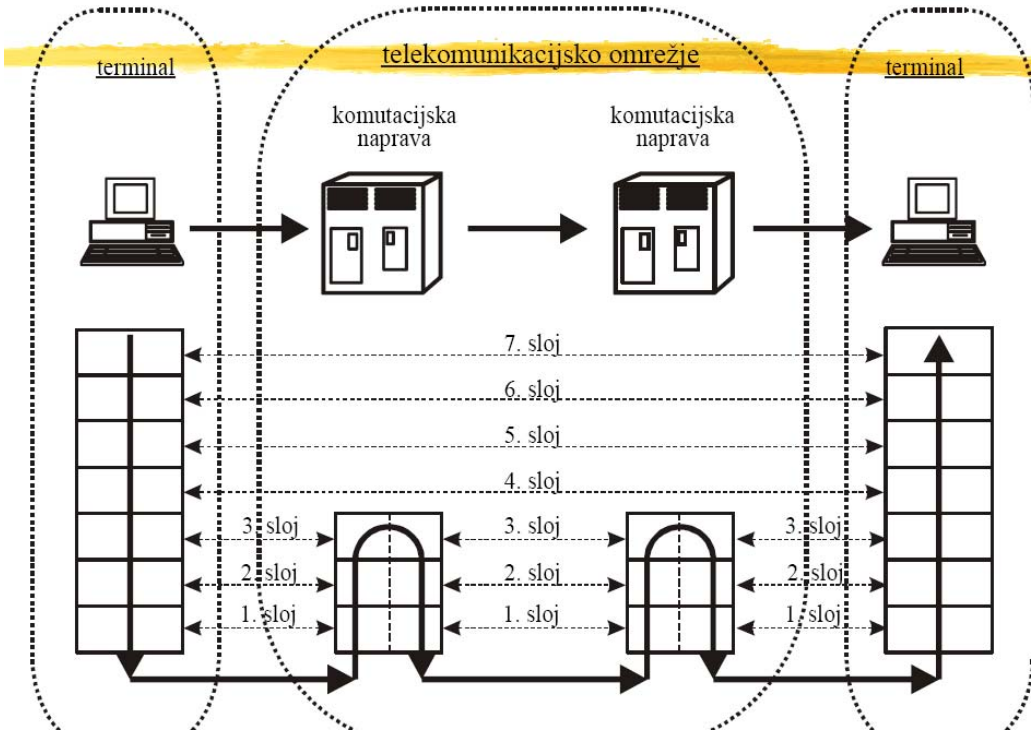
Omrežni sloj zagotavlja prenos podatkov preko enega ali več omrežij z upoštevanjem kakovostnih meril, ki jih zahteva transportni sloj. Operira z logiko usmerjanja. Na tem nivoju delujejo routerji, switchi,…

Transportni sloj zagotavlja transparentni prenos podatkov med končnimi uporabniki. Poskrbi, da višjim nivojem ni potrebno skrbeti za zanesljiv prenos. Najbolj znana sta TCP in UDP.

Sejni sloj nadzira dialoge med računalniki. Vzpostavlja, vzdržuje in ruši povezave med lokalno in oddaljeno aplikacijo.

Prikazni sloj pretvori podatke tako, da ustrezajo aplikacijskemu sloju. Primer je kompresija, kriptiranje,…

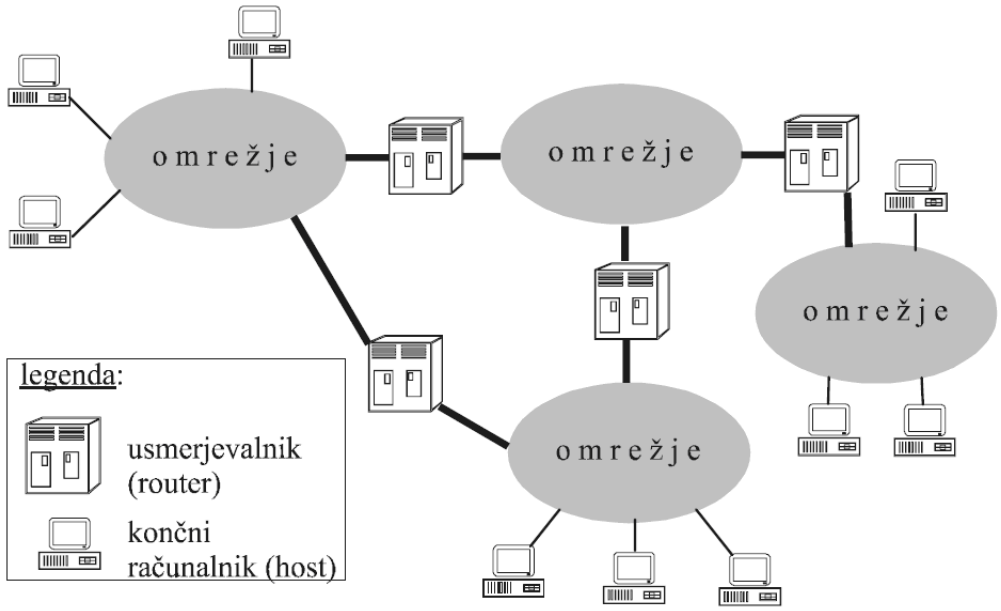
Aplikacijski sloj omogoča uporabniku dostop do informacije na omrežju. Primeri so Telnet, SMTP, FTP,…



Slika 5-7. Prikaz poteka komunikacije v modelu ISO OSI.

Slika 5-7 prikazuje komunikacijo preko nekega kanala. Ker se komutacija dogaja v 3 sloju, se višji nivoji ne ukvarjajo s tem, da gre komunikacija preko dveh komutacijskih naprav, saj zato transparentno poskrbijo nižji nivoji.

Internetno omrežje je kompleksno, sestavljeno iz mnogo manjših omrežij, usmerjevalnikov, računalnikov, ipd. V praksi se je tukaj uveljavil prirejen protokolni sklad, ki ima nekatere nivoje združene. Gre za Protokolni sklad TCP/IP.



Slika 7-8. Topologija interneta.

Protokolni sklad TCP/IP je sestavljen iz štirih slojev. Sloji TCP/IP so prikazani v spodnji tabeli

4	Application layer	Aplikacijski sloj
3	Transport layer	Transportni sloj
2	Internet layer	Internetni
1	Network access layer	Sloj dostopa do omrežja

4.2 Zanesljivost prenosa

Noben kanal ni idealen. To smo že spoznali v prejšnjih poglavjih. Med prenosom podatkov lahko prihaja do napačno sprejetih podatkov, izgube podatkov, dupliciranih podatkov, spremeni se lahko vrstni red sporočil in nenazadnje lahko v kanalu ostanejo neki paketi, ki jih ne potrebuje noben naslovnik več. Takšne pakete imenujemo »mrtve duše«.

Naloga protokolov je, da napake detektirajo, če je le mogoče popravljajo, nadomeščajo izgube, odkrivajo in odstranjujejo duplikate, zagotavljajo ohranitev vrstnega reda sporočil in odstranjujejo mrtve duše.

Če je le mogoče, skušamo napake tudi čimbolj minimizirati. To lahko med drugim dosežemo tudi s prepletanjem. Sporočila med sabo premešamo po določenem ključu. S tem sicer pokvarimo več sporočil, vendar pa so napake bistveno manj intenzivne.

Nekatere izmed postopkov si bomo ogledali v tem poglavju.

4.2.1 Detekcija in popravljanje napak

Ker uporabniki želijo transparenten prenos podatkov in jih zanima samo prenesena vsebina, mora protokol poskrbeti, da so podatki, ki jih je oddajnik sprejel, čimbolj verodostojni. Preden lahko protokol ukrepa, mora vedeti, kje je do napake sploh prišlo, oziroma katero sporočilo je sploh napačno, nato pa se odločiti, kako ukrepati. Protokol mora napako torej detektirati.
Napako najlažje detektiramo tako, da sporočilu dodamo nekaj redundantnih bitov, s katerimi jo lahko detektiramo. V splošnem so ti biti izračunani po:

- Paritetni metodi
- Metodi seštevanja
- Metodi krožnega redundančnega preizkusa

Ko katerakoli stran detektira napako, je le-to možno v nekaterih primerih popraviti, v nekaterih pa je potrebno sporočilo ponovno poslati. Obstajata dve osnovni metodi, ki ju seveda lahko kombiniramo. To sta

- FEC – Forward Error Correction (popravljanje na sprejemni strani)
- BEC – Backward Error Correction (popravljanje s ponovnim pošiljanjem)

Kakšen način uporabimo kje je seveda vprašanje same zahtevnosti in značilnosti protokola. V splošnem velja, da se BEC uporablja pri asinhronih prenosih in manjših pogostostih napak. BEC uporablja tudi manj režije. FEC se ponavadi uporablja pri sinhronih prenosih pri večjih pogostostih napak. Zahteva več režije.

Obe metodi je možno kombinirati.

Kot zgled si bomo ogledali prenos govora v GSM z sledečimi parametri:

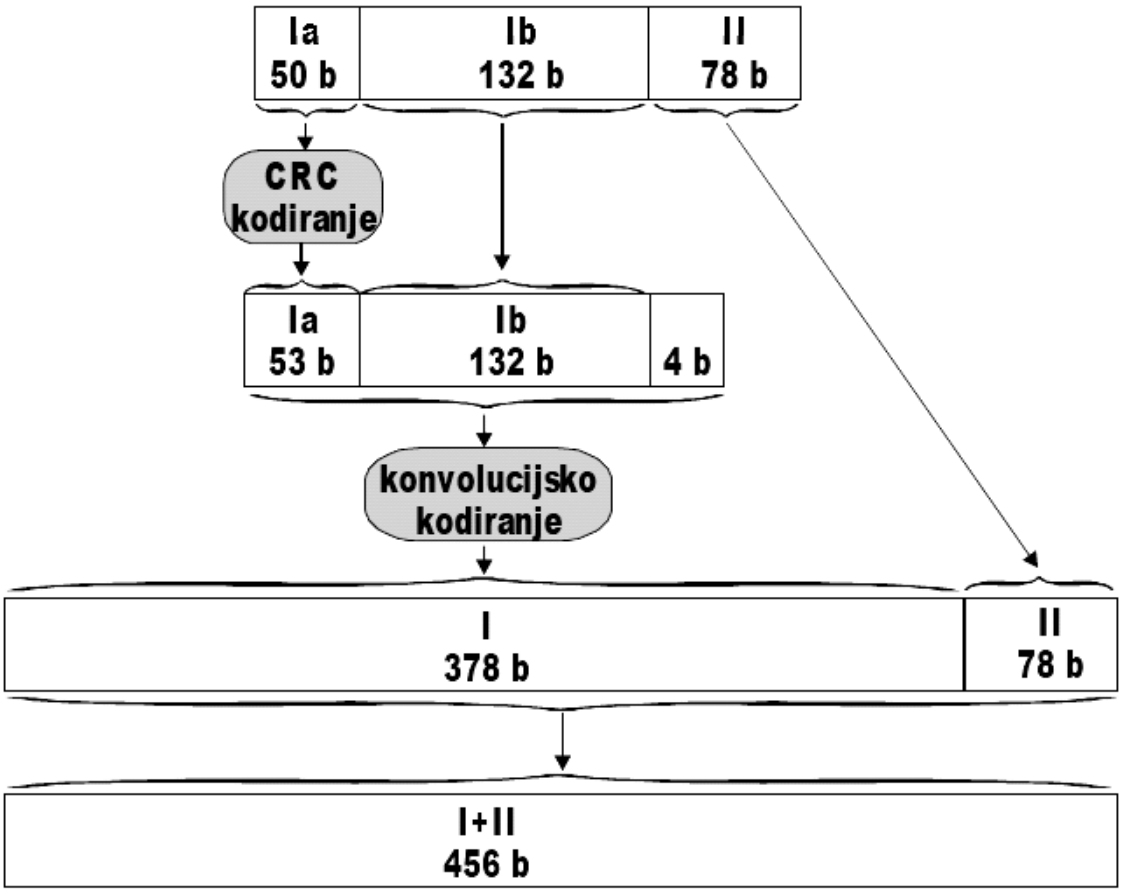
- Trajanje skupine vzorcev: 20ms
- Dolžina skupine vzorcev: 260 b
- Hitrost prenosa govora: 13 kb/s
- Število redundantnih bitov na blok: 456-260=196 b (43%)

Torej imam dolžino bloka 260 b. V njem imamo tri razrede pomembnosti bitov v bloku. Bolj kot je bit pomemben, bolj vpliva na kvaliteto prenesenega govora.

Ia (50 b): popravimo ali zavržemo

Ib (132 b): popravimo po najboljših močeh

II (78 b): ne zaščitimo



Slika 5-9. Kodiranje govora.

4.3 Protokol IP

4.3.1 Splošno o IP protokolu

IP – Internet Protokol je nepovezavno orientiran protokol, namenjen komunikaciji v omrežjih s paketno komutacijo. Je protokol tretjega, omrežnega nivoja in je inkapsuliran v protokolu povezovalnega sloja, npr. Ethernet.

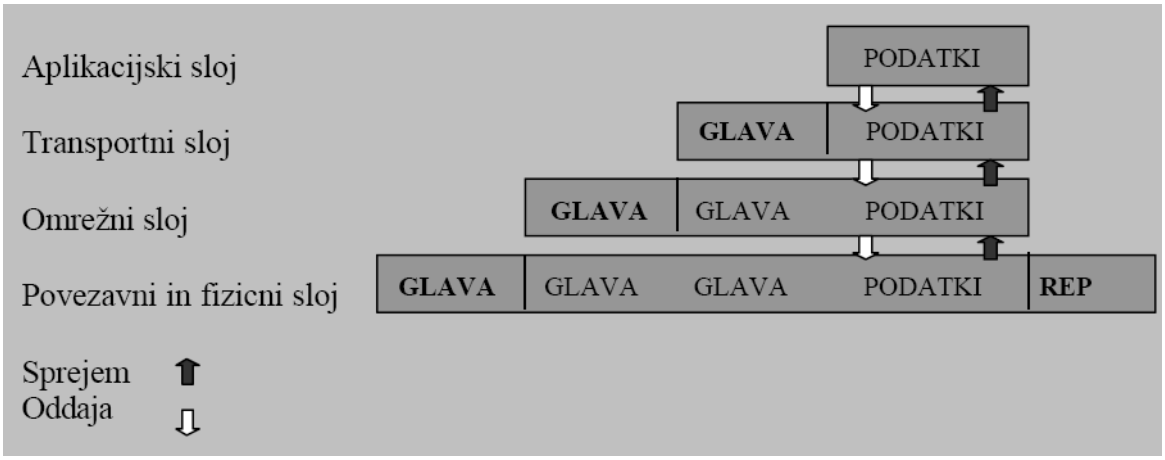
Kot protokol nižjega sloja omogoča storitev komunikacije znotraj sistema globalnega naslavljanja v omrežju interneta.

4.3.2 Pakiranje podatkov

Podatki protokola višjega sloja so inkapsulirani v enega ali več paketov oz. datagramov. Termin paket in datagram sta v okolju IP sinonima. Pred pošiljanjem paketa ni potrebno vzpostavljati nobene povezave, zato uvrščamo protokol IP med nepovezavno orientirane protokole. Še enkrat se spomnimo javnega telefonskega omrežja, kjer je potrebno pred prenosom podatkov vzpostaviti zvezo in tukaj govorimo o povezavno orientiranem protokolu.

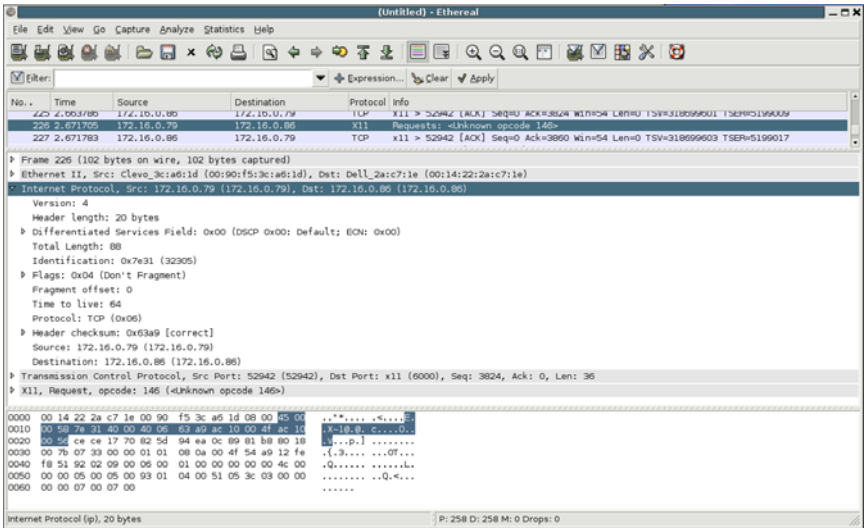
4.3.3 Storitve, ki jih IP nudi

Zaradi visokega nivoja abstrakcije, ki jo nudi inkapculacija, lahko protokol IP uporabljamo tudi v precej heterogenih omrežjih, npr. kombinacijah Etherneta, ATM-a, FDDI, Wi-Fi, token ring, itd. Heterogenost spodaj ležečih omrežin ne vpliva na protokole zgornjih slojev.



Slika 5-10. Inkapsulacija uporabnikovih podatkov v UDP datagramu znotraj IP paketa.

Protokoli povezovalnega sloja imajo svoje načine naslavljanja in skrbijo tudi za preslikavo IP naslovov v naslove povezovalnega sloja. Za to skrbi protokol ARP (Address Resolution Protocol).



Slika 5-11. Primer glave IP datagrama ujet s programom WireShark.

4.3.4 Zanesljivost IP protokola

IP protokol ne zagotavlja zanesljive dostave paketa. Deluje po principu *best-effort*., a brez kakršnekoli garancije, da bo paket res dostavljen, da bodo podatki nepoškodovani, da bodo prišli v istem vrstnem redu kot so bili odposlani in da ne bo na cilj prišel kakšen paket podvojen.

Kar se tiče zanesljivosti, protokol IP zagotavlja le kontrolno vsoto za glavo paketa. Napaka v kontrolni vsoti pa povzroči opustitev paketa, nima pa mehanizma, da bi ta paket ponovno oddal.

Za reševanje navedenih problemov morajo torej poskrbeti protokoli višjih slojev.

4.4 Naslavljanje v IP

4.4.1 Uvod

Naloga omrežnega sloja ISO/OSI je logično naslavljanje. V protokolnem skladu TCP/IP približno ustreza temu sloju internetni sloj protokolnega sklada ISO/OSI. Protokol, ki je zadolžen za logično naslavljanje je Internet Protocol (IP). Naslov IP določa sistemski položaj računalnika v omrežju, podobno, kot naslovi na ulici določijo položaj hiše v mestu. Podobno kot mora naslov ulice določiti eno samo bivališče, mora biti naslov IP en sam (edini) in mora imeti enoličen pomen. Z omrežnimi naslovi upravlja neprofitna internetna organizacija za dodeljevanje internetnih imen in naslovov IP (ICANN – Internet Corporation for Assigned Names and Numbers). Tako je zagotovljeno, da ne prihaja do konfliktov. Posamezne naslove IP je ICANN prepustil drugim organizacijam na regionalni ravni. Vsak naslov IP ima dva dela:

- omrežni del oz. predpono (*angl. net ID*),
- gostiteljev del, oz. del, ki pripada napravi (*angl. host ID*).

Omrežna predpona identificira ali določa fizično omrežje. Vsi gostitelji na istem omrežju potrebujejo (imajo dodeljeno) isto omrežno identifikacijsko oznako (številko), ki mora biti v internetu enolično določena. Identifikacijska oznaka (ID) gostitelja določa položaj postaje, strežnika, usmerjevalnika ali druge naprave znotraj omrežja TCP/IP. ID posameznega gostitelja je enolično določen.

Vsak gostitelj TCP/IP je identificiran z logičnim naslovom IP. En sam naslov IP je dodeljen vsem gostiteljem omrežnih komponent, ki komunicirajo preko TCP/IP. Vsak naslov IP je dolg 32 bitov in je sestavljen iz štirih 8–bitnih polj, imenovanih okteti. Okteti so ločeni s piko in predstavljajo decimalno število v vrednosti med 0 in 255. 32 bitov naslova IP je razdeljeno na omrežni ID in gostiteljev ID.

Naslov, ki ima v gostiteljevem ID same ničle, se nanaša na to omrežje. Naslov, ki ima v gostiteljevem ID same enice, dovoljuje pošiljanje razpršenih (*angl. broadcast*) paketov v lokalnem omrežju. Teoretično je mogoče pošiljanje razpršenih paketov tudi v internet, vendar administratorji to preprečujejo.

Človeku razumljivejša oblika naslova IP je s piko ločen desetiški zapis.

Zgled:

IP naslov zapisan v dvojiški obliki:

10001101 11010001 10000011 00001010

Isti IP naslov zapisan v desetiški obliki:

141.209.131.10

4.4.2 Razredi naslovov

Poznamo različne razrede naslovov IP. Vsak razred opredeli del naslova IP, ki prepozna omrežno predpono in del, ki prepozna gostiteljevo predpono. Internetna skupnost določa pet naslovnih razredov, ki so prilagojeni omrežjem različnih velikosti ali pa so namenjeni posebni uporabi. Naslovni razred definira, kateri biti se uporabljajo za omrežni del in kateri biti se uporabljajo za gostiteljev del. Razredi tudi določajo največje možno število omrežij in največje možno število gostiteljev v omrežju. Naslovni razred lahko določimo s pomočjo števil v prvem oktetu. 32–bitni način naslavljanja IP podpira do 3.720.314.628 gostiteljev.

Spodaj je prikazana delitev omrežij.

Osnovni razredi so A, B in C. Z rdečo barvo so označeni biti, ki pripadajo omrežju, z modro pa biti, ki pripadajo napravi.

Razred A: 0..... ....

Razred B: 10..... ....

Razred C: 110..... ....

Definirana sta tudi dva posebna razreda.

Naslovi razreda "D" se uporabljajo v skupinah za oddajanje več sistemom (*angl. multicast*). Te skupine lahko vsebujejo enega ali več gostiteljev ali pa sploh nobenega. Štirje najvišji biti v naslovnem razredu D so vedno nastavljeni dvojiško 1110. Naslednji biti določajo specifično skupino, v kateri odjemalec sodeluje. Tu ni omrežnih ali gostiteljevih bitov. Paketi so podani izbranim skupinam gostiteljev na omrežju. Samo gostitelji, ki so registrirani pri določenem naslovu, prejmejo paket. Naslov IP je lahko stalno določen (*angl. well–known addresses*) ali pa je ustvarjen začasno (*angl. transient multicast groups*). Uporablja se za videokonference in spletno televizijo. Naslovi razreda "D" se uporabljajo v skupinah za oddajanje več sistemom (*angl. multicast*). Te skupine lahko vsebujejo enega ali več gostiteljev ali pa sploh nobenega. Štirje najvišji biti v naslovnem razredu D so vedno nastavljeni dvojiško 1110. Naslednji biti določajo specifično skupino, v kateri odjemalec sodeluje. Tu ni omrežnih ali gostiteljevih bitov. Paketi so podani izbranim skupinam gostiteljev na omrežju. Samo gostitelji, ki so registrirani pri določenem naslovu, prejmejo paket. Naslov IP je lahko stalno določen (*angl. well–known addresses*) ali pa je ustvarjen začasno (*angl. transient multicast groups*). Uporablja se za videokonference in spletno televizijo.

Razred D - Multicast naslov:

1110.... ....

Naslovi razreda E so eksperimentalni naslovi, ki niso na voljo splošni uporabi. So uporabljeni pri preskušanju interneta in morebiti rezervirani za rabo v prihodnosti (npr. za prehod na IPv6). Biti z najvišjimi utežmi v naslovnem razredu "E" so nastavljeni na 1111.

Razred E - Rezervirani naslovi za bodočo uporabo:

11110... ....

4.4.3 Maska podomrežja in oblika zapisa IP naslova

Maska podomrežja je tesno povezana z IP naslovom in pove kolikšen del IP naslova pripada omrežju, kolikšen del pa napravam. Delitev je narejena s preprostim pravilom. Kjer v dvojiški obliki maske podomrežja nastopajo enice, tisti del pripada omrežju, kjer pa nastopajo ničle, tisti del pripada napravi.

Ponazorimo situacijo z zgledom:

IP: 192.168.0.42

MASKA: 255.255.255.0

Dvojiško lahko zapišemo masko podomrežja kot:

11111111 11111111 11111111 00000000

Na podlagi zgoraj napisanega v tem primeru omrežju pripada 192.168.0, napravi pa .42

IP naslov 192.168.0.42 pripada torej omrežju 192.168.0.0.

Masko podomrežja lahko tudi izrazimo v drugi obliki, in sicer tako, da navedemo število enic v maski podomrežja. Takšno notacijo imenujemo prefiksna notacija IP naslova.

Zgornji ip v prefiksni notaciji izgleda takole:

192.168.0.42/24

4.4.4 Posebni IP naslovi

IP naslov, ki ima vse bite naprave v dvojiški obliki 1, ni pravi IP naslov ampak je »broadcast« naslov. Kadar neka naprava pošlje neko sporočilo na broadcast naslov, ga prejmejo vse naprave znotraj danega omrežja.

Med posebne IP naslove spadajo tui naslovi, ki pripadajo t.i. nerutabilnim omrežjem, oz. omrežjem, ki se smejo uporabljati samo znotraj lokalnih omrežij. Lastnosti teh IP naslovov so enake lastnostim ostalih IP naslovov, le da se jih ne usmerja na javne IP naslove.
Nerutabilni IP naslovi so:

- Od 10.0.0.0 do 10.255.255.255 (prefix 10/8)
- Od 172.16.0.0 do 172.31.255.255 (prefix 172.16/12)
- Od 192.168.0.0 do 192.168.255.255 (prefix 192.168/16)

4.4.5 Ustvarjanje podomrežij

Če je razred omrežja prevelik, se lahko deli, pri čemer del bitov omrežja prepustimo napravi (subnetting). S tem povečamo število omrežij, vendar pa s tem seveda zmanjšamo število naprav znotraj posameznega podomrežja.
Kot zgled razdelimo omrežje, ki mu pripada IP naslov iz prejšnjega podpoglavja na 8 podomrežij. Za 8 podomrežij potrebujemo 3 bite, zato jih odvzamemo od naprave.
Maska podomrežja novega podomrežja je tako
111111111 111111111 111111111 11100000
Oz. v desetiški obliki 255.255.255.224
Iz danega omrežja smo tako naredili 8 podomrežij, znotraj vsakega pa lahko priključimo $2^5 - 2 = 0$ naprav. Ne pozabimo, da sta napravi dve manj. Ena manj je zaradi broadacast naslova (kadar so vsi biti naprave 1) in drugi manj zaradi omrežja (kadar so vsi biti naprave 0)

4.4.6 Problematika naslovnega prostora IPv4 in uvajanje IPv6

Poglavitni problem naslovnega prostora trenutno najbolj razširjene verzije protokola IP (v4) je pomanjkanje IP naslovov. Poleg tega v osnovi nima predvidene zagotavljanja kvalitete stortitev (QoS), varnosti, problematično je usmerjanje (velike usmerjevalne tabele), ipd. ZDA obvladujejo 90% IP naslovov v4 in monopolistično obvladujejo situacijo.
Rešitev je v postopni migraciji na IP v6, ki je dovolj velik naslovni prostor in je tudi mednarodno uravnotežen. Zagotovljeno je hitro usmerjanje, že v sami osnovi pa ima vgrajeno varnost in mobilnost.
IP v6 ima 128 bitni naslovni prostor, kar skupno znaša kar 3.4×10^{38} naslovov, kar je nedvomno dovolj za trenutne in prihodnje potrebe.

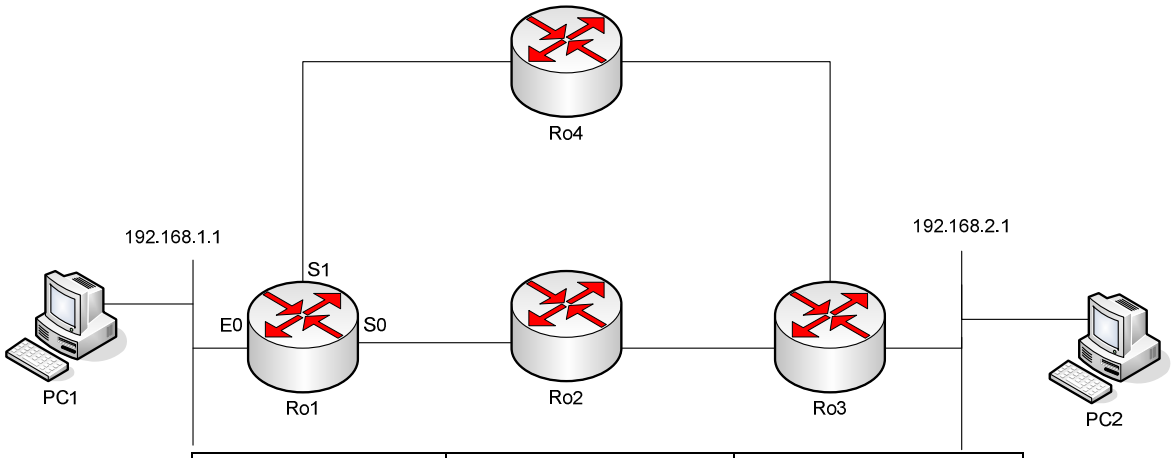
4.5 Usmerjanje v IP

Usmerjanje je postopek kako poslati podatek na željen naslov izven lokalnega omrežja. Usmerjevalnik zbira in vzdržuje informacije o topologiji omrežja in na podlagi nje usmerja poslane pakete na izbrane naslove. V konceptu ima vsak usmerjevalnik tabelo vseh možnih naslovov, ki jih doseže in postopek kako priti do tja. To tabelo lahko ročno (statično) napiše omrežni administrator, ali pa usmerjevalnik uporabi razne usmerjevalne protokole, ki na podlagi algoritma izračunajo in vzdržujejo (dinamično) to tabelo, glede na spremembe v topologiji omrežja.

Za uspešno usmerjanje mora usmerjevalnik storiti naslednje:

- prepoznati ciljni naslov
- prepoznati vire za pridobitev usmerjevalnih informacij
- Prepoznati poti omrežja
- Določiti pravilno pot

Če je usmerjevalnik na napravo vezan neposredno, brez ovir posreduje paket, saj pozna ciljni naslov. Če pa mora do ciljnega naslova prečkati več usmerjevalnikov, si mora usmerjevalnik izračunati najboljšo pot in zgraditi usmerjevalno tabelo.



Protokol	Ciljno omrežje	Izhodni priključek
Priključen RIP EIGRP	192.168.1.1 192.168.2.1 192.168.2.1	EO S1 S0

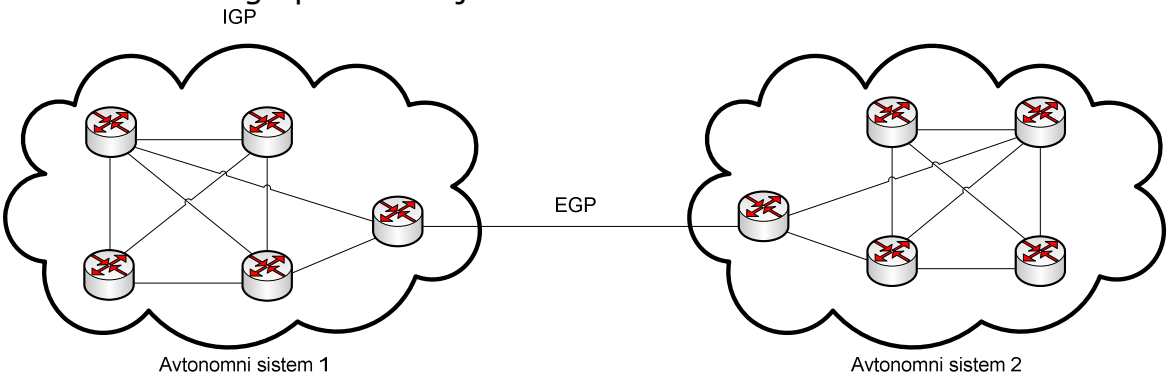
Slika 5-12. Omrežje.

Usmerjanje lahko poteka statično in dinamično. Pri statičnem usmerjanju administrator vpiše fiksen naslov v usmerjevalno tabelo in usmerjevalnik da prednost temu. Najpogostejša uporaba statičnega usmerjanja je pri omrežjih, kjer se navzven vežejo preko enega izhoda. Primer tega je povezava manjšega lokalnega omrežja v svetovni splet preko ponudnika

spletnih storitev (ISP). Dinamično usmerjanje pa je postopek, kjer usmerjevalnik uporablja protokol, s katerim sam izračuna najboljšo pot do cilja.

Obstajata dva tipa usmerjevalnih protokolov glede na avtonomnost omrežja:

- Protokol notranjih usmerjevalnikov (angl. IGPs - Interior Gateway Protocols): Ti se uporabljajo za izmenjavo usmerjevalnih informacij znotraj avtonomnega sistema. Primeri teh protokolov so: RIPv1, RIPv2, IGRP, EIGRP in OSPF
- Protokol zunanjih usmerjevalnikov (angl. EGPs - Exterior Gateway Protocols): Ti se uporabljajo za povezavo med avtonomnimi sistemi. Primer tega protokola je BGP-4.



Slika 5-13. Povezava avtonomnih sistemov.

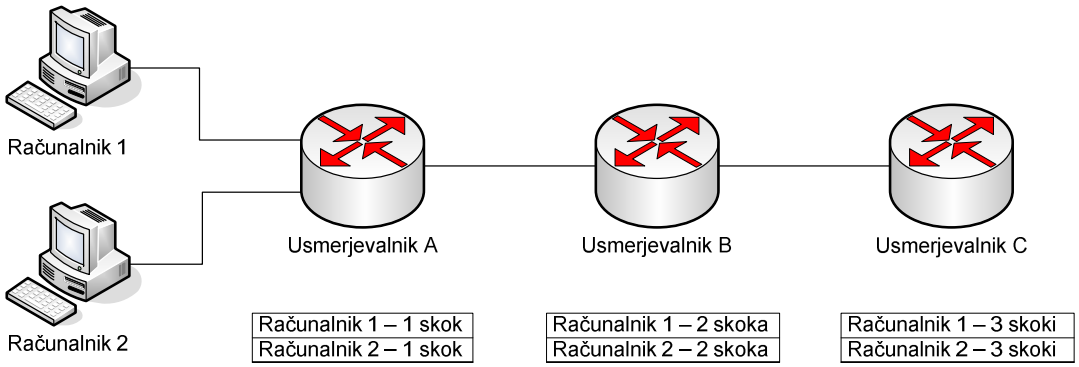
4.5.1 IGP usmerjevalni protokol

Znotraj posameznega avtonomnega sistema se IGP usmerjevalni protokoli delijo na tri tipe delovanja usmerjevalnega algoritma:

- **Distance vector:** Ta algoritem izračuna pot glede na smer (angl. vector) in dolžino poti (angl. distance), za katero se šteje število usmerjevalnikov, ki jih podatek prečka (angl. hops).
- **Link state**: Tudi znan kot »algoritem prednosti najkrajše poti« (angl. SPF - Shortest Path First), si ustvari natančno topologijo celotnega podomrežja v katerem se nahaja.
- **Balanced hybrid:** Ta algoritem pa združuje lastnosti link state in distance vector algoritmov.

Distance vector

Vsak distance vector usmerjevalnik pošlje svojo usmerjevalno tabelo, ali vsaj del nje, svojemu sosedu. Ta proces je znan tudi kot usmerjanje na podlagi govoric (angl. routing by rumor), saj usmerjevalnik sestavi sliko omrežja na podlagi sosedove perspektive nanjo. Za razliko od link state osveževanja, kjer pošiljajo manjše tabele po celem omrežju, ta pošlje celotno tabelo, ampak le svojemu sosedu. Predstavniki distance vector protokolov so RIPv1, RIPv2 in IGRP.



Slika 5-14. Primer usmerjanja distance vector protokola.

Usmerjevalnik A si zgradi usmerjevalno tabelo glede na naprave priključene nanj in jo pošlje svojemu sosedu, usmerjevalniku B. Ta jih doda v svojo tabelo, pri čemer preračuna skoke. Nato usmerjevalnik B pošlje svojo tabelo sosednjemu usmerjevalniku C, itd.

Kadar obstaja več možnih poti do cilja, je primarna naloga usmerjevalnega algoritma izbrati najboljšo pot iz tabele. Vsak distance vector usmerjevalni protokol uporablja drugačno matematiko za izračun najboljše poti. Algoritem ustvari številko, ceno poti (angl. cost), za vsako pot skozi omrežje. Manjša kot je številka, boljša je pot. Če usmerjevalnik uporablja več protokolov, se uporablja administrativna distanca. To je število med 0 in 255, ki je dodeljeno vsakemu protokolu. To je nekakšna ocena protokola, in boljši kot je, nižjo administrativno distanco ima. Uporablja pa se v primeru, ko se mora usmerjevalnik odločiti med dvema protokoloma in tu da prednost protokolu z nižjo administrativno distanco.

Statično podana usmeritev ima prednost pred vsemi, zato ima administrativno distanco 1.

Vrsta protokola	Določena admin. distanca
Direktna povezava	0
Statičen usmerjeni naslov	1
EIGRP	90
IGRP	100
OSPF	110
RIPv1, RIPv2	120
Zunanji EIGRP	170
Neznan ali nemogoč	255, ne bo posredoval podatka

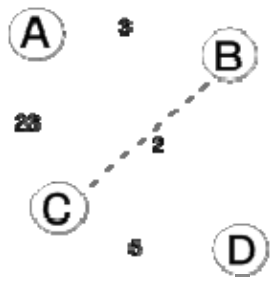
Kompleksnejši algoritmi za izračun najboljše poti upoštevajo več karakteristik poti, kot so:

- **Število skokov:** nam pove čez koliko usmerjevalnikov mora podatek potovati
- **Pasovna širina:** je podatkovna hitrost linije. Primer: 10-Mbps Ethernet linija je sprejemljivejša kot 64-kbps linija
- **Zakasnitev:** čas, ki ga vsak usmerjevalnik porabi za procesiranje
- **Obremenjenost omrežja:** količina aktivnosti na usmerjevalniku ali liniji.
- **Zanesljivost:** (angl. bit error rate), izražena za vsako linijo
- **Največja velikost paketa:** (angl. MTU – maximum transmission unit), izražena v oktetih, in je sprejemljiva za prenos po celotni liniji od izvora do cilja.

RIP in IGRP sta distance vector usmerjevalna protokola z razliko, da RIP uporablja število skokov za izračun, medtem ko IGRP uporablja naprednejša merila kot sta pasovna širina in zakasnitev že v osnovi. Dodatno lahko uporabi še ostale.

<u>Primer</u>:

V omrežju imamo 4 usmerjevalnike:



Slika 5-15. Primer topologije omrežja.

Začnemo s kreiranjem distančnih matrik vsakega usmerjevalnika. Najkrajša pot je obarvana zeleno, nova najkrajša pot je obarvana rumeno.

T=0

from A	via A	via B	via C	via D
to A				
to B		3		
to C			23	
to D				

from B	via A	via B	via C	via D
to A	3			
to B				
to C			2	
to D				

from C	via A	via B	via C	via D
to A	23			
to B		2		
to C				
to D				5

from D	via A	via B	via C	via D
to A				
to B				
to C			5	
to D				

T=1

from A	via A	via B	via C	via D
to A				
to B		3	25	
to C		5	23	
to D			28	

from B	via A	via B	via C	via D
to A	3		25	
to B				
to C	26		2	
to D			7	

from C	via A	via B	via C	via D
to A	23	5		
to B	26	2		
to C				
to D				5

from D	via A	via B	via C	via D
to A			28	
to B			7	
to C			5	
to D				

T=2

from A	via A	via B	via C	via D
to A				
to B		3	25	
to C		5	23	
to D		10	28	

from B	via A	via B	via C	via D
to A	3		7	
to B				
to C	8		2	
to D	31		7	

from C	via A	via B	via C	via D
to A	23	5		33
to B	26	2		12
to C				
to D	51	9		5

from D	via A	via B	via C	via D
to A			10	
to B			7	
to C			5	
to D				

T=3

from A	via A	via B	via C	via D
to A				
to B		3	25	
to C		5	23	
to D		10	28	

from B	via A	via B	via C	via D
to A	3		7	
to B				
to C	8		2	
to D	13		7	

from C	via A	via B	via C	via D
to A	23	5		15
to B	26	2		12
to C				
to D	33	9		5

from D	via A	via B	via C	via D
to A			10	
to B			7	
to C			5	
to D				

Slika 5-16. Primer usmerjanja distance vector protokola.

Vzdrževanje usmerjevalnih informacij je bistveno za zaznavanje sprememb v topologiji omrežja in poteka korak za korakom od usmerjevalnika do usmerjevalnika. Osveževanje pri distance vector protokolih poteka tako, da vsak posamezen usmerjevalnik odda svojo usmerjevalno tabelo svojim sosedom. To oddaja periodično v določenih intervalih, lahko pa se pošlje takoj, ko usmerjevalnik zazna spremembo v topologiji omrežja. Za to uporablja prožilni časovnik (angl. trigger update).

Ta ima nalogo, da ob zaznani spremembi topologije takoj pošlje usmerjevalno tabelo sosedom. Pri tem se sporočilo o napaki v omrežju hitreje razpošlje.
Ko usmerjevalnik sprejme sosedovo tabelo, jo primerja z lastno. Po algoritmu za izračun najboljše poti si preračuna vsako pot in jo primerja z potjo v svoji tabeli. Če usmerjevalnik izračuna boljšo pot, kot ima zapisano v tabeli, posodobi svojo z novim podatkom. Vsaka pot v tabeli vsebuje informacije o kakovosti poti in logičnega naslova prvega usmerjevalnika na tej poti.

Link state
Tudi znan kot SPF (angl. shortest path first) algoritem, vzdržuje kompleksno sliko topologije omrežja in na podlagi te izračuna najboljšo pot. »Link« predstavlja povezavo podobno kot pri usmerjevalniku, »state« pa opisuje povezljivost v omrežje in odnos do sosednjih usmerjevalnikov. Zato obratno kot distance vector algoritem, ki nima informacij o oddaljenih usmerjevalnikih, link state usmerjevalni algoritem vzdržuje celotno sliko o oddaljenih usmerjevalnikih in kako so povezani med sabo. Predstavnika link state protokolov sta IS-IS (angl. intermediate system – intermediate system) in OSPF (angl. open shortest path first).

Vzdrževanje usmerjevalnih informacij pri link state protokolu
Za vzdrževanje usmerjevalnih informacij, link state usmerjanje uporablja oglaševanje (angl. LSAs – link state advertisements), topološko tabelo, SPF algoritme, SPF drevesno strukturo in usmerjevalno tabelo poti in vrat do vsakega omrežja.
Link state usmerjevalni protokol zbira informacije o usmerjanju od vseh usmerjevalnikov v omrežju ali znotraj določenega območja (angl. area). Ko posamezen usmerjevalnik zbere vse informacije, si neodvisno od drugih izračuna najboljše poti do vseh ciljev v omrežju. Ker ima vsak usmerjevalnik svoj pogled na omrežje, je zelo majhna verjetnost obveščanja sosednjih usmerjevalnikov o napačnih poteh.
Link state usmerjevalni protokol je bil zasnovan z namenom izboljšanja omejitev, ki jih predstavlja distance vector usmerjevalni protokol. Hitro odzove na spremembe v omrežju, pošlje usmerjevalno tabelo le takrat, ko se zgodi sprememba v topologiji omrežja, periodične posodobitve (angl. link-state refreshes) pa pošilja občasno (30 minutni intervali). Za preverjanje dosegljivosti sosednjega usmerjevalnika se uporablja **Hello** mehanizem. To so manjši paketi, ki jih usmerjevalnik pošilja v hitrejših intervalih izključno z namenom, obvestiti sosede, da delujejo.
Ko se zgodi okvara v omrežju, kot je denimo nedosegljivost sosednjega usmerjevalnika, link state protokol poplavi omrežje z LSA paketi, pri čemer uporablja poseben večnamenski naslov (angl. multicast address). Vsak link state usmerjevalnik vzame kopijo LSA paketa, posodobi lastno link state (topološko) tabelo, in posreduje LSA paket vsem sosednjim usmerjevalnikom. LSA paket povzroči dodatno delo, saj mora vsak usmerjevalnik v omrežju preračunati nove poti. Ker se mora LSA paket razposlati po vsem omrežju, in mora vsak usmerjevalnik izračunati novo

usmerjevalno tabelo, je pametno, da to omrežje vsebuje omejeno število link state usmerjevalnikov.
Osvežitev lahko vsebuje IP naslov priključka, masko omrežja, tip omrežja, na katerega je priključen, usmerjevalnike, ki so tudi priključeni na to omrežje, itd. Zbirka link-state predstavlja topološko tabelo povezav. Uporablja se za izračun najboljše poti skozi omrežje, pri tem pa uporabljajo Dijkstra SPF algoritem, ki iz topološke tabele najde najboljšo pot in jo vnese v usmerjevalno tabelo.

Link state protokoli uporabljajo dvo-slojno mrežno hierarhijo. Za to obstajata dva osnovna elementa:

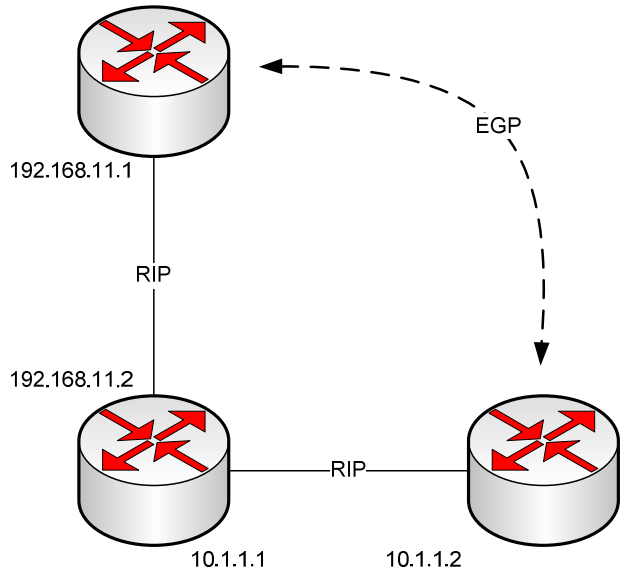
- **Podomrežje** (angl. subnet) je skupina več omrežij, ki so manjše skupine logično razdeljenega avtonomnega sistema.
- **Avtonomni sistem** je sestava celotnega omrežja pod skupno administracijo. Delijo si tudi skupno usmerjevalno strategijo. Avtonomni sistem, včasih imenovan tudi domena je lahko logično razdeljena v več manjših podomrežij.

Znotraj vsakega avtonomnega sistema mora biti definirano neprekinjeno hrbtenično omržje (angl. backbone). Vsa ostala podomrežja so priključena nanjo in posredno komunicirajo z ostalimi omrežji preko nje. Pri OSPF se podomrežja lahko dodatno definirajo kot »stub« podomrežja, »totaly stubby« podomrežja ali »not-so-stubby« (NSSA) podomrežja z namenom, da zmanjšajo velikost link state usmerjevalne tabele.

Uravnovešeno hibridno usmerjanje
Hibridno usmerjanje je kombinacija distance vector in link state protokolov. Uporablja distance vectors vendar z bolj točno metriko za določitev najboljše poti do cilja. Toda, za razliko od večine distance vector protokolov, se pošiljanje paketov z usmerjevalnimi informacijami izvaja kadar nastopi sprememba v topologiji omrežja (jih ne pošilja periodično).
Odzivni časi hibridnega protokola so mnogo hitrejši od distance vector ali link state protokola. Za svoje delovanje pa rabi več spomina in procesorske moči.
Primer uravnovešeno hibridnega usmerjevalnega protokola je Cisco EIGRP.

4.5.2 EGP usmerjevalni protokol

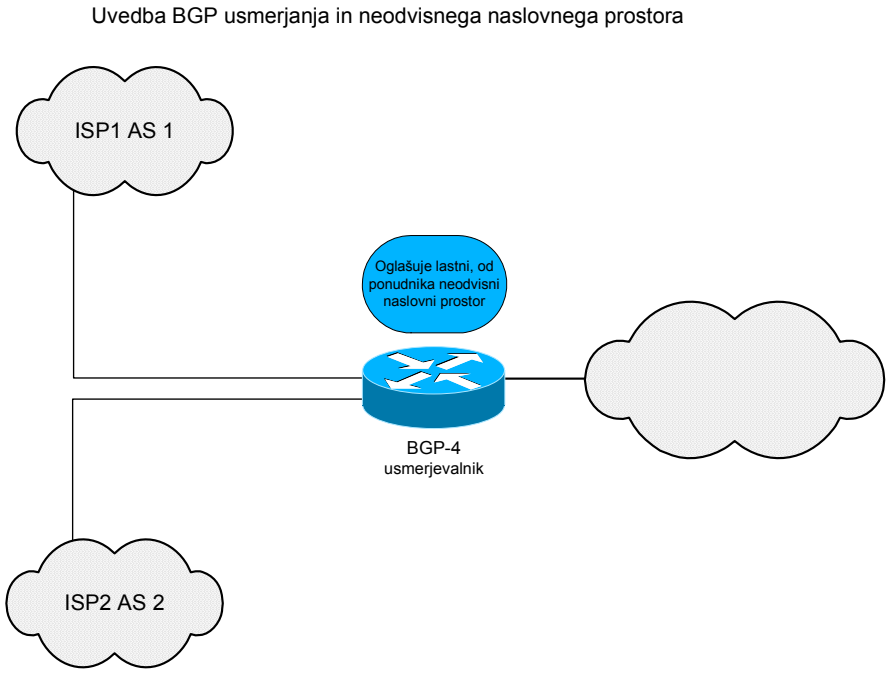
Poglavitna naloga EGP protokolov je povezovanje avtonomnih sistemov med sabo. Poleg komunikacije med mejnimi usmerjevalniki o EGP informacijah, lahko ti protokoli nadomestijo IGP protokole in z tem usmerjajo promet znotraj enega avtonomnega sistema. Komunikacija z EGP protokolom lahko poteka med dvema usmerjevalnikoma tudi, če običajno med njima usmerja promet kateri od IGP protokolov.



Slika 5-19. Komunikacija po EGP protokolu.

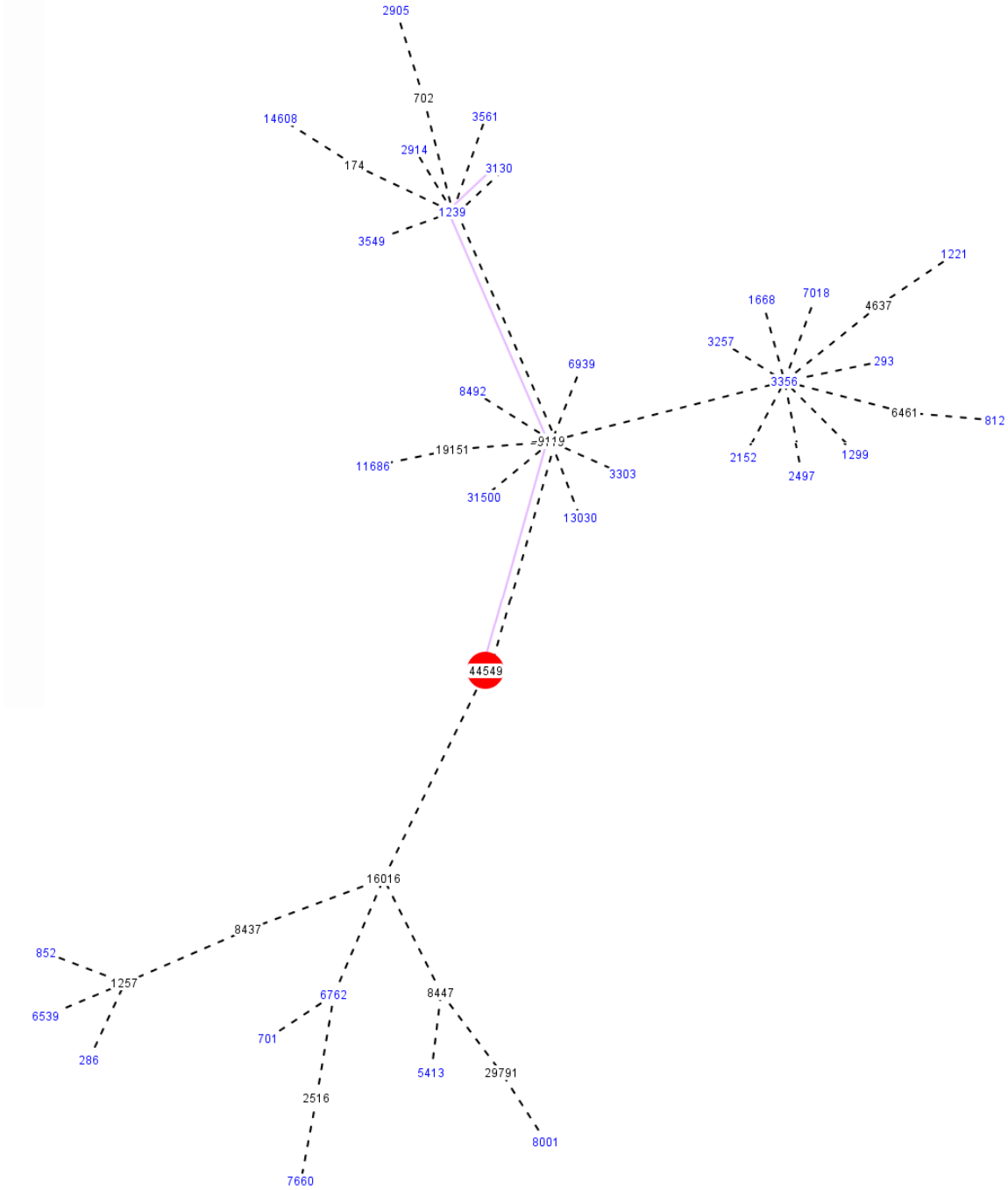
Najpomembnejši EGP protokol je BGP verzije 4.
Delovanje interneta večinoma temelji na tem protokolu. Zagotavlja usmerjanje med avtonomnimi sistemi (AS).

Če želi neko podjetje zvišati razpoložljivost dostopa do interneta, potem se mora dogovoriti z dvema neodvisnima ponudnikoma dostopa do interneta, da neodvisno oglašujeta naslovni prostor tega podjetja. Podjetje mora pridobiti svoj lastni naslovni prostor (PI IP Provider Independent IP) in svojo številko avtonomnega sistema – AS. Nato je lahko vidno v svetu preko dveh ali več neodvisnih ponudnikov dostopa do interneta.



Slika 5-20. Dostop do interneta preko dveh neodvisnih ISPjev.

Spodnja slika 5-21 prikazuje kako je podjetje z AS 44549 vpeto v omrežje interneta preko ponudnika 1, ki ima AS 9119 in ponudnika 2, ki ima AS16016.



Slika 5-21. Prikaz vpetosti podjetja v omrežja interneta. Slika je bila narejena z uporabo orodja BGPlay.

5 Sistemi sodobne fiksne govorne telefonije

Prvi sistemi fiksne telefonije so bili analogni. Mnogo analognih sistemov telefonije po svetu še vedno obratuje. Tehnološki napredek je pomenila digitalizacija in uvedba sistema ISDN. Ta je omogočil uvajanje dodatnih storitev na sistemih fiksne tehnologije. Trenutno smo v fazi prehoda iz klasičnih analognih in digitalnih sistemov na enotno IP platformo, kamor se poleg telefonije zlivajo tudi ostale podatkovne storitve. Prenos govora preko IP, paketno komutiranih omrežij imenujemo s kratico VoIP (Voice over IP).

Iz tehnološkega in fukcionalnega vidika sta najpomembnejši ISDN in VoIP, zato si ju v nadaljevanju poglejmo podrobneje.

5.1 ISDN

Digitalno omrežje z integriranimi storitvami oz. ISDN (Integrated Services Digital Network) je tip vodovno komutiranega telefonskega omrežja, ki je zasnovan tako, da omogoča digitalen prenos govora in podatkov po klasični telefonski bakreni parici. Omogoča višji nivo kvalitete in večje hitrosti kot klasičen analogen telefonski sistem.

Beseda ISDN je bila prvič uporabljena leta 1972, toda ideja o ISDN omrežju sega nazaj v pozna 60-ta leta.

Leta 1984 je takratno svetovno telekomunikacijsko telo za standarde (CCITT, sedaj ITU-T) definiralo ISDN na naslednji način:

ISDN je definiran kot omrežje, ki je razvito iz integriranega telefonskega omrežja in omogoča digitalno povezljivost med končnimi terminali na celotni prenosni poti, poleg tega pa podpira širok spekter govornih in negovornih storitev, do katerih imajo uporabniki dostop preko omejenega nabora standardnih, večnamenskih vmesnikov uporabnik-omrežje.

Bistvene prednosti, ki jih ponuja ISDN, so:

- Širši spekter storitev.
- Možnost več zvez na enem priključku.
- Možnost 7 kHz namesto 3.1 kHz pasovne širine za prenos zvoka.

- Tehnološko poenoteni uporabniški priključek za dostop do javnih komunikacijskih omrežij (PSTN, X.25) za prenos glasu, slike, besedila in podatkov.
- Večja udobnost komuniciranja.
- Digitalna komunikacija s hitrostmi do 2 Mbit/s.
- Krajši čas vzpostavljanja zveze.
- Izboljšana kakovost storitev.

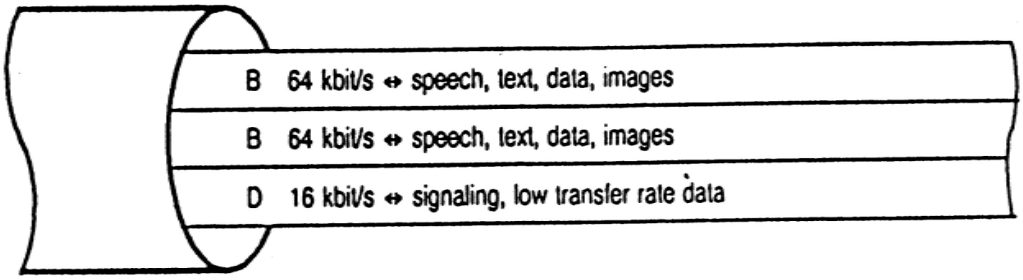
Telekomunikacijski operaterji precej vlagajo v položeno bakreno infrastrukturo, ki pa zaradi svojih fizikalnih zakonitosti omejuje pasovno širino komunikacije. Zamenjava obstoječega bakrenega omrežja z nečim manj omejujočim, kot je na primer optično vlakno, je v tem trenutku ekonomsko neupravičena, zato je bila v razvoju ISDN-ja ključna zahteva, da mora biti prepletena bakrena parica primerna za osnovni dostop do ISDN vstopne točke.

5.2 Vrste dostopa

Uporabnik se lahko priključi na omrežje prek priključne točke z osnovnim ali s primarnim dostopom.

5.2.1 Osnovni dostop

Osnovni dostop (BRA – Basic Rate Access) omogoča na svojem vodilu S_0 dva osnovna kanala (B-kanala) s standardnima hitrostma 64 kb/s in signalizacijsko-podatkovni kanal (kanal D) s hitrostjo 16 kb/s. Vsak od dveh B-kanalov omogoča prenos uporabniške informacije (govor, tekst, podatki, slika). Kanala sta lahko uporabljena in komutirana neodvisno eden od drugega. To pomeni, da obstajata istočasno dve neodvisni zvezi (govor, podatki ali faks). Lahko pa sta oba B-kanala uporabljena v eni sami zvezi. Primer je video zveza, kjer se v enem kanalu prenaša govor, v drugem pa slika.



Slika 5-22.Osnovni dostop – ISDN BRA.

Po D-kanalu se prenaša signalizacija za vzpostavljanje in prekinjanje zveze, za prenos informacij o naročnikih in vrstah želenih storitev.

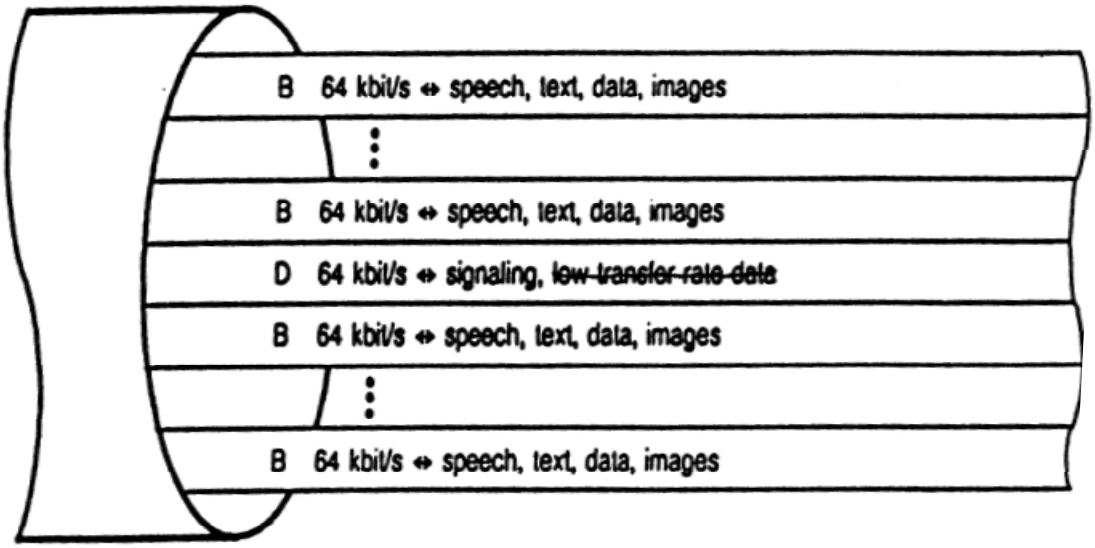
Osnovni dostop fizično tvori par bakrenih žic, po katerih se prenašata oba B-kanala in signalni D-kanal. V vseh treh kanalih se prenaša 144kb/s koristne informacije (2 x 64 kb/s + 16 kb/s).

Istočasno lahko na en BRA priključimo do osem poljubnih terminalov, vsak od teh ima lahko svojo klicno številko in se lahko po želji tarifira posebej. Naenkrat pa sta lahko aktivna le dva.

Osnovni dostop je tako primeren za uporabnike z manjšimi zahtevami.

5.2.2 Primarni dostop

Primarni dostop (PRA – Primary Rate Access) omogoča na vmesniku S_2M 30 osnovnih kanalov B s hitrostjo 64 kb/s. PA torej omogoča 30 istočasnih zvez in je primeren za podjetja, ki so do sedaj uporabljala velike naročniške centrale in številne dodatne priključke za negovorne storitve. Podobno kot pri osnovnem dostopu, kjer se v D-kanalu prenaša signalna informacija, se tudi na PA uporablja D-kanal, ki je 16.kanal v PCM30. Časovna okna od 1 do 15 in od 17 do 31 so B-kanali in služijo kot uporabniški kanali za prenos govora, podatkov in slike.



Slika 5-23. Primarni dostop – ISDN PRA.

Tako kot pri BRA se B-kanali zasegajo in komutirajo individualno, odvisno od poziva, medtem ko se signalna sporočila za vse B-kanale prenašajo po D-kanalu. Osnovni in primarni dostop se razlikujeta tudi v funkciji D-kanala. Pri primarnem dostopu se v D-kanalu prenašajo izključno samo signalna sporočila. Paketno orientirani podatki, ki jih je možno pri

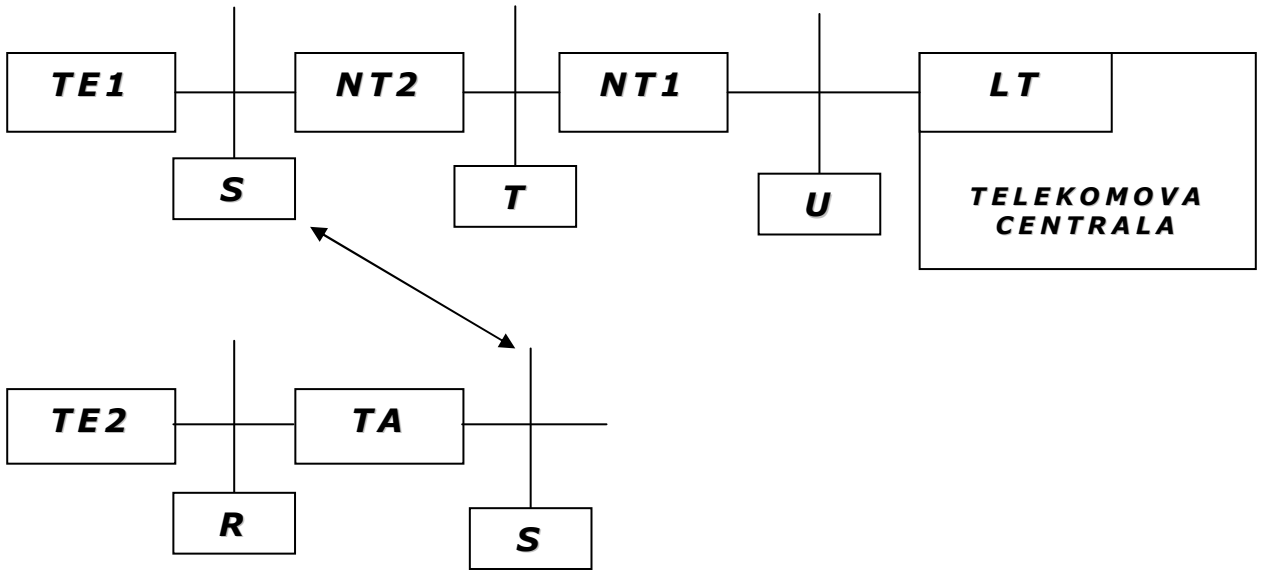
osnovnem dostopu prenašati po D-kanalu, morajo biti pri primarnem dostopu ločeni od signalnih podatkov. Paketno orientirani podatki se pri primarnem dostopu prenašajo po B-kanalih. Hitrost prenosa je kar prenosna hitrost samega PCM, to je 2 Mb/s. Vsak od B-kanalov prenaša govor, podatke, tekst ali sliko s hitrostjo 64 kb/s in tudi v D-kanalu se signalna sporočila prenašajo s hitrostjo 64 kb/s.

5.3 ISDN referenčne oz. priključne točke

Poglejmo si nekatere osnovne kratice, ki jih srečujemo v sistemu *ISDN*:

- *LT* (Line Termination) je točka, kjer se zaključuje osnovni dostop. To je ponavadi centrala.
- *NT* (Network Termination) je oprema za zaključevanje linije pri uporabniku. Ta se deli naprej na *NT1* in *NT2*, vendar je *NT2* zelo redko uporabna. Privzeli bomo, da je naprava priključena na *NT1.*
- *TE* (Terminal Equipment) je oprema, ki se priključi direktno na *S/T* vmesnik. Ta vključuje *ISDN* telefone, modeme …
- *TA* (Terminal Adapter) je vmesnik, preko katerega se na omrežje lahko priključijo naprave, ki niso namenjene za delovanje v *ISDN* omrežju (npr. analogni telefon). Naprave, ki se priključijo na *TA* se imenujejo s skupno kratico *TE2*.
- *S/T* vmesnik se imenuje štiri-žično vodilo (pozitivna in negativna oddajna in sprejemna žica) med *NT1* in *ISDN* terminalno opremo.
- *U* vmesnik je dvožična povezava med *NT1* in centralo.

Na sliki so priključne točke videti takole:



Slika 5-24. Priključne točke in tipi ISDN opreme.

5.4 ISDN kanali

Pri izvedbi ISDN-a lahko krajevna zanka prenaša le digitalne signale, uporablja pa tri vrste kanalov, ki služijo signalizaciji in prenosu podatkov. To so:

- **B-kanal -** prenaša podatke za uporabnikove storitve, kot so govor, zvok, video in digitalni podatki. Hitrost prenosa je DS-0 (64 kb/s).

- **H-kanal –** ima enake naloge kot B kanal, le da prenaša pri višjih hitrostih kot DS-0.

- **D-kanal -** prenaša signalizacijske podatke med uporabnikom in omrežjem, lahko pa prenaša tudi uporabnikove podatkovne pakete.

B-kanal

Primarni namen B-kanala je, da zagotavlja nosilne storitve, te so prenos govora, zvoka, slik, podatkov in videa. Preko B-kanala se prenašajo storitvene zahteve. Vedno deluje s hitrostjo 64 kb/s, ki je hitrost, prilagojena digitalnim govornim aplikacijam.

B-kanal se lahko uporablja za povezavni ali paketni način prenašanja podatkov. Povezavni način zagotavlja transparentno povezavo od uporabnika do uporabnika, nad fizičnim slojem (64 kb/s) ni drugih definiranih protokolov. Vsak uporabnik je zadolžen za definicijo protokolov, ki se bodo uporabljali v povezavi in da zagotovi združljivost med napravama, ki ju povezuje B-kanal. Paketni način povezave podpira naprave, ki uporabljajo protokole kot so X.25 ali frame relay. ISDN lahko zagotovi notranjo storitev za paketni način ali pa nudi dostop do obstoječega PSPDN (javno digitalno omrežje s paketno komutacijo) omrežja.

B-kanali se lahko uporabljajo na klic ali so trajni. Če so B-kanali trajni, ni potrebna signalizacija D-kanala za delovanje B-kanala.

Signalizacijski D-kanal

Omrežje in uporabnikova naprava si vse zahteve po storitvah in ostala signalizacijska sporočila izmenjujejo preko D-kanala. Vendar pa se lahko preko D-kanala prenašajo tudi uporabnikovi podatki v paketnem načinu.

Hitrost prenosa teh podatkov je lahko največ 9,6 kb/s. Seveda pa imajo signalizacijska sporočila prednost pred podatkovnimi paketi.

D-kanal deluje s hitrostjo 16 kb/s pri osnovnem dostopu (BRA) in s 64 kb/s pri primarnem dostopu (PRA).

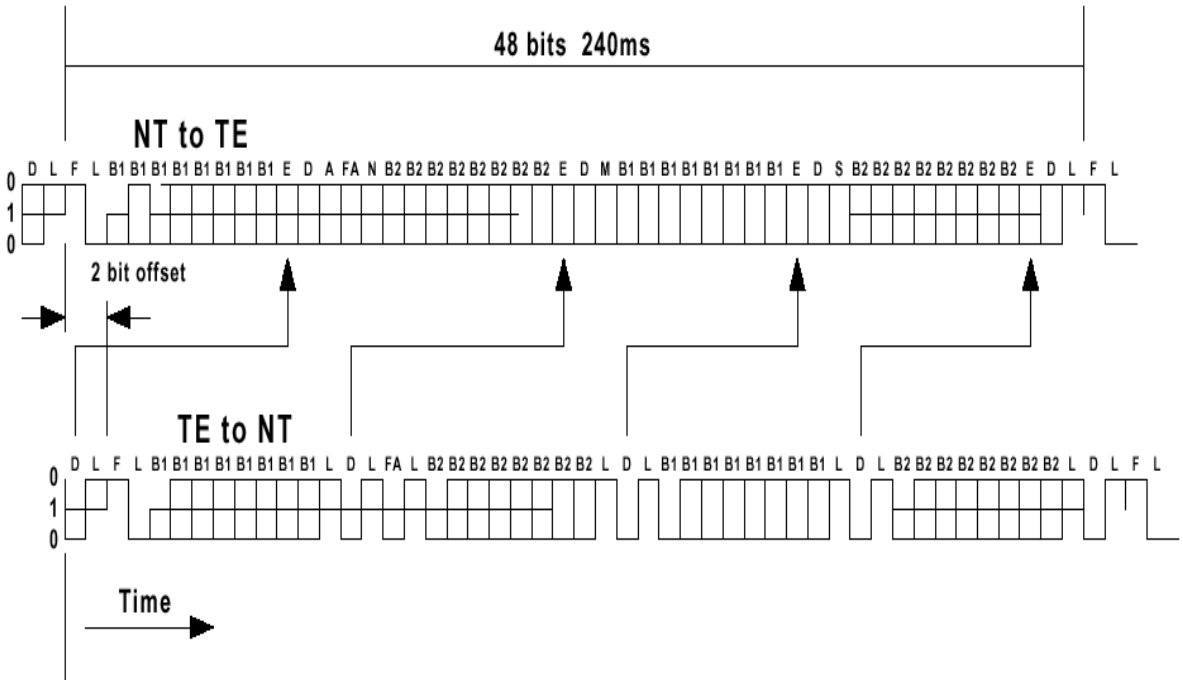
Signalizacija zajema podatki, kot npr. podatki o kličočem, preusmeritvah, statusu na liniji, seveda pa tudi tiste osnovne, brez katerih ne moremo telefonirati, npr. vzpostavljanje zvez, podatki o zvonjenju, zasedenosti linije in drugi.

Če bi protokol na *D* kanalu umestili v *ISO-OSI* model, bi nivoji izgledali takole:

- Prvi nivo je fizični. Na tem nivoju se prenašajo kodirani podatki v t.i. psevdo-ternarni kodi.
- Drugi oz. povezavni nivo predstavlja *HDLC*, ki se v *ISDN* imenuje *LAPD* oz. Q.921.
- Na tretjem oz. mrežnem nivoju pa je protokol *Q.931*. Tukaj se prenašajo vsi podatki za vzpostavljanje zveze.
- Na višjih nivojih pa so vse aplikacije, ki jih *ISDN* omogoča.

Fizični sloj D kanala na S/T vodilu

V tem poglavju bo na kratko opisan le zelo splošen pregled dogajanja na tem nivoju. To podpoglavje smo uvrstili v poglavje o *D* kanalu zaradi celovitosti opisa dogajanja na slojih modela *ISO-OSI*, čeprav je ta fizični kanal seveda tudi podlaga za prenos govornih *B* kanalov.
Vodilo za prenos podatkov na *S/T* referenčni točki je štiri žično (dve sprejemni in dve oddajni žici). Prenos podatkov na tem nivoju poteka s hitrostjo 192 Kbps. Linijsko kodiranje na tem nivoju je t. i. psevdo-ternarno. Pri takšnem kodiranju predstavlja logično enico nič voltov, logično ničlo pa impulzi $\pm 750mV$, ki se zaporedoma izmenjujejo.
Vsak psevdo-ternaren okvir je sestavljen iz 48 bitov, pri čemer je od tega 36 bitov *2B+D* kanala ostalih 12 bitov pa je pomožnih (overhead). Uporabni podatki v takšnem okvirju si sledijo takole: 8 bitov *B1*, 1bit *D*, 8 bitov *B2* in zopet 1 bit *D* kanala. Ta sekvenca se ponovi dvakrat na okvir. Pomožni biti se pojavljajo med skupinami *B* bitov in *D* bitov. Pomožne bite uporabljata *TE* in *NT* za aktivacijo, balansiranje… To je podrobneje vidno na spodnji sliki.
Na tem mestu naj tudi omenim, da je maksimalna dolžina voda med *TE* in *NT* 1 km, če je to povezava zgolj med enim *TE* in enim *NT*. Če pa je na en *NT* priključenih več *TE*, je maksimalna dolžina le 200 m. Te omejitve so zaradi faznega zamika, ki bi nastal ob prevelikih razdaljah.



- *F* (Framing bit) bit za sinhronizacijo okvirjev
- *L* (Balancing bit) bit za izničenje enosmerne komponente
- *D* (Data bit) bit signalizacijskega kanala
- *E* (Echo bit) odmev bita signalizacijskega kanala – t. j. za pogajanje za dostop do *D* kanala)
- *FA* (Auxiliary framing bit) ob vsakem veljavnem okvirju je postavljen na 0)
- *M* (multiframing bit) sprememba formata okvirja
- *B 1, 2* (Bearer 1, 2) uporabniški govorni podatki
- *A* (Activation bit) Za aktiviranje zanke (glejte poglavje 5.2)
- *S* Rezerviran za prihodnjo uporabo

Slika 5-25. Fizični sloj na S/T vodilu po ISO OSI modelu.

Drugi nivo v protokolnem skladu – protokol LAPD

Na drugem, oz. povezavnem sloju je v *ISDN* standardu definiran protokol *LAPD* (Link Access Procedures D Channel). Namen tega sloja je, da zagotovi prenos podatkov brez napak.
V osnovi je *LAPD* sestavljen iz petih sklopov, in sicer:

FLAG t.j. zaporedje osmih bitov 01111110, ki se pojavljajo na začetku in na koncu vsakega *LAPD* okvirja.

ADDRESS - 16 bitno polje, sestavljeno iz dveh delov, in sicer *SAPI* (Service Access Profile Identifier) in *TEI* (Terminal Endpoint Identifier), ki služita pravilnemu naslavljanju enot.

CONTROL – 8 oz. 16 bitno polje, ki pove, za kakšen tip okvirja gre.

INFO polje, kjer so podatki tretjega sloja (podatki o telefonski številki, zvonjenju, zasedenosti linije...).

FCS polje šestnajstih bitov pred tipično zaključno sekvenco

	oktet
Tipična sekvenca 0 1 1 1 1 1 1 0	1
Naslovno polje (prvi oktet)	2
Naslovno polje (drugi oktet)	
Kontrolno polje	3
Kontrolno polje	4
Informacije	5
FCS	. . .
FCS	N-2
Tipična sekvenca 0 1 1 1 1 1 1 0	N-1

Slika 5-26. Polja v splošnem LAPD okvirju.

Mrežni nivo (Q.931)

V tretji nivo oz. *Q.931* spadajo procedure vzpostavljanja, vzdrževanja in rušenja zvez.
Ko želi *TE* vzpostaviti zvezo, pošlje vmesniku sporočilo *SETUP* v informacijskem *LAPD* okvirju. V tem sporočilu so zajeti vsi podatki o klicu. Med temi naj omenim podatek o telefonski številki klicanega, telefonski številki kličočega, tipu izvorne številke, tipu ponorne številke, planu številčenja, referenčni številki klica, predlaganemu *B* kanalu … *NT* v splošnem potrdi klic z okvirjem *SETUP ACK*, v katerem seveda objavi referenčno številko klica, ki ga potrjuje in poleg ostalega pove, če se strinja z dodeljenim *B* kanalom, ali pa predlaga drugega. *CONNECT* (za vzpostavitev povezave), *DISCONNECT* (za rušenje povezave), *ALERTING* (za indikacijo, da klicanemu zvoni telefon), *RELEASE* (za sprostitev linije, t. j. sprostitev vrednosti referenčne številke), *RELEASE COMPLETE* (za potrditev druge strani o sprostitvi linije), ki sicer lahko vsebujejo nekatere dodatne podatke.

5.5 Telefonija preko paketno orientiranih omrežij - VoIP

VoIP (Voice over IP) je tehnologija, ki uporablja Internetni protokol (IP) za prenos govora v obliki paketov preko IP omrežja. Iz takšnega stališča je VoIP storitev možno izvesti preko poljubnega podatkovnega omrežja, ki uporablja IP, kot so Internet, Intranet in lokalna omrežja LAN. Osnovni pristop, ki ga uporablja VoIP storitev, je digitalizacija govornih signalov, njihovo komprimiranje in inkapsulacija v IP pakete, ki se lahko prenašajo preko IP omrežja. Ob tem so potrebni dodatni signalni protokoli, ki se uporabljajo za vzpostavljanje povezav, prekinjanje povezav in nosijo dodatne informacije, potrebne za lokaliziranje uporabnikov in pogajanje o sposobnostih. Osnovna motivacija Internetne telefonije je predvsem povezana z nižjimi stroški, vendar so s tem povezane tudi potrebe po multimedijskih komunikacijah in potrebe po integraciji govornih in podatkovnih omrežij.
Za uspešno razvijanje VOIP storitev je potrebno razrešiti nekatera ključna vprašanja, pri tem nekatera izmed njih izhajajo iz dejstva, da je IP omrežje zasnovano za prenos podatkov.

- Kvaliteta govora – IP omrežje je v sami osnovi oblikovano za prenos podatkov in tako ne ponuja garancije za prenose v realnem času, temveč nudi le storitve v obliki najboljšega truda. Da bi govorne komunikacije preko IP omrežja postale sprejemljive za samega uporabnika, je potrebno zmanjšati zakasnitve in variacije zakasnitev pod neko določeno vrednost praga. Za zagotavljanje kvalitete govora se lahko uporablja pristop izničevanja odmevov (Echo Cancellation), dodajanje višjih prioritet paketom, ki prenašajo govor, in uporaba napredne odprave napak (Forward Error Correction) ter krmiljenje zamašitev.
- Interoperabilnost – V okoljih javnih omrežij se od izdelkov različnih proizvajalcev zahteva nemoteno medsebojno delovanje in ta pogoj je potrebno zadostiti za uspešno širjenje VOIP storitev. Za doseganje interoperabilnosti med opremo različnih proizvajalcev se izdajajo standardi, kjer najbolj splošna standarda za signalizacijo v VoIP predstavljata H323 in SIP.
- Varnost – Problem varnosti v javnem Internetnem omrežju obstaja predvsem iz razloga, da vsakdo lahko zajema pakete v omrežju, ki so bili namenjeni nekomu drugemu. Nekaj dodatne varnostni je možno doseči z uporabo šifriranja podatkov, kjer varnost zagotavlja splošen mehanizem za šifriranje SSL (Secure Socket Layer) in uporabe tunelskih prenosov, kjer se najpogosteje srečujemo s splošnim tunelskim protokolom (Layer 2 Tunneling).
- Integracija z javnim preklopnim telefonskim omrežjem (PSTN) – V času razvoja in razširjanja Internetne telefonije je potrebno delovanje v kombinaciji z obstoječimi javnimi preklopnimi telefonskimi omrežji. Hkrati pa je z vidika uporabnika potrebno

zagotavljati skupno sliko, v kateri javno preklopno telefonsko omrežje in IP telefonsko omrežje nastopata kot enovito omrežje.

- Razširljivost – Znotraj domene Internetne telefonije je veliko raziskovalnega dela namenjenega zagotavljanju enakovredni kvaliteti govora, kot je to v primerih klasičnih telefonskih klicev, vendar za mnogo nižjo ceno. Iz tega razloga obstaja velik potencial za izjemen porast VOIP sistemov, kar hkrati od sistemov zahteva zadovoljivo stopnjo fleksibilnosti za večje tržišče in možnost mešanja privatnih in javnih storitev.

Med najpomembnejše parametre za uspešen razvoj in razširjanje VoIP storitev lahko štejemo interoperabilnost opreme, kjer sta za signalizacijo trenutno predstavljana dva standarda in sicer H.323 (ITU-T priporočilo) in SIP (IETF standard). Priporočila ITU (International Telecommunications Union) H.323 standarda ponujajo tehnične zahteve za govorne komunikacije preko lokalnih omrežij (LAN) s predpostavkami, da znotraj teh omrežij ni predstavljanega zagotavljanja kvalitete storitev (QoS).

H.323 je v osnovi bil razvit za multimedijske konference znotraj lokalnih omrežij in se kasneje razširil na obseg govornih storitev preko IP omrežij. Prva različica standarda je bila izdana leta 1996, medtem ko je druga različica stopila v veljavo leta 1998. Standard obsega tako komunikacije od točke do točke, kot tudi večtočkovne konference. Izdelki in aplikacije različnih proizvajalcev lahko medsebojno delujejo, če upoštevajo H.323 specifikacije. Ob tem se je s strani IETF (Internet Engineering Task Force) razvil SIP (Session Initiation Protocol) protokol, ki je namenjen vzpostavljanju VoIP povezav. Priporočila standarda predstavljajo kontrolni protokol na aplikacijskem nivoju za ustvarjanje, spreminjanje in končevanje sej z enim ali več udeleženci.

Arhitektura SIP je podobna HTTP (odjemalec-strežnik protokol), saj se zahteve ustvarjajo na strani uporabnika in pošiljajo proti strežniku. Strežnik zahteve obdela in proti uporabnikom pošilja odgovore. Zahteva in odgovor na zahtevo tvorita transakcijo, ki vključuje sistemski sporočili za definiranje zanesljivega kanala, preko katerega se lahko pošiljajo klicna kontrolna sporočila. S takšnega vidika SIP zahteva le minimalne predpostavke glede podrejenega transportnega protokola in že sam ponuja zanesljivost ter je tako neodvisen od zanesljivosti TCP. Za usklajevanje in identifikacijo opreme znotraj vzpostavljanja seje se uporablja SDP (Session Description Protocol). Na ta način se terminalom soudeležencev omogoča usklajevanje glede skupnega nabora združljivih tipov prenosnih medijev. Med pomembnejše lastnosti SIP štejemo tudi podporo mobilnosti uporabnikov, ki temelji na uporabi zastopniških strežnikov (proxy) in preusmerjanju zahtev na trenutne lokacije uporabnikov.

Zagovorniki SIP trdijo, da so bile H.323 specifikacije oblikovane predvsem z mislimi na signalizacijo ATM in ISDN omrežij in iz tega razloga H.323 ni

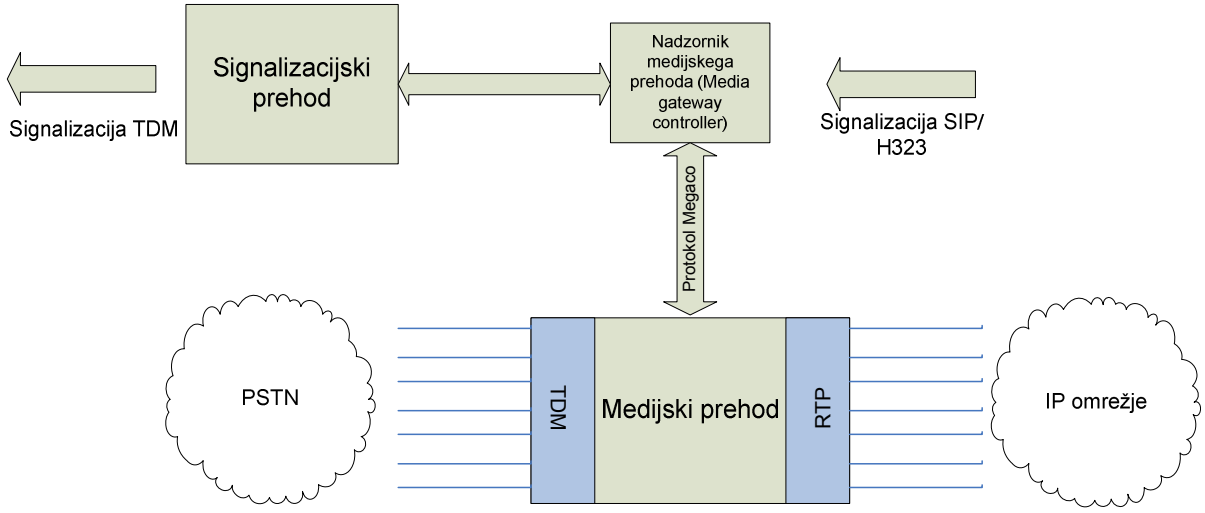
tako primeren za kontrolo govora preko IP omrežij. H.323 je po svoji naravi precej kompleksen, z mnogimi lastnostmi na višjem nivoju, ki so neučinkovite za VOIP storitve. Pri tem pa mu primanjkuje razširljivosti, ki je potrebna za signalni protokol VOIP storitev. V nasprotju, je bil SIP protokol zasnovan z mislimi na Internet in se tako izogiba problemom kompleksnosti in razširljivosti. SIP izrablja večino že definiranih polj paketnih glav, kodirnih pravil, kodov napak in mehanizmov za dokazovanje pristnosti znotraj HTTP. H.323 uporablja binarno zapisana sporočila, medtem ko se pri SIP uporabljajo tekstovna sporočila, ki so podobna HTTP.

H.323	SIP
Kompleksen protokol	Primerljivo preprostejši
Binarna predstavitev sporočil	Tekstovna predstavitev sporočil
Potrebuje polno združljivost nazaj	Ne zahteva polne združljivosti nazaj
Ni visoke modularnosti	Visoka modularnost
Ni visoko razširljiv	Visoka razširljivost
Kompleksno signaliziranje	Preprosto signaliziranje
Velik tržni delež, vendar pada	Podpora IEFT, tržni delež hitro raste
Težavna detekcija zanke	Primerljivo enostavna detekcija zanke

Tabela 5-1. Primerjava signalizacijskih protokolov SIP in H323.

SIP lahko deluje v kombinaciji z RSVP (Resource Reservation Protocol), RTP/RTCP (Real-Time Transport Protocol), RTSP (Real-Time Streaming Protocol), SAP (Session Announcement Protocol) in SDP (Session Description Protocol). RTP/RTCP se uporablja za prenos podatkov v realnem času, RVSP za rezervacijo virov, RTSP za kontroliran prenos podatkovnih tokov, SAP za oglaševanje multimedijskih sej in SDP za opisovanje multimedijskih sej. Ob tem H.323 prav tako deluje v kombinaciji z RTP in RTCP (Real-Time Control Protocol).
V primerjavi obeh protokolov lahko zaključimo, da je H.323 protokol načeloma trenutno bolj razširjen in zajema večji del tržišča, vendar je SIP protokol v prednosti zaradi razširljivosti in preprostosti ter vključevanja RSVP protokola, ki omogoča rezervacijo virov znotraj omrežja in s tem pripomore k povečanju kvalitete storitev.
V praksi se manjši operaterji med sabo povezujejo preko protokola SIP. Tudi povezava do končnih strank se običajno realizira z uporabo protokola SIP. Protokol H323 pa se bolj uporablja pri medoperaterskih povezavah na tranzitu mednarodnega prometa.
Ker je prevladujoča tehnologija v svetu govornih komunikacij še vedno TDM, je potrebno VoIP omrežja marsikdaj povezovati s tradicionalnimi TDM omrežji, bodisi na medoperaterskem nivoju ali pa nivoju stranka-operater. Povezavo izvedemo s pomočjo prehodov (gateway). V večini primerov so prehodi sestavljeni iz dveh delov, in sicer signalnega prehoda in medijskega prehoda. Signalni prehod komunicira z medijskim prehodom preko MGCP (Media Gateway Control Protocol). Največkrat proizvajalci

prehodov združijo medijski in signalizacijski prehod v eno napravo, ki jo največkrat napačno poimenujejo kar »Media gateway«, čeprav v osnovi združuje tako signalizacijski, kot tudi medijski prehod. V tem primeru lahko medijski in signalizacijski prehod komunicirata preko nestandardnega protokola, ki ga definira proizvajalec opreme.
Splošna shema prehoda je prikazana na sliki 5-27.



Slika 5-27. Shema medijskega in signalizacijskega prehoda.

6.1 Medomrežno povezovanje med operaterji

Medomrežno povezovanje je zelo pomembni dejavnik v uspešnosti poslovanja novega operaterja. Preden se prične snovati strategija dogovarjanja in način izvedbe medomrežnega povezovanja z domačimi in tujimi operaterji je potrebno pregledati nekaj zadev, ki pomembno vplivajo na odločitve.

Tehnologija priklopa medomrežnih povezav je pred prihodom alternativnih ponudnikov bila strogo na strani TDM-TDM povezav, z uporabo signalizacije št. 7 (SS7).

S prihodom VoIP tehnologije se je v svetu pričelo pojavljati vse več podjetij, ki na osnovi te tehnologije ponuja cenejše mednarodne povezave. Kljub temu, je način povezovanja dostikrat še vedno TDM-TDM z uporabo VoIP-TDM vmesnikov (gateway).

Naslednji korak v evoluciji so pravi alternativni operaterji na VoIP tehnologiji, ki pa se lahko povezujejo tudi direktno v VoIP-VoIP tehniki, kar pomeni čisto ethernet medomrežno povezavo (in ne več SDH in n x E1). Takšen način prinaša prednosti (lažja implementacija med VoIP centralami, cenejša oprema in lažji nadzor) ter tudi nekaj slabosti, na

katere je potrebno biti previden (predvsem na kvaliteto same povezave in zajamčeno bitno hitrost – pasovno širino povezave v smislu zagotavljati minimalnih pogojev QoS).
Kadar med dvema operaterjema ni predvidena dovolj velika količina izmenjanega prometa, da bi bilo direktno medomrežno povezovanje (bodisi VoIP ali TDM) ekonomsko upravičeno, se lahko operater posluži tranzita prometa preko nekega operaterja, s katerim je medomrežno povezan. V tem primeru sklenejo vsi trije operaterji tripartitno pogodbo o tranzitu prometa. Operater, preko katerega se promet tranzitira tovrstno storitev seveda obračuna.
Običajno operater sklene pogodbo o medomrežni povezavi preko protokola SS7 z enim operaterjem (največkrat je to nacionalni operater Telekom Slovenije), z ostalimi pa bodisi tripartitno pogodbo za tranzit ali pa medomrežno povezavo preko VoIP, odvisno od tehničnih zmožnosti in ekonomske upravičenosti medomrežne povezave.

6.2 Prenosljivost številk

6.4.1 Splošno o prenosljivosti številk

Prvi odstavek tretjega člena zakona o prenosljivosti številk pravi, da so vsi operaterji dolžni prilagoditi svoja omrežja, tako da slednja omogočajo prenosljivost številk, ter jih razvijati in izboljševati v skladu z naraščanjem števila prenesenih številk.
Če torej želimo načrtovati in izgraditi sistem, ki ustreza vsem zakonom v Republiki Sloveniji, je potrebno prenosljivost številk podpreti.
Za izmenjavo podatkov o prenesenih številkah med lokalnimi bazami prenesenih številk (LBPŠ) se uporablja centralna baza podatkov (CBP).
Centralna baza podatkov vsebuje vse prenesene številke, številke za usmerjanje klicev na prenesene številke in transakcije med operaterji (imena operaterjev dajalcev številk in operaterjev prejemnikov številk, datume prenosov številk, obvestila o statusu procesa prenosa številk).
Za vzpostavitev, razvoj, vzdrževanje in upravljanje centralne baze podatkov je odgovoren upravljavec centralne baze podatkov. Upravljavec centralne baze podatkov je odgovoren za pravočasno ažuriranje podatkov. Trenutno je v Republiki Sloveniji le en ponudnik centralne baze podatkov. Trenutno se v Republiki Sloveniji med operaterji vsak dan prenese med 500 in 1000 telefonskih številk, pri čemer je največji donor številk nacionalni operater Telekom Slovenije.
Vsakemu operaterju v Republiki Sloveniji je s strani agencije za radio, pošto in telekomunikacije (APEK) dodeljena posebna unikatna štirimestna številka, ki operaterja enoznačno identificira. To številko imenujemo NRN (Network Routing Number). Vsaka dodeljena telefonska številka v Republiki Sloveniji tako vedno pripada nekemu NRN, na podlagi katerega si operaterji potem usmerjajo promet. V posebnih primerih se lahko enemu operaterju dodeli tudi več NRN številk, in sicer takrat ko uporabnik

npr. opravlja storitve fiksne in mobilne telefonije. V tabeli 2 so prikazane NRN številke vseh trenutno registriranih slovenskih operaterjev.

Company	Code
AKTON d.o.o.	9818
AMIS d.o.o.	9812
DEBITEL d.d.	9803
IN.LIFE, d.d.	9816
IT tel d.o.o.	9808
IZI MOBIL d.d.	9817
Ljubljanski kabel d.d.	9807
MEGA M, d.o.o., Velenje	9804
Mobitel d.d.	9800
Mobitel d.d.	9809
SI.MOBIL d.d.	9801
SINFONIKA d.d.	9813
SOFTNET d.o.o.	9815
STELKOM d.o.o.	9810
T - 2 d.o.o.	9806
T - 2 d.o.o.	9814
TELEING d.o.o.	9819
Telekom Slovenije d.d.	9811
TUŠ TELEKOM d.d.	9805
TUŠMOBIL d.o.o.	9802
UPC TELEMACH d.o.o.	9820

Tabela 5-2. NRN številke slovenskih operaterjev.

Kot je omenjeno že zgoraj, je potrebno pri usmerjanju prometa poskrbeti za hitrost. Čas vsakršne poizvedbe je kritičnega pomena in mora biti minimiziran, kolikor je to mogoče. Klici se lahko usmerjajo po dveh metodah, in sicer »Query on Release« ali »All Call Query«.
Metoda »Query on Release« je metoda usmerjanja klicev na prenesene številke, pri kateri izvorno omrežje pred vzpostavljanjem vsakega klica pošlje zahtevo za vzpostavitev klica proti komunikacijskemu omrežju operaterja, kateremu je bila številka dodeljena. Če telekomunikacijsko omrežje operaterja, kateremu je bila dodeljena številka, sprejme signalizacijsko zahtevo za vzpostavitev klica na številko, ki je prenesena v neko drugo komunikacijsko omrežje, zavrne zahtevo za vzpostavitev klica na način, ki je določen s Priporočilom ITU-T Q.850. Po sprejemu signalizacijskega sporočila z vzročno vrednostjo # 14 (SS7 Release cause value # 14) izvorno omrežje izvrši povpraševanje v lastni lokalni bazi prenesenih številk in na osnovi številke za usmerjanje, pridobljene iz lastne lokalne baze, vzpostavi klic direktno v omrežje, v katerem se nahaja prenesena številka.
»Metoda All Call Query« je metoda direktnega usmerjanja klicev na prenesene številke, ki temelji na IN-inteligentnem omrežju in kjer izvorno omrežje z namenom ugotovitve, če je klicana številka prenesena, pred vzpostavljanjem vsakega klica izvrši povpraševanje v lastni lokalni bazi

prenesenih številk (LBPŠ). V primeru, da je klicana številka prenesena, izvorno omrežje na osnovi številke za usmerjanje, pridobljeni v LBPŠ, vzpostavi klic direktno proti omrežju, kjer se prenesena številka nahaja. V primeru, da številka ni prenesena, izvorno omrežje vzpostavi klic direktno z omrežjem, kjer se nahaja klicana številka.
V začetku uvedbe obvezne prenosljivosti številk se je uporabljala metoda »Query on Release«, pred nedavnim pa je bil sprejet zakon, ki nalaga vsem operaterjem uporabo metode »All Call Query«.
Možna sta dva dostopa do LBPŠ, in sicer preko imeniške strukture LDAP ali preko domenskega sistema ENUM. Operater si lahko izbere ali želi v svoji lokalni bazi celotno bazo vseh številk v Republiki Sloveniji (teh zapisov je približno 100 milijonov) ali pa samo tiste ki so bile prenesene. Zaradi velike količine podatkov se pri prvem ponavadi uporablja ENUM, pri drugem pa bodisi LDAP ali pa ENUM.

6. Navigacijski sistemi

6.1. Od kamnov do satelitov

6.1.1. Kamena doba

Kje sem? Kako pridem do mojega cilja? To so vprašanja, ki so stara kot je staro človeštvo.
Ljudje so že od nekdaj identificirali in si zapomnili referenčne točke na podlagi katerih so se lahko orientirali na poti skozi gozdove, puščave, gore, … Puščali so kamne, označevali so drevesa, za referenco so vzeli gore, hribe. To so bili prvotni, osnovni načini navigacije.

6.1.2. Zvezdna doba

Identificiranje referenčnih točk je bila preprosta in uporabna na kopnem. V celoti pa je odpovedala, ko so ljudje začeli raziskovati morja in oceane. Stran od kopnega so bili za navigacijo na voljo samo nebesna telesa: zvezde, sonce in luna. Postali so torej *»referenčne točke«* in doba navigacije z uporabo nebesnih teles se je pričela.
Navigacija z uporabo nebesnih teles je bila prva resna rešitev problema določanja pozicije na neznani lokaciji, kjer so bile na voljo le referenčne točke sonce, luna in zvezde. Relativna pozicija sonca, lune in zvezd ter njihova geometrijska pozicija je različna glede na različne lokacije na Zemlji.
Z opazovanjem postavitve zvezd lahko ugotovimo svojo lokacijo na Zemlji in določimo smer, v katero se moramo gibati, da bomo dosegli svoj cilj.
Veliki voz, Mali voz, Kasiopeja, to so primeri postavitve zvezd. Vidimo jih drugače iz različnih lokacij opazovalca na Zemlji.

Natančneje kot s prostim očesom lahko opazujemo konstelacijo nebesnih teles s posebnimi instrumenti. V tem času so bili razviti posebni instrumenti, ki so bili namenjeni merjenju kotov, pod katerimi opazovalec vidi zvezde s svoje pozicije. Tako izmerjeni koti so bili osnova za določanje pozicije opazovalca. V tem časovnem obdobju so bile razvite tudi karte, ki so za določeno pozicijo navajale vnaprej izračunane kote. S tem so bili opazovalcu olajšani vsakokratni zapleteni izračuni.

Proces merjenja kotov med zvezdami z optičnimi instrumenti je bil časovno potraten in nenatančen. Čez dan, ko zvezde niso bile vidne, je bil neuporaben. Če je bilo nebo oblačno, je bil sistem prav tako neuporaben. Izračunane lokacije in lokacije pridobljene na podlagi vnaprej preračunanih kart so bile natančne le na nekaj kilometrov.

Slika 6-1. Sekstant.

Kalkulacija je bil preprost proces geometrije triangulacije, pri katerem so bile zvezde znane referenčne točke, meritev kotov med njimi in opazovalcem pa bi rešile pripadajoči sistem enačb in tako določile neznanko: pozicijo opazovalca.
Triangulacija bi bila dosti preprostejša, če bi bilo možno izmeriti tudi razdaljo do zvezd. Tako bi razdalja nadomestila kote in enačbe bi bile preprostejše. Vendar pa vemo, da to ni bilo mogoče.

Navigatorji so imeli zapleteno nalogo vsakokratnega računanja lokacije. Sanjali so o napravah, ki bi jim olajšale delo in določale pozicijo natančneje in z manj napora. Ideje so bile, da bi naredili napravo, ki bi znala na podlagi meritve kotov hitro in avtomatično izračunati lokacijo. Te sanje so postale resničnost šele takrat, ko so v sistem navigacije bili vključeni radijski signali oz. elektromagnetno valovanje.

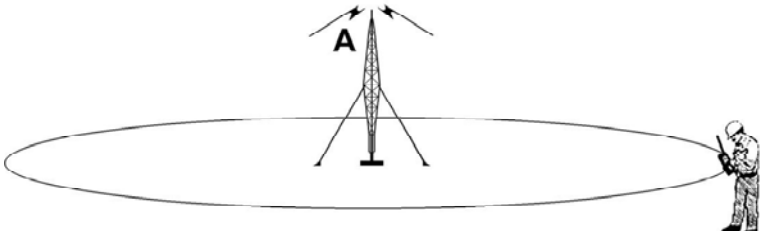
6.1.3. Radijska doba

Nekje v sredini prejšnjega stoletja so znanstveniki odkrili način merjenja razdalje z uporabo radijskih signalov. Koncept je bil takšen, da so merili čas, ki ga signal potrebuje, da prepotuje razdaljo od točke A do točke B, pri čemer so poznali hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja, t.j. približno 300.000 km/s. Ker ena mikrosekunda pomeni kar 300 metrov napake pri pozicioniranju, je natančnost meritve časa potovanja valovanja zelo pomembna. Za natančno pozicioniranje zahtevamo, da je sprejemnik

sposoben meriti čas natančneje od ene milijoninke sekunde, še bolje pa od ene milijardinke sekunde (ene nanosekunde).

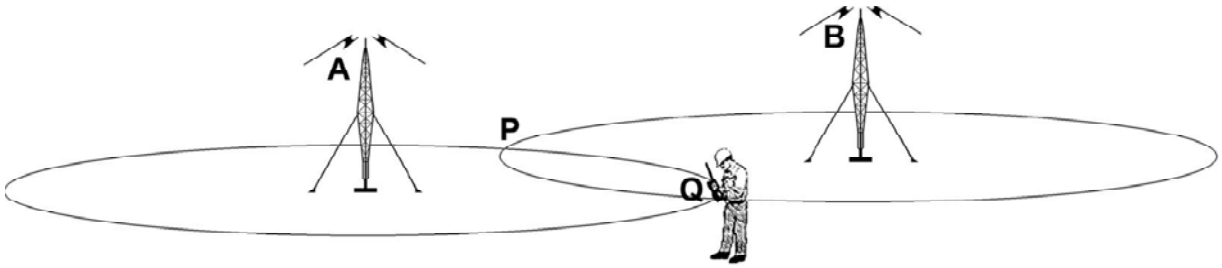
Kako lahko sistema radijskega oddajnika in sprejemnika uporabimo za določanje lokacije?

Privzemimo, da je oddajnik lociran v točki A, za katero poznamo natančno lokacijo. Prav tako imamo poseben sprejemnik, ki zna sprejemati signal, ki ga oddaja oddajnik v točki A in meriti razdaljo do točke A, torej do oddajnika. Natančna lokacija točke A je sprogramirana v našem sprejemniku. Smo na neznani lokaciji. Vključimo sprejemnik in dobimo podatke, da smo oddaljeni od oddajnika 12.345 m. Ta podatek nam sicer ne pove kje smo, pove pa nam to, da je naša pozicija nekje na krožnici za radijem 12.345 m in središčem v točki A. Sistem prikazuje slika 2.



Slika 6-2. Merjenje razdalje od oddajnika.

Zdaj privzemimo, da je drugi oddajnik lociran v točki B. Isti sprejemnik, kot ga uporabljamo že za merjenje razdalje do točke A nam sedaj izmeri tudi razdaljo do točke B. Ta znaša 8.293 metrov. To nam pomeni, da smo locirani nekje na krožnici s središčem v točki B in radiem 8.293 m. Zdaj že imamo dve informaciji. Oddaljenost od točke A in oddaljenost od točke B. Naša lokacije ja torej nekje na presečišču obeh krožnic. Na sliki 3 ju označimo s točkama P in Q.



Slika 6-3. Z merjenjem razdalje do dveh oddajnikov imamo samo dve varianti za našo pozicijo.

Če bi izmerili če razdaljo do oddajnika C, bi imeli natančno informacijo o naši lokaciji.
Zdaj si lahko zamislimo kako naš sistem deluje. Vključimo naš specialni sprejemnik, ki hitro izračuna razdalje do vseh treh oddajnikov, A, B in C in nam izračuna našo lokacijo.

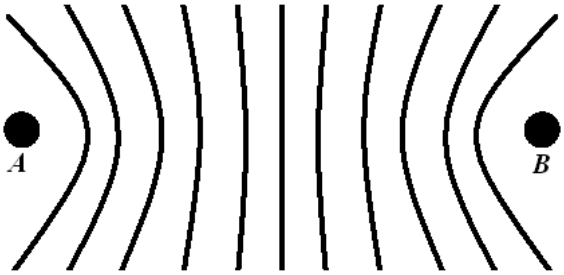
Oddajnike A, B in C skupaj imenujemo *veriga oddajnikov*. Veriga lahko ima 4 ali celo več oddajnikov, z večanjem števila oddajnikov pa dosega boljšo pokritost. Doseg tovrstnega radijskega oddajnika pa je lahko približno 500 km.

Navigacijski sistemi, ki delujejo po zgoraj opisanem principu se imenujejo radijski navigacijski sistemi.

6.1.4. Doba LORAN-a

LORAN (ang. LOng RAnge Navigation) pomeni Navigacija dolgega dosega.
LORAN je zemeljski navigacijski sistem, ki uporablja radijske oddajnike nizkih frekvenc. Pred razširitvijo GPS sistema je bil glavni tovrstni sistem za pomorstvo. Trenutna različica LORAN-a v splošni rabi je sistem LORAN-C.

Osnova sistema je zasnovana na principu časovne razlike med sprejemom signalov dveh radijskih oddajnikov. Podano konstantno časovno razliko lahko predstavimo s hiperbolo položaja (LOP). Če poznamo položaj oddajnikov, katerih signala sta sinhronizirana, lahko ugotovimo, da je položaj sprejemnika nekje na določeni hiperboli, kjer je časovna razlika med sprejetima signaloma konstantna. V idealnih pogojih je ta sorazmerna z razliko razdalj med oddajnikom in vsako od postaj.



Slika 6-4. Razlika med časom sprejema sinhroniziranih signalov iz radijskih postaj A in B je konstantna na vsej hiperbolični krivulji.

Dvodimenzionalni položaj s samo dvema postajama ne more biti določen, zato moramo isti postopek izvesti še enkrat, vendar z uporabo časovne razlike med drugim parom postaj.
Zemljepisni položaj je tako določen s presečiščem obeh hiperbol.

V primeru LORAN-a ostaja ena postaja v obeh postopkih konstantna - primarna (master), ki se ločeno povezuje s sekundarnima (slave)

postajama. Eno krivuljo določa časovna razlika (TD - Time Difference) med primarno in prvo sekundarno postajo, drugo pa časovna razlika med primarno in drugo sekundarno postajo. Presečišče krivulj določa zemljepisno točko v odnosu do položajev treh postaj. Te krivulje pogosto označujemo kot TD-črte (TD lines)

V praksi LORAN deluje v strnjenih območnih poljih, oziroma verigah, ki jih sestavlja vsaj ena primarna in najmanj dve sekundarni postaji (pogosto več), z enotnim GRI (Group Repetition Interval) - skupinskim intervalom ponavljanja, določenim v mikrosekundah. Glavna postaja odda zaporedje signalov in se pred oddajanjem naslednjega zaporedja za določen čas ustavi.

Sekundarne postaje sprejmejo ta signal, počakajo prednastavljeno število milisekund (sekundarni zamik kodiranja) in nato oddajo signal odgovora. V dani verigi je vsak sekundarni zamik kodiranja različen, kar omogoča ločitev med signali različnih sekundarnih postaj, vendar se sodobni sprejemniki ne zanašajo na ta postopek identifikacije.

Slika 6-5. Oddajnik LORAN na Floridi, ZDA.

Vsaka veriga LORAN v svetu uporablja drugačen GRI - skupinski interval ponavljanja, ki ga predstavlja število mikrosekund, deljeno z 10 (v praksi so zamiki večkratniki 100 mikrosekund), po katerih pogosto označujemo posamezne verige, npr. GRI 9960, oznaka za verigo na severovzhodu ZDA.

Vse svetovne delujoče verige LORAN pokrivajo le majhen del zemeljske površine. Z njimi upravljajo lokalne vlade in so večinoma postavljene v bližini obalnih pasov z visokim deležem ladijskega prometa.
LORAN je bil velik napredek za radijsko navigacijo.
Kljub temu ima precej pomanjkljivosti, npr:

- Pokritost s signalom je omejena na največ 5% zemeljske površine
- Sistem LORAN oddaja signale samo p vzporedno s površino zemeljske oble in je tako primeren le za dvodimenzionalno navigacijo (zemljepisna širina in dolžina). Ne more pa dati informacije o višini, kar bi npr. bilo potrebno za navigacijo letal.

Natančnost sistema LORAN je omejena na približno 250 m.

6.1.5. Doba satelitske navigacije

Da lahko premagamo te omejitve, je bilo potrebno izdelati radijsko-navigacijske sistema, ki imajo oddajnike locirane na satelitih. Sateliti krožijo v orbitah na velikih višinah okrog Zemlje. S tem pridobimo veliko področje pokrivanja s signalom. Koncept je podoben kot ga poznamo v primeru prizemnih sistemov televizijske radiodifuzije in tovrstnih satelitskih sistemov. S prizemnim sistemom lahko sprejemate lokalni televizijski program le na teritoriju večjega mesta, satelitski oddajnik televizijskega programa lahko spremljate na celotnem področju npr. Evrope.
Signal navigacijskega satelita lahko pokrije precej velik del zemeljske površine, signali več navigacijskih satelitov lahko pokrijejo površino celotnega planeta.

Teorija v ozadju delovanja satelitske navigacije je podobna tisti v prizemnih sistemih radijske navigacije. V prizemeljskih sistemih so oddajni stolpi naše referenčne točke. Locirani so na Zemlji in razdalja do njih nam da dvodimenzionalnoen podatek o naši lokaciji,(zemeljska širina in dolžina) tako, da izračunamo presečišča krožnic.
Pri satelitskih sistemih so sateliti naše referenčne točke. Z merjenjem razdalje do naših satelitov lahko dobimo tridimenzionalen podatek o naši lokaciji (zemljepisna širina in dolžina in pa višina - X, Y, Z). Dobimo jih tako, da poiščemo presečišča več sfer.

V prizemnih sistemih so lokacije oddajnikov fiksne in jih natančno poznamo. Pri satelitskih sistemih pa sateliti krožijo okrog Zemlje po natančno določenih orbitah. V vsakem trenutku je lokacija satelita znana in sateliti imajo mehanizme kako svojo natančno lokacijo sporočiti sprejemnikom. Natančnost pozicioniranja s pomočjo satelitov je tako tudi odvisna od natančnosti sporočene pozicije satelitov v danem trenutku.
Kroženje satelitov in njihove orbite ves čas spremlja več nadzornih centrov na Zemlji. Ti tudi skrbijo, da so sateliti v orbitah znotraj predpisanih mej odstopanja. Organizacije znajo napovedati položaj satelita v točno določenem času v prihodnosti za nekaj dni vnaprej. Te napovedi nadzorni centri sporočajo satelitom, ki jih potem naprej posredujejo sprejemnikom. Sporočanje pozicije je del protokola, ki ga sateliti uporabljajo v svojih vzorcih, ki jih oddajajo.

Ko gre za navigacijo s pomočjo satelitskih sistemov, se ponovno oziramo v nebo. Tokrat gledamo naprave, ki jih je tja poslal človek in ne več naravnih nebesnih teles. Za razliko od merjenja kotov med napravami tukaj merimo radijske signale, ki nam s pomočjo ustreznega protokola omogočajo merjenje razdalj do referenčnih točk.

Eden prvid satelitskih navigasijskih sistemov je bil Tranzit. Izkušnje, ki jih je prinesel Tranzit in ostali podobni eksperimentalni sistemi so omogočile razvoj trenutnih sistemov, GPS (Global Positioning System), GLONASS (GLObal Navigation Satellite Systems), Gallileo, …

6.2. Navigacijski sateliti

V prejšnjem podpoglavju smo ugotovili da kadar lahko izmerimo razdalje do več satelitov za katere poznamo lokacije, iz njih lahko izračunamo našo lokacijo. Za to morajo biti izpolnjeni trije predpogoji:

1. **Sateliti** – za naše referenčne točke potrebujemo satelite, do katerih lahko merimo razdalje. V vsakem trenutku moramo vedeti natančno lokacijo vsakega satelita.
2. **Koordinatni sistem** – kako bomo določili in zapisali lokacijo satelita in kako bomo določili in zapisali našo lokacijo? Kot se spomnimo iz matematike, bomo za to potrebovali ustrezen koordinatni sistem.
3. **Merjenje razdalj** – kakšen tip elektronskih signalov morajo sateliti oddajati, da bomo lahko z merjenjem teh signalov merili razdalje? Kako jih bomo merili in kako natančno jih bomo merili? Zanima nas tudi kako natančnosti pri merjenju teh signalov vpliva na natančnost izračunane lokacije.

6.2.1. Merjenje razdalj do satelitov

Čas pomeni razdaljo

Med nevihto lahko večkrat opazujemo kako zvok grmenja zaostaja za svetlobo bliska. Razlog je v dejstvu, da potuje svetloba mnogo hitreje kot zvok. Našo oddaljenost od nevihte lahko hitro izračunamo tako, da merimo čas med bliskom in grmenjem ter ga pomnožimo s hitrostjo zvoka. Hitrost zvoka v zraku je približno 344 m/s. Če je med bliskom in grmenjem minilo 3 sekunde, to pomeni, da je naša oddaljenost od nevihte 3s x 344 m/s = 1032 m ali približno 1 km. V tem primeru torej izračunamo razdaljo do objekta z meritvijo časa, ki ga signal potrebuje, da pripotuje do nas.
V tem primeru je čas bliska tudi čas nastanka zvočnih valov. Tako nam svetlobni signal pomeni tudi start, trenutek, ko moramo začeti meriti čas do trenutka ko zaslišimo zvok.
Kaj pa v primeru, da nimamo takšnega začetnega signala? Poglejmo si naslednji primer.

Kode in vzorci

Vzemimo za primer, da vaš prijatelj stoji na koncu velikega polja in neprenehoma glasno šteje od 1 do 10 s hitrostjo ene številke na sekundo. 10 sekund tako traja poln cikel štetja od 1 do 10. Privzemimo, da vi stojite na drugem koncu polja in počnete natanko isto. Štejete naglas od 1 do 10. Privzemimo tudi, da imata oba zelo natančni in med sabo usklajeni uri in da sta začela šteti ob natanko istem času. Ker zvok potuje z določeno hitrostjo, vi pa ste od prijatelja oddaljeni, boste števila, ki jih kliče prijatelj slišali z določenim zamikom. Če tako slišite prijateljevo štetje z zamikom 1 sekunde glede na vaše, to pomeni, da je vaš prijatelj od vas oddaljen 344m (1s x 344m/s = 344m).

Če se zdaj dogovorita, da bosta štela dvakrat hitreje (dve številki na sekundo), bi ista razdalja pomenila, da slišite prijatelja z zamikom dveh števil. V tem primeru pomeni ena številka razdaljo 172m, vsaka številka pa pomeni 0,5 sekunde. Če bi lahko šteli 100 krat hitreje, bi vsaka številka pomenila 0,01 sekundo in vsaka številka bi pomenila razdaljo 3,44m. Seveda bi v realnosti potrebovali ustrezne naprave in inštrumente, da bi lahko s takšno hitrostjo sprejemali in generirali zvočne signale.

Zdaj privzemimo, da ste od prijatelja precej oddaljena in da štejeta zelo hitro, recimo 0,01 sekundo (vsak razmak med številkama pomeni 3,44m) in kot prej oba neprenehoma štejeta od 1 do 10. Recimo da slišite prijatelja, da reče 5 ravno takrat ko vi rečete 7. Slišite razliko2 števil, ampak veste, da je razdalja med vama več kot 6,88m. To je zato, ker je zamik ni samo 2 števili, ampak 2 števili plus nekaj večkratnikov števila 10 (nekaj večkratnikov *cikla vzorca*). To je enako kot na primer, če je vaš meter, s katerim merite razdaljo, prekratek, in nato izmerite razdaljo kot nekajkratnik maksimalne dolžine metra plus nek manjši del metra.

Neznani večkratnik vzorca cikla imenujemo »*neznano celo število*«.

Če bi zdaj vi in vaš prijatelj namesto od 1 do 10 štela od 1 do 1000, bi lahko slišala zamik 212 števil med številko, ki jo slišite in številko, ki jo v tistem trenutku izgovarjate. To bi pomenilo 212 števil krat 3,44 je 729,28 metrov. To bi pomenilo 21 polnih ciklov vzorca od 1 do 10 plus dve števili. Število polnih ciklov – 21 – ki ga z našim kratkim vzorcem od 1 do 10 nismo mogli zaznavati imenujemo sedaj neznano celo število.

Kar smo želeli prikazati v prejšnjem odstavku je koncept ***resolucije vzorca*** oz. finosti označb na merilnem traku in ***dolžine vzorca*** oz. dolžine našega merilnega traku..

Vse kar smo opisovali doslej deluje po enakem principu kot merjenje razdalje do satelitov, le s to razliko, da sateliti oddajajo elektronske vzorce. Prav tako sprejemnik generira enake elektronske vzorce in jih primerja s tistimi, ki jih sprejema od satelitov. Na ta način meri razdaljo do satelitov.

Navigacijski sateliti generirajo dva tipa vzorcev. Eden ima granulacijo približno 1 mm in dolžino približno 20 cm. Drugi ima granulacijo približno 1 meter in praktično neomejeno dolžino. Prvega imenujemo **Nosilec – »Carrier**«, drugega pa imenujejo **Koda – »Code**«. Razdalja, ki jo merimo z nosilcem, se imenuje **Faza Nosilca** oz. »Carrier Phase«, razdalja izmerjena s kodo pa se imenuje **Faza Kode** »Code Phase«. Ker je vzorec kode dolg, so meritve faze kode kompletne, končne in ne vsebujejo neznanega celega števila. Tako lahko na primer izmerimo razdaljo do satelita npr. 12.345.678 metrov. Po drugi strani pa je vzorec nosilca kratek in ima veliko neznano celo število. Lahko bi rekli, da je naša razdalja do satelita 18.7 centimetrov plus neko neznano celo število ciklov nosilca. V tem primeru je neznano celo število ranga nekaj deset milijonov. Če to neznano število ostane neznano, si z meritvijo ne moremo kaj dosti pomagati pri določanju naše lokacije.

Problem neznanega začetnega celega števila (Integer Ambiguity**)**
Vrnimo se k primeru s kratkim vzorcem iz prejšnjega podpoglavja, ko sta s prijateljem stala na polju in štela od 0 do 10. Sedaj stojita drug poleg drugega in začneta šteti od nič. Razdalja med vama je 0. Nato se prijatelj začne oddaljevati. Razlika med števili se povečuje in ko doseže 9, pade nazaj na 0. Ampak to je v resnici 10 in ne 0. Ta ničla pomeni en celoten cikel vzorca. To sedaj vemo zato, ker smo štetje in oddaljevanje spremljali od vsega začetka. Ves čas, ko se prijatelj oddaljuje dodajamo cikle in v tem primeru je naše celo število ciklov znano in problema neznanega celega števila zato nimamo.
V primeru, da začneta štetje na neznani razdalji, začneta z neznanim celom številom ciklov. Zdaj se ali približujeta drug drugemu ali pa se oddaljujeta drug od drugega, v obeh primerih število polnih ciklov odvzemamo ali pa dodajamo **neznanemu začetnemu celemu številu** ciklov. Ves čas v tem primeru je neznano začetno celo število isto. To velja dokler vaju ves čas spremljamo. Če pa sled izgubimo in začnemo štetje spremljati znova, pa dobimo seveda novo neznano začetno celo število.
Koncept kode in nosilca je zelo pomemben. Za boljše razumevanje si poglejmo še en primer analogije. Faza Kode je kot ura, ki ima samo kazalec, ki kaže ure. Kadarkoli lahko pogledate na to uro in približno veste koliko je ura.
Faza nosilca pa je kot ura, ki ima samo sekundni kazalec. Pretečeni čas lahko sledite do sekunde natančno, ampak le v primeru, da natančno spremljate koliko polnih minut je preteklo. Če lahko nekako ugotovite število polnih začetnih minut (to je neznano začetno celo število minut v trenutku, ko ste uro začeli spremljati), potem lahko sledite času zelo natančno. Če izgubite pozornost in izgubite sled o številu pretečenih minut, potem imate ponovno novo neznano začetno celo število, ki ga morate nekako ugotoviti. S fazo kode, uro samo z urnim kazalcem, lahko vedno takoj dobite čas v dnevu, vendar le približno z 10 minutno natančnostjo. Dosežete jo tako, da približno ocenite lokacijo kazalca na uri.

To vam določanje neznanega začetnega celega števila zmanjša le na plus minus nekaj (celih) minut.
Opazimo, da med urnim in sekundnim kazalcem manjka minutni. Vmes je vrzel.

Pri razvoju GPS sistema je bila posebna pozornost namenjena temu, kako meritev izvesti čim hitreje in čimbolj natančno. Zato je sistem zasnovan tako, da obstaja vrzel med fazo kode in fazo nosilca, ampak sta oba izbrana tako, da se vrzel zmanjša čimbolj učinkovito.
Neznano celo število lahko hitro določimo tako, da spremljamo satelite nekaj časa. Ko je celo število določeno, je pomembno, da stalno sledimo fazi nosilca. Lahko se zgodi, da zaradi šuma, motenj ipd. za kratek čas izgubimo sled in izgubimo celo število ciklov ali pa celo več. Ta pojav v GPS terminologiji imenujemo zdrs cikla **– »Cycle Slip«.**
To nam lahko opvzroči precejšnjo napako v meritvi. Ampak večino GPS sprejemnikov ima implementirano tehniko, ki detektira tovrstne zdrse in jih popravi.

Glede na teoretično zasnovo sistema in izbrane signalizacije lahko v sistemu GPS merimo razdalje do satelitov z natančnostjo 1 metra s fazo kode in 1 milimeter s fazo nosilca. To ne pomeni, da lahko določamo pozicijo GPS sprejemnika za natančnostjo 1 metra oz. 1 milimetra. Razlog temu je precej dejavnikov, ki v sistem vnašajo napake in nenatančnosti meritve. Natančneje jih bomo opisali v naslednjem podpoglavju.

6.3. Viri napak

V prejšnjih podpoglavjih smo predpostavljali, da sta uri oseb na nasprotnih koncih polja sinhronizirani, osebi pa sta štetje začeli hkrati. Če predpostavimo, da ena ura prehiteva ali zaostaja za drugo za eno sekundo, se bo to poznalo kot 344 m napake pri izmerjeni razdalji saj v eni sekundi zvok prepotuje 344 metrov. Če merimo razdaljo s pomočjo satelitov, prepotuje elektronski signal v eni sekundi 300.000.000 metrov (hitrost svetlobe). Napake v satelitski uri in uri sprejemnika torej znatno prispevajo k napaki izmerjene razdalje.

6.3.1. Satelitska ura

Ena miljardinka sekunde (ena nanosekunda) nenatančnosti satelitske ure prispeva 30 cm napake v merjenju razdalje do tega satelita, zato so sateliti opremljeni z izredno natančnimi cezijevimi atomskimi urami. Tudi te, sicer izredno natančne ure pridelajo približno eno milijardinko sekunde vsake tri ure. Za kompenzacijo teh napak so sateliti nenehno nadzorovani

iz zemeljskih postaj, satelitske ure pa so primerjane z glavnim časovnim nadzornim sistemom, ki ga sestavlja deset izredno natančnih atomskih ur. Napake satelitskih ur se nenehno izračunavajo, poročilo o njih pa je del sporočil, ki jih oddajajo sateliti. GPS sprejemniki odštevajo napake satelitske ure od posredovanih oddajnih časov, da dobijo pravilen čas potovanja signala.

Kljub velikemu trudu kontrolnih centrov, da opazujejo obnašanje vsake satelitske ure, je nemogoče povsem natančno ugotoviti napake ur v satelitih. V praksi je vsota vseh napak ure nekaj nanosekund, kar se pri merjenju razdalje odraža kot napaka približno en meter.

6.3.2. Ura v sprejemniku

Enako kot pri satelitskih urah, se tudi napaka v uri GPS sprejemnika odraža v merjenju razdalje. Problem pa je, ker v GPS sprejemnike ne moremo vgraditi zelo natančnih atomskih ur, saj vsaka atomska ura tehta več kot 20 kilogramov, stane več kot 50.000,00 USD in zahteva pazljivo rokovanje ter temperaturno kontrolo.
Predpostavimo, da ima ura v sprejemniku napako eno milisekundo, kar povzroči napako v izmerjeni razdalji približni 300.000 metrov. Če merimo razdaljo do satelitov ob natančno istem času, potem je sprejemnik izmeril enako napako v razdalji (300.000 metrov) do vseh satelitov. Napako v uri sprejemnika lahko torej obravnavamo kot neznanko, ki jo moramo ugotoviti. V prejšnjih podpoglavjih smo ugotovili, da nam lokacijo določajo tri neznanke (X, Y in Z). Če dodamo tem trem neznankam še novo neznanko, imamo namesto treh štiri neznanke, torej poleg treh, ki nam povedo lokacijo še četrto, ki je napaka sprejemnikove ure. Za določitev štirih neznank, potrebujemo torej štiri enačbe. Meritev razdalje do štirih satelitov, nam da vse štiri potrebne enačbe. Namesto treh satelitov potrebujemo sedaj štiri, vendar pa zato ne potrebujemo drage in nepraktične atomske ure v našem GPS sprejemniku.
Vedeti pa moramo, da je koncept napake ure kot ene neznanke veljaven le, kadar merimo razdaljo do satelitov ob natančno istem času. Če temu ni tako, potem imamo za vsako meritev različno uro.
S hkratnimi meritvami razdalje do štirih satelitov ne izračunamo le treh kordinat naše pozicije, pač pa tudi ugotovimo napako ure v sprejemniku z zelo dobro natančnostjo. Tipična ura ima vsako sekundo približno 1000 ns pogreška, toda uro sprejemnik lahko sedaj prilagajamo natančni GPS uri, kar nam naredi iz navadne ure natančno atomsko uro. Sprejemniki popravljajo uro vsako sekundo in zagotavljajo natančno uro tudi za zunanje uporabnike. Če postavimo sprejemnik v natančno poznano lokacijo, potrebujemo samo en satelit, da sproti korigiramo uro.
Štiri je torej minimalno število satelitov za izračun pozicije in časa. Več kot imamo satelitov, bolj natančne rezultate lahko dobimo. To bo kasneje opisano še bolj natančno v podpoglavju o GDOP.

6.3.3. Napake satelitske orbite

Kot smo ugotovili že prej, je izračunana razdalja tudi odvisna od tega, kako natančno poznamo lokacijo satelitov (referenčne točke). Več opazovalnih postaj po vsej Zemlji opazuje satelitske orbite GPS satelitov. Predvideno orbitalno informacijo postaje pošiljajo satelitom, ti pa jo naprej pošiljajo GPS sprejemnikom. Zgodovina sistema GPS je pokazala, da je natančnost predvidevanja orbite reda nekaj metrov, kar povzroči nekaj metrov napake pri računanju naše pozicije. V nadaljevanju bomo tudi opisali, kako to napako odpraviti.

6.3.4. Atmosferske napake: Ionosfera in Troposfera

Ionosfera

Pri računanju razdalje do satelita najprej izmerimo čas, ki je potreben, da signal prepotuje od satelita do GPS sprejemnika in ga pomnožimo s svetlobno hitrostjo. Problem pa nastopi, ker je hitrost potovanja svetlobe odvisna od razmer v atmosferi. Zgornji del atmosfere, ki se imenuje Ionosfera, vsebuje nabite delce, ki upočasnjujejo kodo in pospešujejo nosilec.

Ionosferski vpliv je bistveno večji čez dan kot pa ponoči. Velikost vpliva ima tudi ciklično periodo, ki traja 11 let. V zadnjem obdobju je ionosferski vpliv dosegel maksimum leta 1998 in svoj minimum leta 2004. Cikel se nato ponovi. Če ne blažimo posledic ionosferskih napak, lahko to doprinese k več kot 10 m napake pri merjenju razdalje do satelitov.

Nekateri sprejemniki uporabljajo matematični model ionosferskih efektov. Če predpostavimo, da poznamo približno vrednost naboja ionosferskih delcev (informacija od satelitov), lahko ionosferski efekt zmanjšamo za približno 50 %, vendar je preostala napaka še vedno nezanemarljiva.

Vpliv ionosfere na elektronske signale je odvisen od frekvence signala. Višja kot je frekvenca, manjši je vpliv. Če torej vzorce oddajamo simultano na dveh frekvencah, bo ionosfera zakasnila signal na eni frekvenci npr za 5 metrov in na drugi npr za 6 metrov. Sicer ne moremo izmeriti velikosti teh zakasnitev, lahko pa izmerimo razliko v zakasnitvi. V našem primeru je zakasnitev 1 meter. Iz znanih formul s spremenljivko frekvence lahko izračunamo ionosfersko zakasnitev in tako eliminiramo ionosferski efekt.

Prav iz tega razloga oddajajo vsi sateliti informacijo na dveh frekvencah, ki ju imenujemo *L1* in *L2*. Natančni GPS sprejemniki sprejemajo obe frekvenci, da eliminirajo ionosferski efekt. Vsi običajno GPS sprejemniki sprejemajo le signal *L1.* To je tudi ena glavnih razlik med različnimi tipi GPS sprejemnikov.

V angleščini se je za sprejemnike, ki sprejemajo signal le na eni frekvenci, uveljavil izraz »single frequency receiver«, med tem ko se je za sprejemnike, ki sprejemajo signal na dveh frekvencah uveljavili izraz

»dual frequency receiver«. Sprejemniki tipa »dual frequency receivers praktično eliminirajo celoten ionosferski efekt.
Ker signal *L2* ni v celoti na voljo širši javnosti, so bile v GPS sprejemnike implementirane sofisticirane metode, ki so sposobne iz signala *L2* izluščiti kodno in nosilno razdaljo tudi samo z delno prisotnostjo signala *L2*. Izkazalo je, da je takšna rešitev povsem sprejemljiva za civilne uporabnike, hkrati pa ne ogroža varnostnih pravil ameriškega ministrstva za obrambo, ki preprečujejo zlorabe sistema.
Obstajale so razprave o ločitvi frekvenc za civilne in vojaške namene, ki pa so se izkazale za nerelevantne, saj obstoječi sistem povsem zadosti potrebam civilnega uporabnika.

Troposfera
Nižji sloj atmosfere, ki vsebuje vodne hlape, se imenuje troposfera. Troposfera upočasnjuje tako kodo, kot tudi nosilec. Troposferskega efekta se ne da odstraniti z uporabo dveh frekvenc. Edini način, kako lahko odstranimo troposferski efekt je z merjenjem njegove vsebnosti vodnih hlapov, temperature in pritiska in na osnovi matematičnih modelov izračunati zakasnitev zaradi troposfere.

6.3.5. Širjenje signala po več poteh

Pri merjenju razdalje do vsakega satelita predpostavljamo, da potuje signal direktno od satelita do sprejemne antene. Zavedati pa se moramo, da sprejemnik poleg direktnega signala sprejema tudi odboje od tal in objektov blizu antene, ki dosežejo anteno preko indirektnih poti in interferirajo z direktnim signalom. Tako združen signal povzroči negotovost o prihodu pravilnega signala, enako kot lahko negotovost povzroči odboj od bližnjih gora v našem ilustrativnem primeru. Če je indirektna pot bistveno daljša od direktne, takšna da se dva vzorca signala lahko ločita, potem je mogoče problem širjenja signala po več poteh uspešno eliminirati s pomočjo signalnega procesiranja.

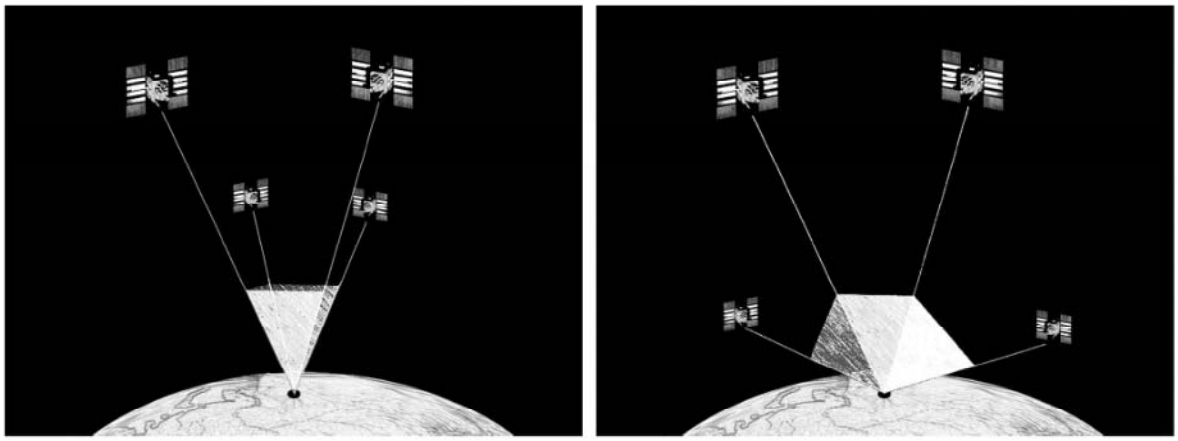
6.3.6. Napake v sprejemniku

Sprejemniki lahko prispevajo k napaki pri merjenju kode ali nosilca predvsem zaradi toplotnega šuma. Pri visoko kvalitetnih sprejemnikih je ta napaka zanemarljiva in znaša pri merjenju nosilca manj kot en milimeter in pri merjenju kode manj kot en centimeter.

6.3.7. GDOP (Geometrical Dilution Of Precision)

Do sedaj smo se pogovarjali o napakah pri merjenju razdalje do satelitov. Vprašanje pa je, kako tovrstne napake vplivajo na napake v izračunani poziciji, oziroma z drugimi besedami koliko metrov napake v izračunani poziciji, nam povzroči en meter napake pri meritvi razdalje do satelitov.

Odgovor na to vprašanje je, da je napaka odvisna od števila satelitov in od geometrijskega položaja satelitov, ki jih uporabimo. Če so štirje sateliti, ki jih uporabimo zelo blizu skupaj, potem lahko en meter napake pri izračunu razdalje do satelita povzroči deset ali celo več sto metrov napake v izračunu pozicije. Če pa so sateliti bolj enakomerno razporejeni po nebu, potem je lahko napaka v poziciji manj kot 1.5 m za vsak meter napake v izmerjeni razdalji. Efekt vpliva geometrije na natančnost določitve pozicije se imenuje GDOP (Geometric Dilution Of Precision), ki ga lahko v grobem interpretiramo kot razmerje med napako v poziciji in napako v izmerjeni razdalji do satelitov.
Predstavljajmo si tetraeder, ki ga formirajo črte, ki povezujejo sprejemnik do vsakega izmed štirih satelitov. Večji kot je volumen tetraedra, manjši (boljši) je GDOP. V večini primerov pomeni tudi večje število satelitov manjši GDOP.



Slika 6-6. GDOP.

6.3.8. Selektivna razpoložljivost: Umetno ustvarjene napake

Napake zaradi satelitske ure, satelitske orbite, ionosfere, troposfere, širjenja signala po večih poteh ter napake sprejemnika tipično prispevajo k manj kot 10 m napake pri merjenju razdalje do satelitov, kar se pri tipičnih vrednostih GDOP (okoli 2) odraža na napaki lokacije približno 20 m.
Ameriško ministrstvo za obrambo je ocenilo, da je takšna natančnost za širšo javnost proti ameriškim narodnim interesom. Zato je ameriško ministrstvo uvedlo namerne napake, da zmanjša natančnost sistema GPS na okrog 100 m. To se imenuje selektivna razpoložljivost (Selective Availability - SA) in je implementirana z omejevanjem natančnosti satelitskih ur in napačnimi podatki o orbiti satelitov. Vojaški sprejemniki so opremljeni s posebno strojno opremo in kodami, ki odstranijo efekt SA. GPS administratorji na zemlji lahko SA vključijo ali izključijo.

7. Optične komunikacije

7.1. Uvod

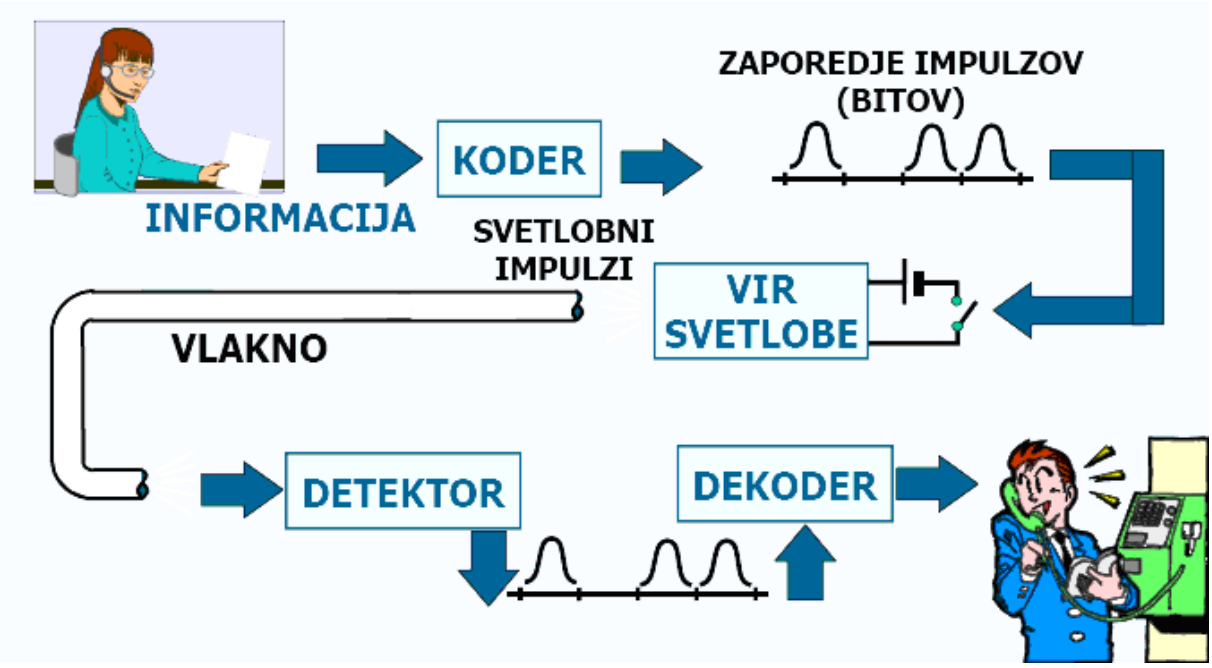
Optične komunikacije, tehnologija, stara komaj dobrih 30 let, se odzivajo na naglo rastoče potrebe po vedno večjih prenosnih zmogljivostih in doživljajo razvoj, ki nima primerjave v prejšnjih obdobjih. Po več desetletjih uspešnih raziskav in po dobrem desetletju pospešenega uvajanja v prakso postajajo optične komunikacije osnovni in prevladujoč prenosni medij za zveze na dolge in srednje razdalje. Ob vseh potencialnih prednostih je samo vprašanje časa, kdaj bodo optične zveze postale osnovni prenosni medij tudi za zveze kratkega dosega in bodo segle do hišnega praga oziroma pisarniške mize.

Hkrati z množičnem uvajanjem sistemov v prakso pospešeno potekajo raziskave in razvoj novih naprav in sistemov. Vsako leto se zvrsti toliko novosti, da se zdi, kot bi optične komunikacije prehitevale same sebe. Zato je potrebno tudi neprestano izobraževanje na tem področju.

Optične komunikacije imajo pred do sedaj znanimi tehnologijami nekatere prednosti in specifične lastnosti, ki izvirajo iz uporabljenega optičnega spektra.

Optične komunikacije obsegajo vse od generiranja svetlobe in optičnega signala, prenos po optičnem vlaknu, optično konverzijo, detekcijo, demodulacijo in odločanje o sprejetem signalu.

Sistemi v optičnih komunikacijah so zgrajeni iz optičnega vlakna, ki povezuje oddajno terminalno opremo s sprejemno terminalno opremo. Vsi elementi optičnih zvez so še vedno deležni mnogih razvojnih sprememb.



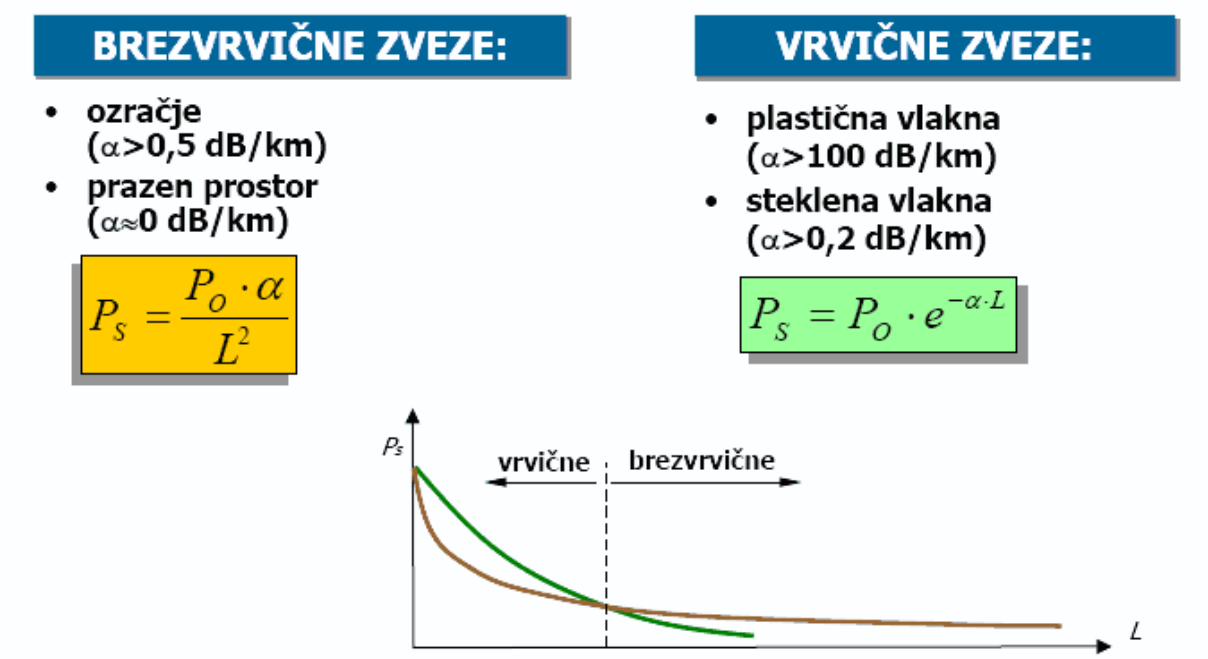
Slika 7-1. Princip delovanja optične komunikacije.

Glede na uporabljene elemente (optično vlakno, vire svetlobe in optične detektorje) lahko izdelamo po dosegu in prenosni kapaciteti različne optične zveze. Njihova raznolikost sega od preprostih in kratkih nizkokapacitivnih zvez do zvez visokega dosega, ki uporabljajo najnovejšo razvojno tehnologijo prenosa.

7.2. Prostozračne zveze

V optičnih komunikacijah se za prenosno pot svetlobnega žarka lahko uporablja prosto zračni sistem ali prenos po optičnem vlaknu. Slabosti prosto zračnih zvez so:

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



Slika 7-2. Primerjava brezvrvičnih in vrvičnih zvez.

Enostavne prosto zračne optične zveze so zanimive predvsem za komuniciranje na krajših razdaljah do nekaj deset metrov (brezžične slušalke, daljinsko upravljanje televizija, razne proti vlomilske naprave, komunikacija med GSM telefonom 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 IR LED pa se lahko dosežejo še večje razdalje. V zadnjem času se odpirajo možnosti uporabe prosto zračnih 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 tu ni prisotna absorpcija svetlobe. Problem pa je izdelava ustreznega fokusirnega sistema. Valovanje v prostoru se z razdaljo razpršuje in pri tem izgublja na moči. 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.

7.3. Zveze po optičnem kablu (vrvične komunikacije)

Osnovni material enorodovnega in mnogorodovnega vlakna v komunikacijah (transportnem in dostopovnem omrežju) je kremenovo steklo 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 cenena mnogorodovna plastična vlakna. Ta vlakna naj bi imela primerno mehansko odpornost in omogočala predvsem veliko praktičnost ter uporabnost v hišnem okolju. V praksi je vrednost slabljenja takega vlakna ≈0,1 dB/m pri 580 nm, kar je zelo visoko v primerjavi s SiO_2 vlakni.

	bakrena parica, koaksialni vodnik	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 7-3. Primerjava optičnih vlaken z električnimi valovodi.

Optični kabel je bil najprej namenjen dolgim prekooceanskim in zemeljskim telekomunikacijskim zvezam. Danes nadomešča bakrene in koaksialne vodnike v lokalnih telefonskih omrežjih, kabelskih televizijskih sistemih in računalniških omrežjih. Pred drugimi vrstami komunikacij imajo optične komunikacije vsaj tri velike sistemske prednosti, zaradi katerih izrivajo druge tekmece (klasično bakreno parico in koaksialni vod) na področju fiksnih zvez:

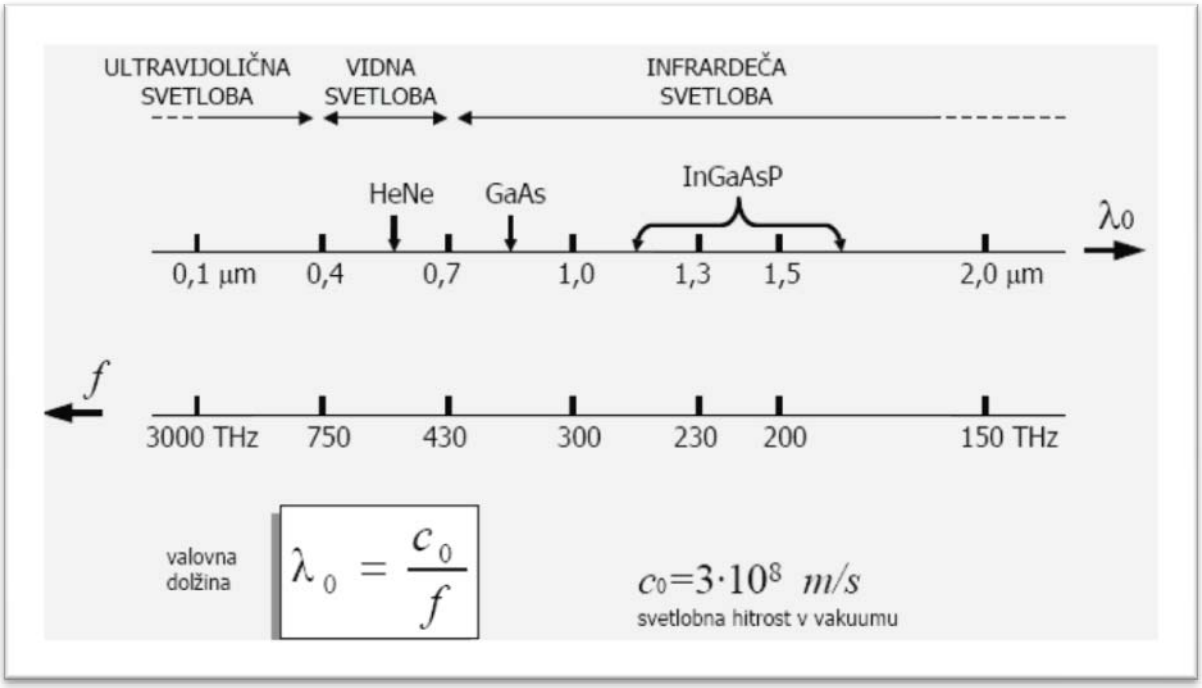
1) **Slabljenje prenosnega medija** Slabljanje optičnega vlakna je neprimerljivo manjše kot v kovinskih vodnikih, kar omogoča doseganje

velikih razdalj ob zelo majhnem razmerju napačno sprejetih bitov (BER Bit Error Rate v razredu 10^{-12}).

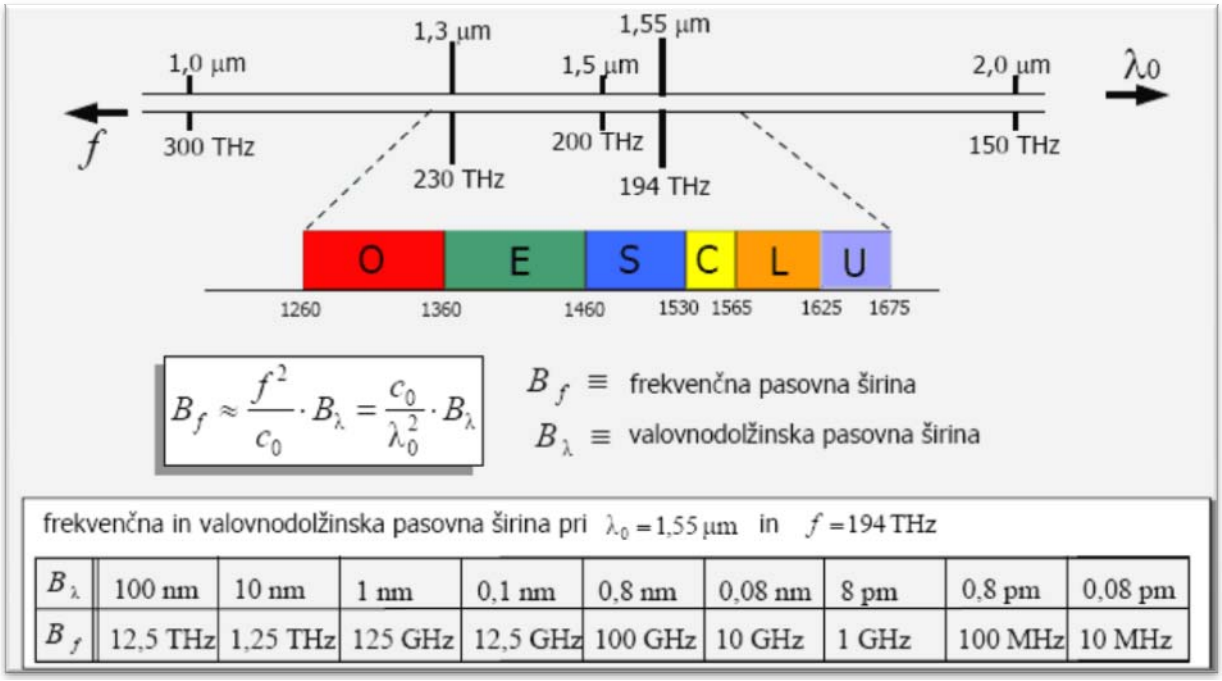
2) **Širina prenosnega spektra** lahko znaša GHz ali desetine GHz, kar omogoča digitalni prenos z zelo veliko bitno hitrostjo bit/s. oziroma prenos velike količine informacij. Po optičnem vlaknu lahko prenašamo spektre, ki obsegajo celotno radiofrekvenčno in mikrovalovno področje in še mnogo več.
3) **Občutljivost na zunanje motnje** je pri optičnem prenosu neopazna, zato lahko dosežemo tudi ekstremno nizko vrednost BER, potrebno za prenos podatkov z zelo veliko zanesljivostjo. Za inštalaterje je bistvena prednost predvsem v neobčutljivosti na električnomagnetne motnje, kar pomeni, da se optični vodniki vsaj v teoriji lahko polagajo kjerkoli.

Zaradi neobčutljivosti na EM vplive pa je onemogočeno tudi nepooblaščeno prisluškovanje na zvezi.

Edina prednost, ki jo zaenkrat še imajo bakreni sotekmeci je enostavnejša komunikacijska oprema, kar pomeni da je cenejša. V zadnjih letih se razvoj posveča predvsem možnostim izdelave cenene terminalne opreme za optične komunikacije. V zvezah kratkega dosega precej obetajo laserske diode s pokončno resonančno votlino.



Slika 7-4. Optični spekter.



B_λ	100 nm	10 nm	1 nm	0,1 nm	0,8 nm	0,08 nm	8 pm	0,8 pm	0,08 pm
B_f	12,5 THz	1,25 THz	125 GHz	12,5 GHz	100 GHz	10 GHz	1 GHz	100 MHz	10 MHz

Slika 7-5. Spekter optičnih komunikacij.

Svetloba je elektromagnetno valovanje v mikrometerskem (µm) valovnem področju. Vidni del svetlobnega spektra obsega oktavno valovno področje v razmerju valovnih dolžin 1:2 med vijolično (λ=0,38 µm) in rdečo (λ= 0,76 µm) svetlobo. Pripadajoče frekvenčno področje obsega pas med 400 THz in 800 THz.

V svetlobni spekter štejemo poleg vidne še nevidno infrardečo (λ= 0,76 µm) in ultravijolično (λ=0,38 µm) svetlobo. Infrardeči spekter se razteza vse do milimetrskih ali submilimetrskih valov radijskega spektra, ultravijolični spekter pa vse do žarkov X. V tako širokem frekvenčnem spektru se energija fotonom razlikuje za mnogo velikostnih razredov Zato so fizikalni učinki odvisni od vrste svetlobe in različni od področja do področja.

Danes se optične komunikacije izvajajo v bližnjem infrardečem področju. Delijo se na tri področja (spektralna okna), ki so se uveljavila iz praktičnih razlogov ter zaradi nekaterih optimalnih lastnosti kremenovega SiO_2 stekla. Uveljavili so se pasovi okoli valovnih dolžin 850 nm, 1300 nm in 1550 nm.

Področje 850 nm (prvo spektralno okno) se je uveljavilo v zgodnjem razvoju optičnih komunikacij zaradi obstoječe tehnologije izdelave polprevodniških GaAs laserjev za to valovno dolžino. Področje 1300 nm (drugo spektralno okno) se je uveljavilo zaradi ničelne snovne disperzije vlakna. Področje 1550 nm (tretje spektralno okno) se je uveljavilo zaradi najmanjšega slabljenja optičnega vlakna na tem področju.

Valovne dolžine so razdeljene v pasove in sicer:

pas O original od 1260 nm do 1360 nm (II. spektralno okno)

pas E extended od 1360 nm do 1460 nm

pas S short od 1460 nm do 1535 nm

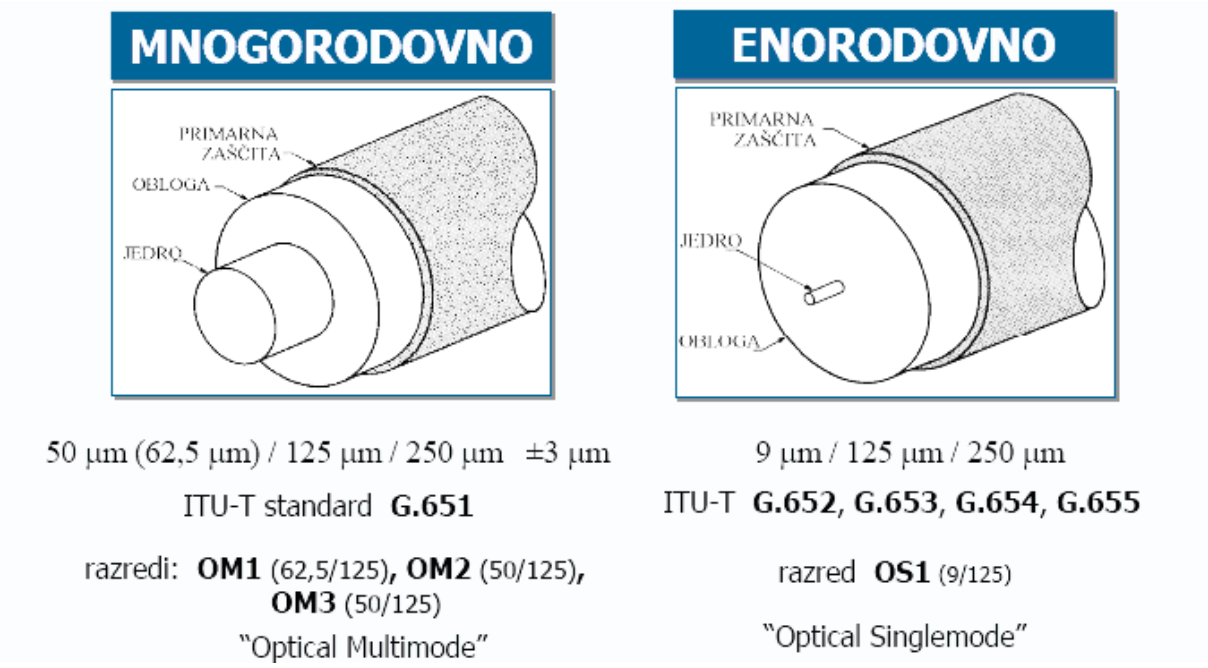
pas C od 1535 nm do 1565 nm (III. spektralno okno)

pas L long od 1565 nm do 1625 nm

pas U od 1625 nm do 1675 nm

Omenjene valovne dolžine veljajo zgolj za prazen prostor in v približku tudi za zrak, v steklu pa ne veljajo več. Zato je bolje uporaljati enoveljavno določeno frekvenčno skalo. Preslikava iz valovne dolžine v frekvenco poteka preko svetlobne hitrosti, ki znaša 300 milijonov m/s. Tako kot radijski je tudi optični spekter dragocena naravna dobrina. Z naraščanjem potrebe po množičnih komunikacijskih medijih in z razvojem novih materialov bo v prihodnje potrebno in mogoče izkoriščati širši spekter.

Optična vlakna uporabljamo kot dielektrične valovode. Ker je valovna dolžina svetlobe zelo majhna, so zelo majhne tudi prečne izmere ustreznih valovodov. Optična vlakna za komuniciranje so izdelana iz zelo čistega kremenčevega stekla SiO_2 in njihov zunanji premer je standardiziran na 125 μm. Za lažje rokovanje so optična vlakna zaščitena vsaj s primarno zaščito premera 250 μm in običajno še s sekundarno zaščito različnih premerov. Za zaščito steklenih optičnih vlaken se uporabljajo umetne plastične mase.



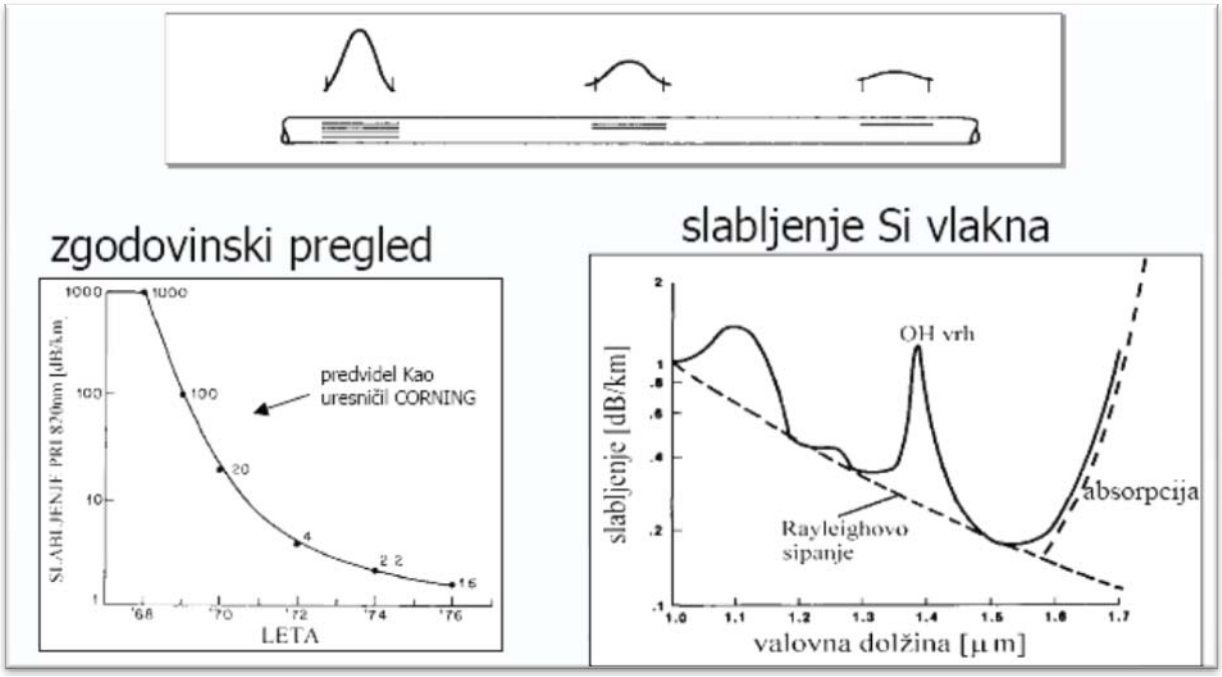
Slika 7-6. Primerjava enorodovnega in mnogorodovnega vlakna.

Mnogi ljudje mislijo, da je optično vlakno izdelano iz povsem enotnega homogenega stekla. V resnici je sestavljeno iz dveh različnih stekel. Centralno področje imenujemo jedro, zunanje obloga. Celotna struktura pa je še vedno steklo, ki pa ima različne lomne količnike. Lomni količnik jedra je večji od lomnega količnika obloge.

V osnovi poznamo dva različna tipa vlaken: ***enorodovno* in *mnogorodovno vlakno***.

Pri enorodovnem vlaknu ima jedro premer samo 9 µm in dovoljuje širjenje samo enega rodu svetlobnega valovanja. Standardno enorodovno vlakno SMF je dimenzionirano za prenos pri 1300 nm. Disperzijsko premaknjeno vlakno DSF pa je dimenzionirano za prenos pri 1550 nm. To omogoča aplikacije od lokalnih pristopnih omrežij (analognih in digitalnih) do dolgih visokokapacitetnih zvez.

Pri mnogorodovnem vlaknu je premer jedra skoraj polovica celotnega premera in znaša 50 µm ali 62,5 µm. Dovoljuje širjenje nekaj sto rodovom svetlobnega valovanja. Večja velikost jedra omogoča lažje spajanje vlaken in usmerjanje svetlobe iz izvorov (LED, VSCEL, laser,…). Čeprav se uporaba mnogorodovnega vlakna krči na uporabo v lokalnih omrežjih in računalniških omrežjih, se razvoj mnogorodovnega vlakna ni ustavil. Trend je predvsem v izboljšanju proizvodnih toleranc za področje 850 nm (VCSEL). Mnogorodovno vlakno je ključno za tehnologijo Gigabitnega etherneta.



Slika 7. Slabljenje optičnega vlakna.

V tem času sta pionirja optičnih komunikacij, Angleža Kao in Hockham, objavila članek, 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 vlakno izboljšali 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 še danes 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.

Kasneje so prišli do ugotovitve, da je mogoče doseči še manjše slabljenje pri večjih valovnih dolžinah. Pojav se imenuje Rayleighovo sipanje po lordu Rayleighu, ki je fizikalni pojav odkril. Z naraščanjem valovne dolžine slabljenje optičnega vlakna pada in pride do izredno nizkih slabljenj pri visokih valovnih dolžinah. V praksi pa se pri večjih valovnih dolžinah pojavi absorpcija svetlobe v steklu.

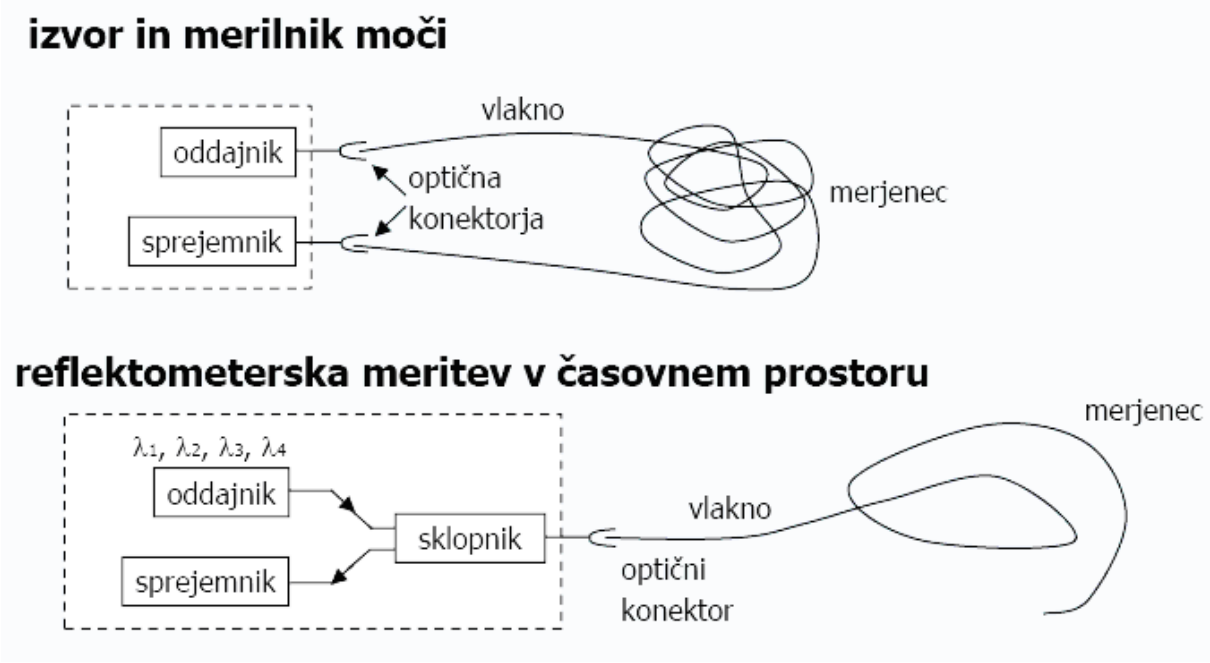
V optičnem vlaknu sta prisotna dva mehanizma, ki povzročata slabljenje:

- Rayleighovo sipanje, ki razprši svetlobo, ki potem izhaja iz vlakna.
- absorpcija, ki svetlobo pretvarja v toploto.

Obstaja pa še tretji problem in to je absorpcija zaradi Hidroksidnih (OH) ionov, ki so prisotni v steklu. Prisotni so le določeni ioni, ki imajo izrazite absorpcijske vrhove. Najbolj značilen vrh je pri 1400 nm, ki ločuje drugo

in tretje spektralno okno. Danes je tehnološko mogoče izdelati vlakno, ki nima tega OH absorpcijskega vrha.

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



Slika 7-8. Merjenje slabljenja in dolžine optičnega vlakna.

7.3.1. Merjenje slabljenja optičnega vlakna

Pri merjenju slabljenja optičnega vlakna si pomagamo z merilnikom moči, ki ga priključimo na izhodni konec optičnega vlakna. Pri tem v vlakno posvetimo z optičnim signalom znane moči. Iz razlike med oddano in sprejeto optično močjo izračunamo slabljenje vlakna.

Pri meritvah optičnih zvez sta si oba konca optičnega vlakna lahko več kilometrov narazen, torej običajno nista dostopna na istem mestu. Za meritev optične zveze zato želimo postopek, ki zna izmeriti optično vlakno v vkopanem kablu z dostopom na enem samem koncu optične zveze. Takšno meritev imenujemo reflektometerska meritev. Izvedemo jo tako, da v vlakno pošljemo na enem koncu znan signal in opazujemo, kaj se po določenem času zaradi različnih odbojev vrne na istem koncu vlakna.

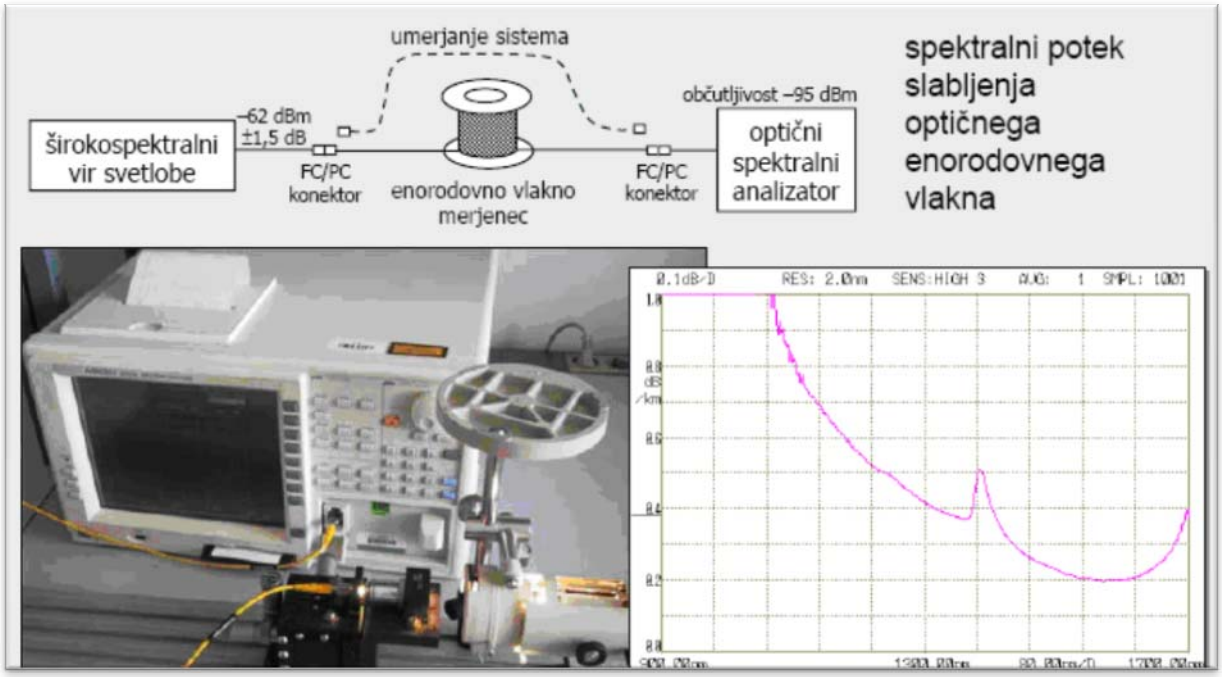
Pri reflektometerski meritvi v časovnem prostoru v vlakno pošljemo časovno kratek impulz svetlobe. Svetlobni impulz se odbije predvsem na odprtem koncu vlakna in na konektorskih spojih. Precej slabotnejše je Rayleighovo sipanje svetlobe v steklu vzdolž celotne dolžine vlakna. Odboji na zvarih so običajno zanemarljivo majhni, vendar tudi opazni.

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.

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). Glavna omejitev optičnega reflektometra je uporaben domet, saj mora signal reflektometra isto pot prepotovati dvakrat.

Poleg tega so odboji slabotni: najmočnejši odboj na prostem koncu vlakna znaša komaj 4 % moči vpadne svetlobe, odboji dobrih konektorjih so še manjši. Najslabotnejše je Rayleigh-ovo sipanje svetlobe, saj predstavlja glavni mehanizem izgub kakovostnih optičnih vlaknih, ki ga skušamo čimbolj 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 nazaj "ujame" v optični valovod.

V reflektometer v časovnem prostoru zato vgradimo laser s čimvečjo izhodno močjo, vendar je ta omejena s konstrukcijo polprevodniškega laserja in nastopom nelinearnih pojavov v samem vlaknu pri močeh 10 do 100mW. Pri določanju dometa ne smemo pozabiti niti na izgube v smernem sklopniku. Ker je smerni sklopnik recipročen sestavni del, znašajo te izgube najmanj 6 dB (3 dB na oddaji in še 3 dB na sprejemu).



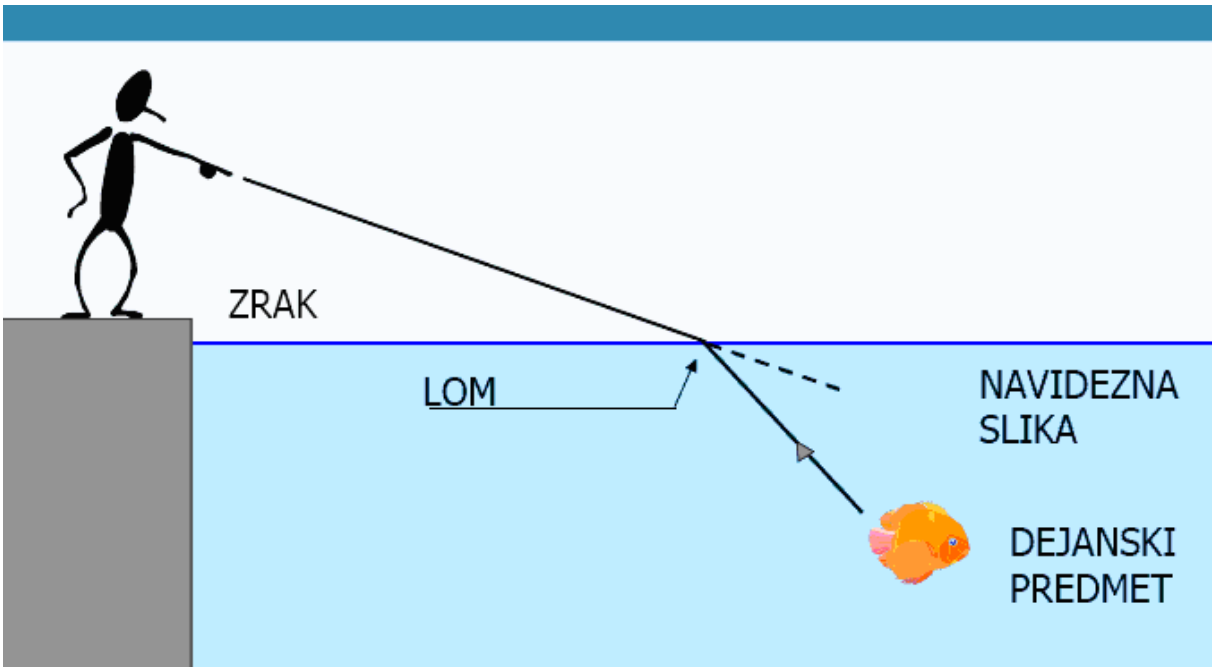
Slika 7-9. Merjenje slabljenja optičnega vlakna.

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

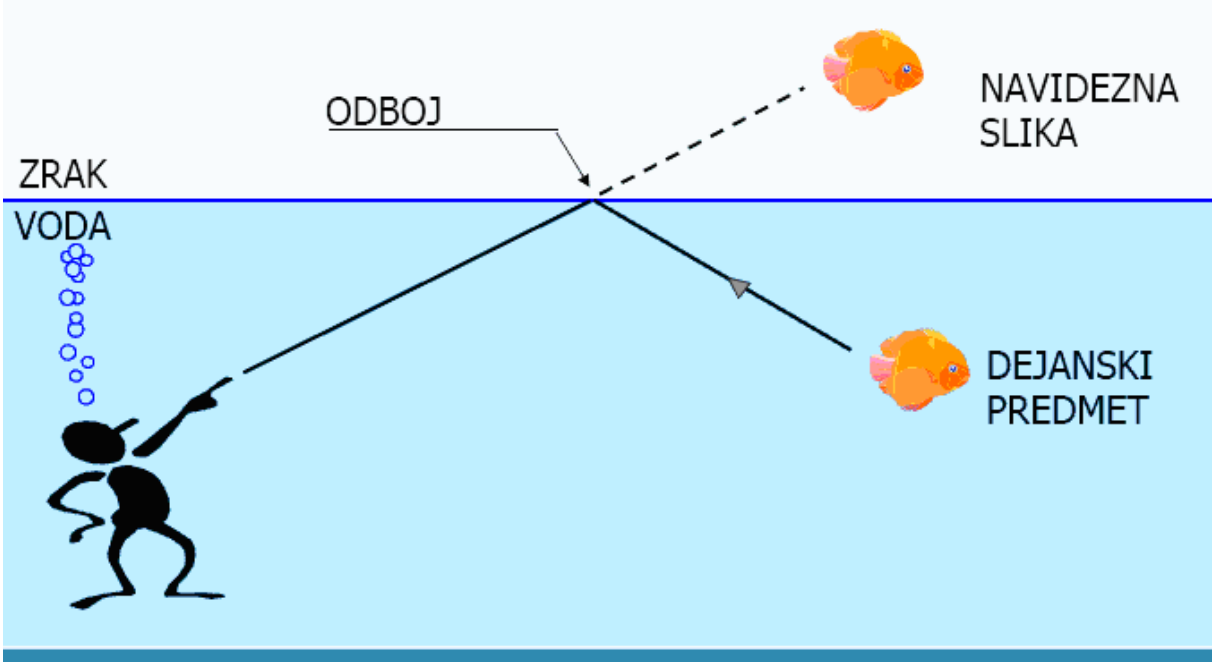
Za to metodo obstajata dve izvedbi merilne vezave, pri čemer ena uporablja nastavljiv laser in kalibriran merilnik moči, druga pa širokospektralen vir svetlobe in optični spektralni analizator. V obeh primerih dobimo kot rezultat spektralno odvisnost slabljenja optičnega vlakna.

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

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.



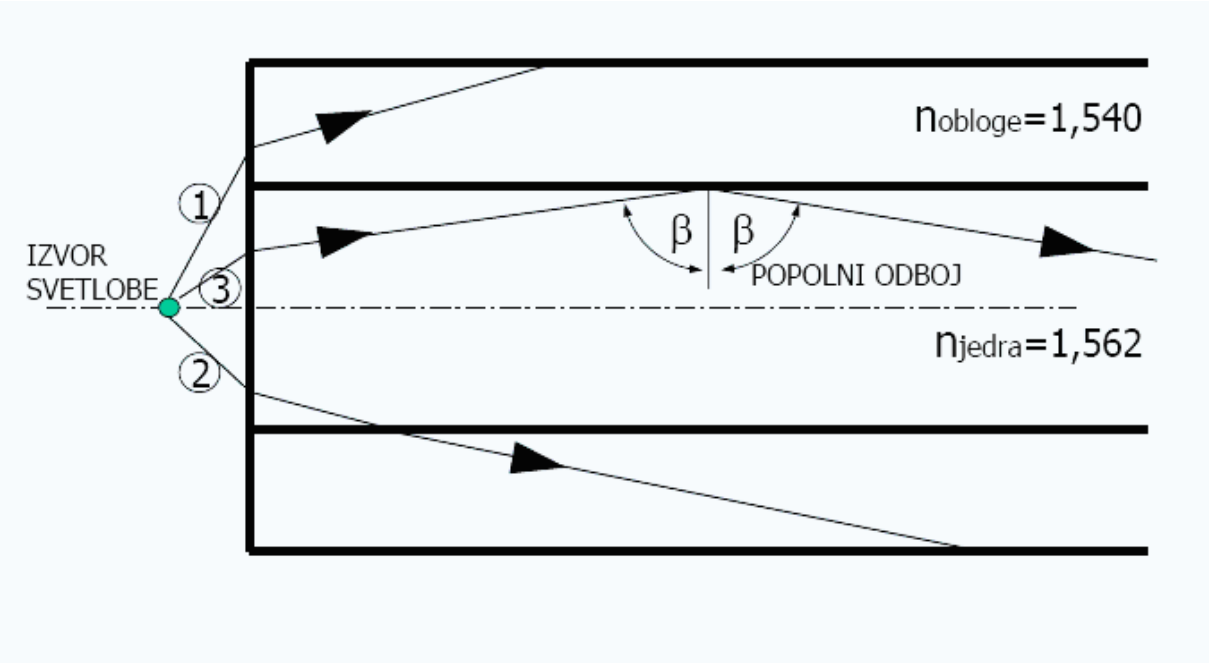
Slika 7-10. Lom svetlobe.



Slika 7-11. Odboj svetlobe.

Model geometrijske optike običajno uporabljajo pri izdelovanju optičnih predmetov kot so leče in zrcala in je dokaj dober približek, ko so fizične dimenzije veliko večje v primerjavi z valovno dolžino.

Vlakno je sestavljeno iz jedra in obloge. Njuna lomna količnika se rahlo razlikujeta (približno za procent). Jedro je vedno iz stekla, ki ma večji lomni količnik, zato svetloba v jedru potuje počasneje kot v oblogi. Hitrost svetlobe v vakuumu znaša 300 milijonov m/s, v ostalih snoveh pa je skalirana za lomni količnik snovi, po kateri se širi. Lomni količnik snovi je na ta način tudi definiran. Lomni količnik stekla je tipično okrog 1,5, kar pomeni, da svetloba potuje v steklu z 2/3 hitrosti v vakuumu (200 milijonov m/s).

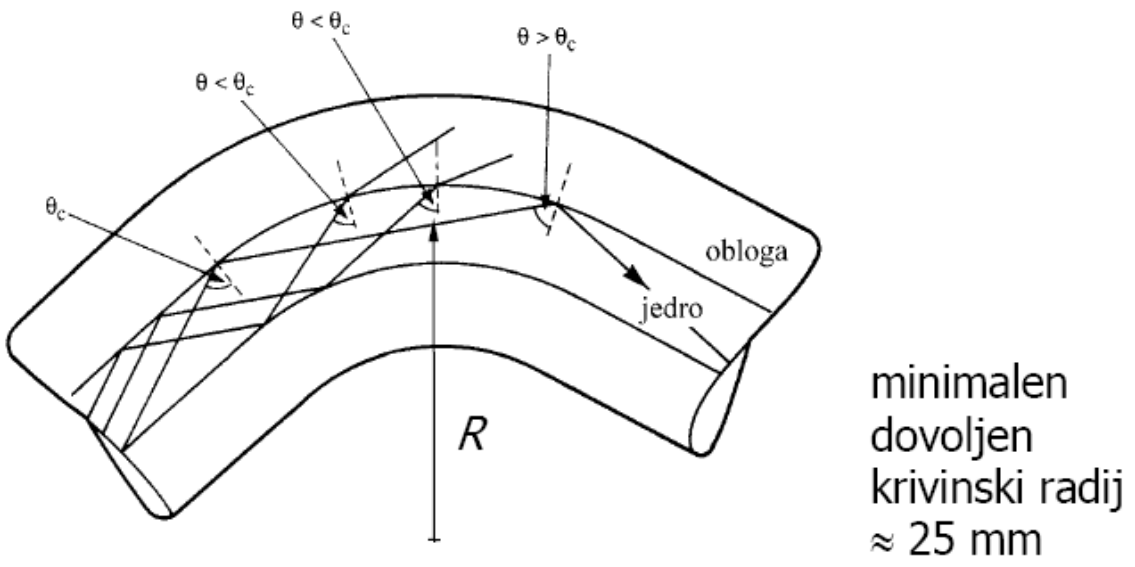


Slika 12. Vstop svetlobe v optični vlakno.

Žarek št. 1 prihaja iz svetlobnega izvora in vpade na oblogo optičnega vlakna. Valovanje vpade iz zraka z lomnim količnikom približno 1 na steklo, ki ima večji lomni količnik. Spodnji del valovanja prej zadene steklo. Ker se svetloba v steklu širi počasneje kot v zraku, spodnje valovne fronte zaostajajo in svetlobni žarek spremeni smer. Ta žarek zadene primarno zaščito in se v njej absorbira, torej je izgubljen.

Žarek št. 2 zadene jedro optičnega vlakna. Zaradi enakega razloga kot pri prvem žarku se na meji zrak-steklo lomi in potuje do obloge. Tu se ponovno lomi in potem, ko preleti oblogo, se tudi on absorbira.

Žarek št. 3. vpade v jedro pod bolj strmim kotim. Potem, ko se lomi na meji zrak-steklo, prileti na mejo jedro-obloga. Ker je vpadni kot (ß) tega žarka precej velik, pride do totalnega odboja in žarek se v celoti odbije nazaj v jedro. Na ta način je žarek ujet v jedro vlakna in po cik-cak metodi potuje v smeri vlakna.



Slika 7-13. Slabljenje na krivinah 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.

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.

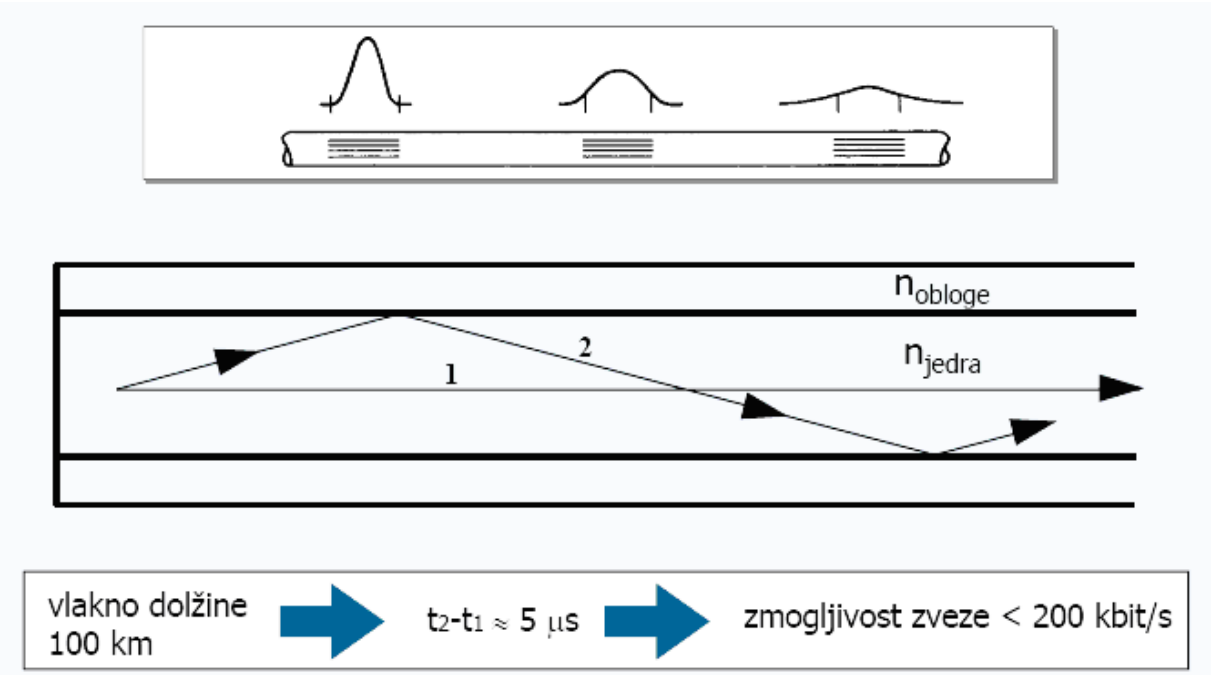
Svetlobni žarek, ki pride do krivine optičnega vlakna, ima vpadni kot manjši od kota za totalni odboj, kar pomeni, da uide v oblogo in je za nas izgubljen. Žarki, ki vpadejo na krivino pod še ustrezajočim kotom, lahko obidejo ukrivljenost.

Pojav uhajanja dela optične moči na krivinah je še posebno izrazit pri šibkolomnih valovodih, kjer je razlika med lomnim količnikom jedra n_2 in obloge n_2 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 deset krat 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.



Slika 7-14. Razširitev impulza – disperzija.

Pri potovanju optičnega impulza skozi vlakno pride še do ene nevšečnosti. Svetlobni impulz, ki naj po dogovoru predstavlja logično enico pri digitalni zvezi, se pri potovanju skozi vlakno razširi. V vlakno je vstopal lepo oblikovan digitalni optični impulz, iz vlakna pa dobimo razširjen impulz. Ta pojav je moteč predvsem pri velikih bitnih pretokih, ko so časovne razdalje med impulzi dokaj majhne. Po razširitvi pride namreč do prekrivanja impulzov, kar poveč verjetnost narobe sprejetega bita.

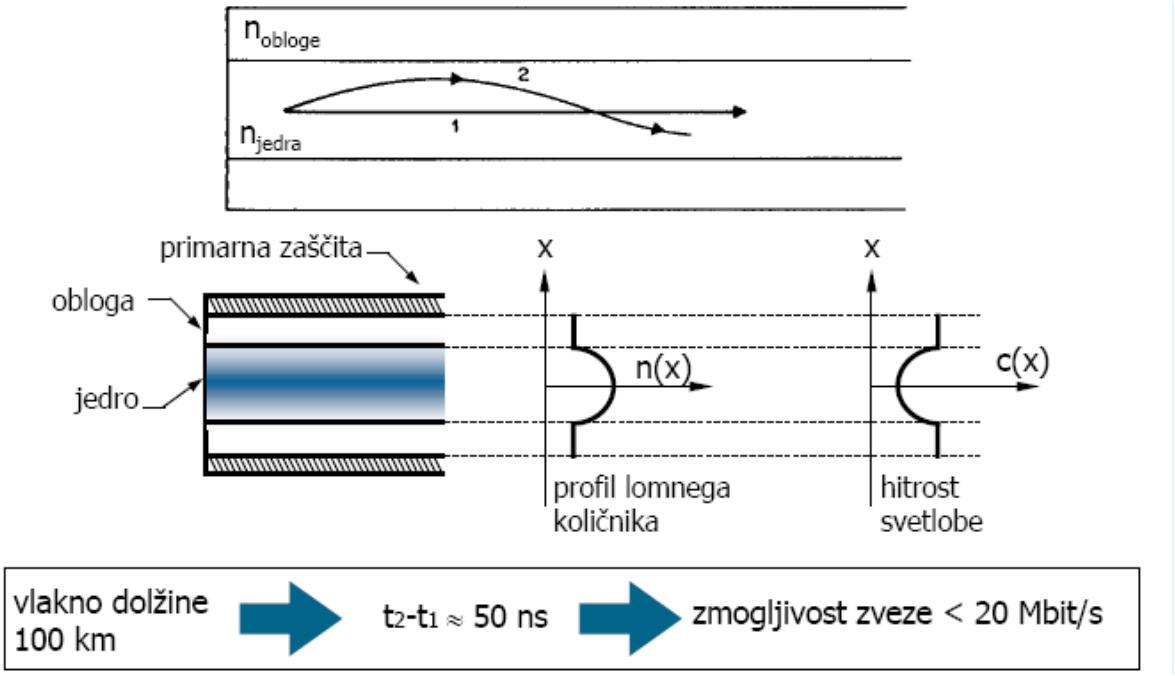
Pojavu razširitve impulza strokovno pravimo disperzija. Ker imamo opravka z mnogorodovnim optičnim vlaknom, je to mnogorodovna disperzija.

Snovno-geometrijski parametri mnogorodovnega optičnega vlakna dopuščajo, da se v vlaknu širi mnogo rodov (žarkov). Vsak rod ima svojo fazno hitrost, kar si lahko razlagamo z različno dolžino poti.

Svetlobni žarek, ki se med potovanjem odbija od sten, opravi v primerjavi z direktnim svetlobnim žarkom daljšo pot, zato pride na izhod vlakna zakasnjen. Vhodni optični impulz se torej razmaže po časovnem prostoru.

Obstajata dve rešitvi za odpravljanje mnogorodovne disperzije.

Če omogočimo, da se bo po optičnem vlaknu širil le direkten svetlobni žarek, do razširitve optičnega impulza ne more priti. To naredimo tako, da zmanjšamo premer jedra optičnega vlakna toliko, da se bo po njem širil samo osnovni rod svetlobnega valovanja. Na ta način dobimo enorodovno vlakno.



Slika 7-15. Vlakno z gradientnim lomnim likom.

Drugi način je, da izdelamo takšno optično vlakno, da se mu lomni količnik iz sredine zvezno znižuje proti oblogi. Takemu vlaknu pravimo gradientno vlakno oziroma vlakno z gradientnim lomnim likom (GI – Gradient Index). Takšno vlakno ima še vedno razmeroma debelo jedro (50 μm ali 62,5 μm), vendar se profil lomnega količnika spreminja zvezno po skrbno izbrani krivulji, da so hitrosti razširjana različnih rodov med seboj čimbolj podobne, če že ne enake.

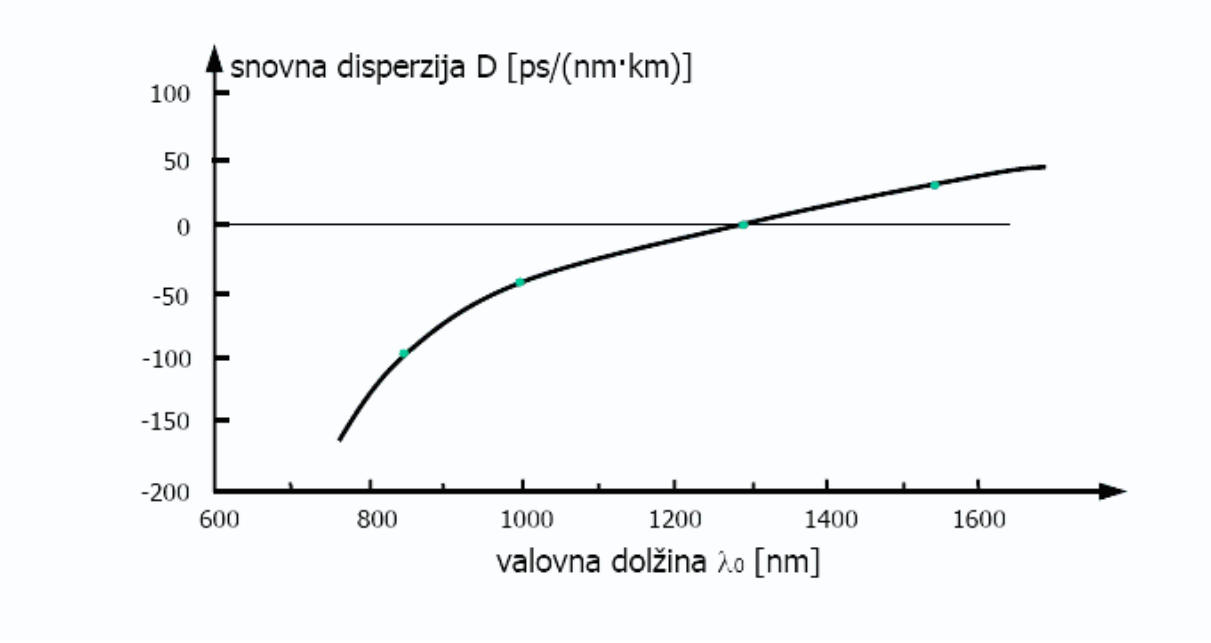
Želeni obliki lomnega lika jedra takšnega vlakna se zelo približa parabolični profil lomnega količnika. Za parabolični lomni lik obstaja analitična rešitev za polje v valovodu.

V optičnem vlaknu z gradientnim lomnim likom se nedirektni žarki ne lomijo več pod ostrim kotom, ampak se zvezno obračajo proti sredini vlakna. Na prvi pogled smo s tem bolj malo pridobili, ker opravi drugi žarek še vedno daljšo pot kot prvi. To je sicer res, vendar moramo upoštevati, da potuje žarek na obodu, kjer je manjši lomni količnik, z večjo hitrostjo. V primeru, da ima profil lomnega količnika obliko parabole, so hitrosti žarkov sinhronizirane tako, da ne pride do zakasnitev.

Gradientno vlakno je treba seveda izdelati. Zaenkrat še ni znan postopek, ki bi sam od sebe težil k želenemu lomnemu liku jedra optičnega vlakna. Želeni lomni lik je zato rezultat nanašanja velikega števila plasti (40 do 70 slojev) s skrbno izbranim lomnim količnikom (GeO2), da dobimo na koncu preform in iz njega izvlečemo želeno optično vlakno.

Mnogorodovna disperzija je parameter optičnega vlakna, ki je v veliki meri odvisen od natančnosti pri izdelavi vlakna. Kontrola končnega izdelka zato vključuje meritev mnogorodovne disperzije v obliki frekvenčne pasovne širine.

Novejši razvoj mnogorodovnega optičnega vlakna omogoča selektivno vzbujanje rodov (vzbuditev rodov, ki ne "čutijo" obloge), kar omogoča še dodatno znatno izboljšanje pasovne širine.



Slika 7-16. Snovna disperzija SiO_2 vlakna.

Mnogorodovna disperzija in snovna disperzija sta dva po fizikalnem principu delovanja povsem ločena pojava. Nezaželen učinek razširitve optičnega impulza pa je pri obeh enak.

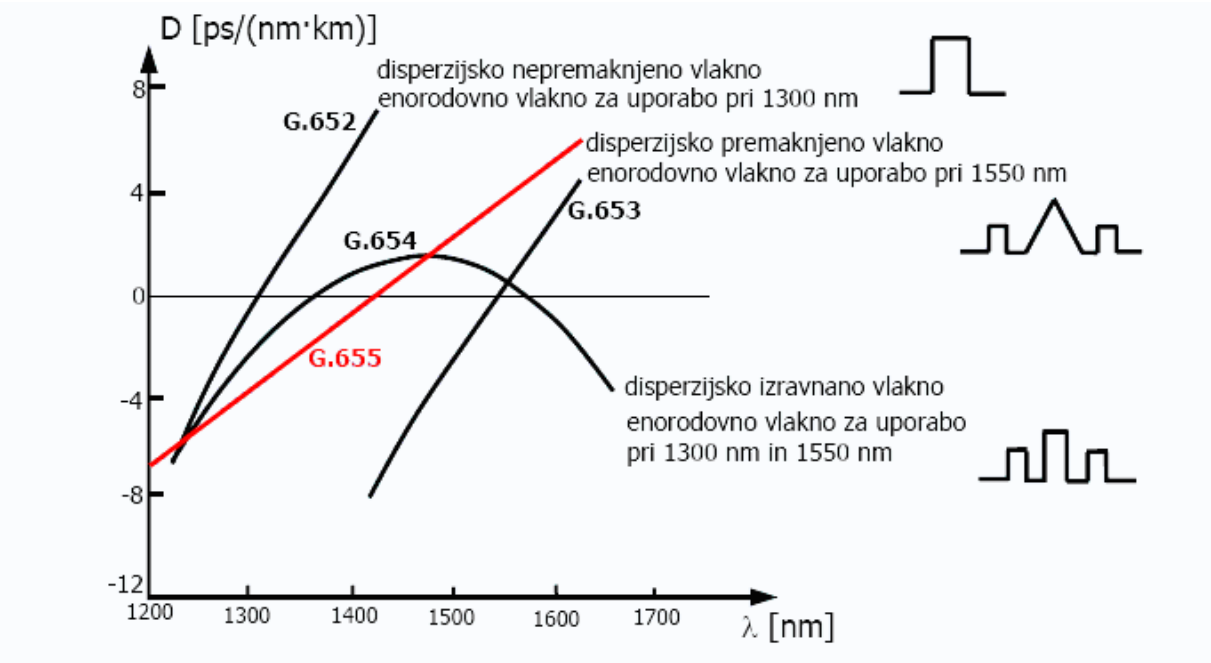
Snovna disperzija pride tem bolj do izraza, čim širši optični spekter ima svetlobni vir. Pojavlja se v snovi, katere lomni količnik je odvisen od frekvence (valovne dolžine).

Snovne disperzija je sicer pojav, ki se ga lahko tudi koristno izrablja za razločevanje posameznih komponent svetlobe v prizmi. Gre torej za pojav, ko ima svetloba pri potovanju skozi steklo različne hitrosti glede na njeno valovno dolžino. To je posledica tega, da je lomni količnik stekla frekvenčno odvisen.

Iz grafa je razvidno, da snovna disperzija SiO_2 stekla narašča z naraščanjem valovne dolžine. Posebej naj pri tem poudarim točko ničelne disperzije, ki za SiO_2 vlakno nastopi pri 1300 nm. To je torej razlog za nastanek drugega spektralnega okna v optičnih komunikacijah.

Kot oceno velikostnega reda navedimo disperzijski koeficient čistega silicijevega stekla SiO_2 v ps/(nm·km). Le-ta zavzame vrednosti približno:

- -100 ps/(nm·km) pri λ=0,85 μm,
- -40 ps/(nm·km) pri λ=1 μm,
- 0 ps/(nm·km) pri λ=1,28 μm in
- 20 ps/(nm·km) pri λ=1,55 μm.



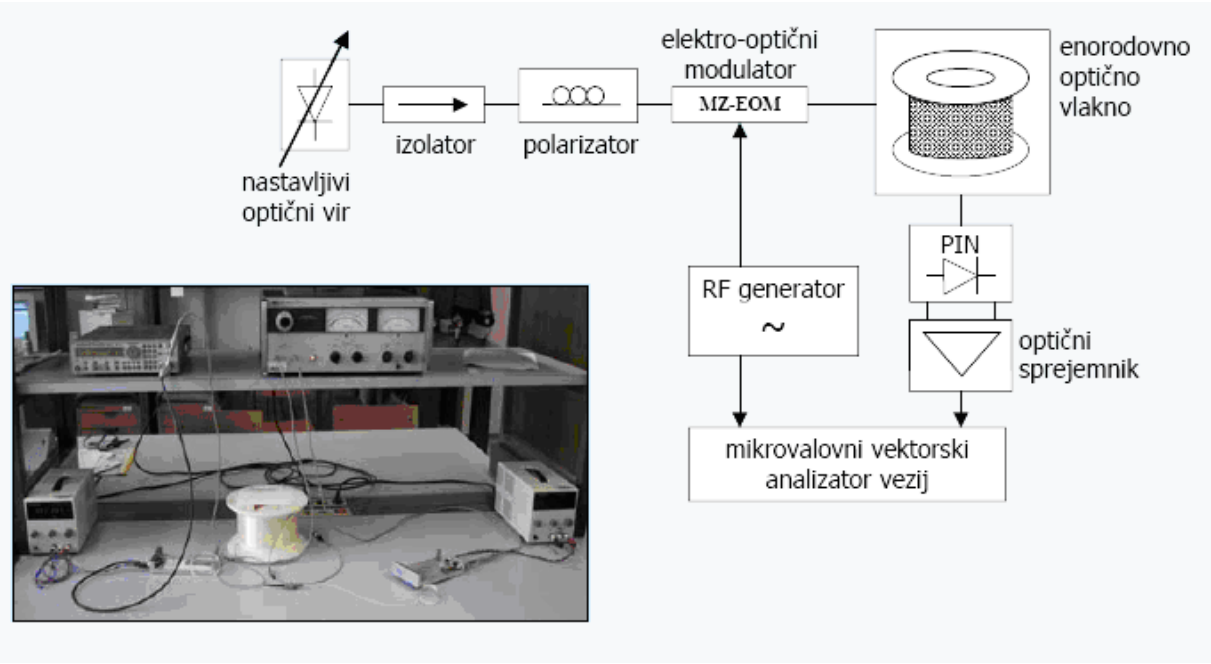
Slika 17. Vlakna G.652, G.653 in G.654.

Snovna disperzija je nič pri valovni dolžini 1300 nm. Z obliko lomnega lika pri enorodovnem optičnem vlaknu lahko vplivamo na disperzijske lastnosti valovoda. S seštevkom snovne in valovodne disperzije lahko dobimo vlakno s skorajda poljubno disperzijo. Na zgornji sliki so prikazani standardizirani tipi enorodovnega optičnega vlakna.

Običajno G.652 vlakno ima standardni premer jedra 9 μm. Skupna valovna dolžina se ne premakne veliko in je še vedno blizu 1300 nm. To vlakno je bilo prvo enorodovno vlakno in se še danes najpogosteje uporablja.

Disperzijsko premaknjeno vlakno G.653 je znatno premaknjeno v desno. Minimalna disperzija tovrstnega vlakna je v okolici 1550 nm, kjer je slabljenje najmanjše. Pri G.654 vlaknu sta snovna in valovodna disperzija tako izenačeni, da dobimo disperzijsko izravnano optično vlakno. Disperzija je pri tem vlaknu minimalna v drugem in tretjem spektralnem oknu. Kasnejši razvoj optičnih sistemov je pokazal, da zaradi nastanka nezaželenih nelinearnih pojavov za komunikacijo ni najbolj idealno področje z minimalno disperzijo. Iz tega razloga se je polaganje optična vlakna tipa G.653 in G.654 opustilo.

Najnovejše je vlakno z oznako G.655, ki ima v področju delovanja manjšo pozitivno disperzijo (od 4 do 8 ps/(nm·km)). Dobijo se v raznih izvedbah strmine in efektivne površine jedra, ki sta na žalost premosorazmerna parametra.



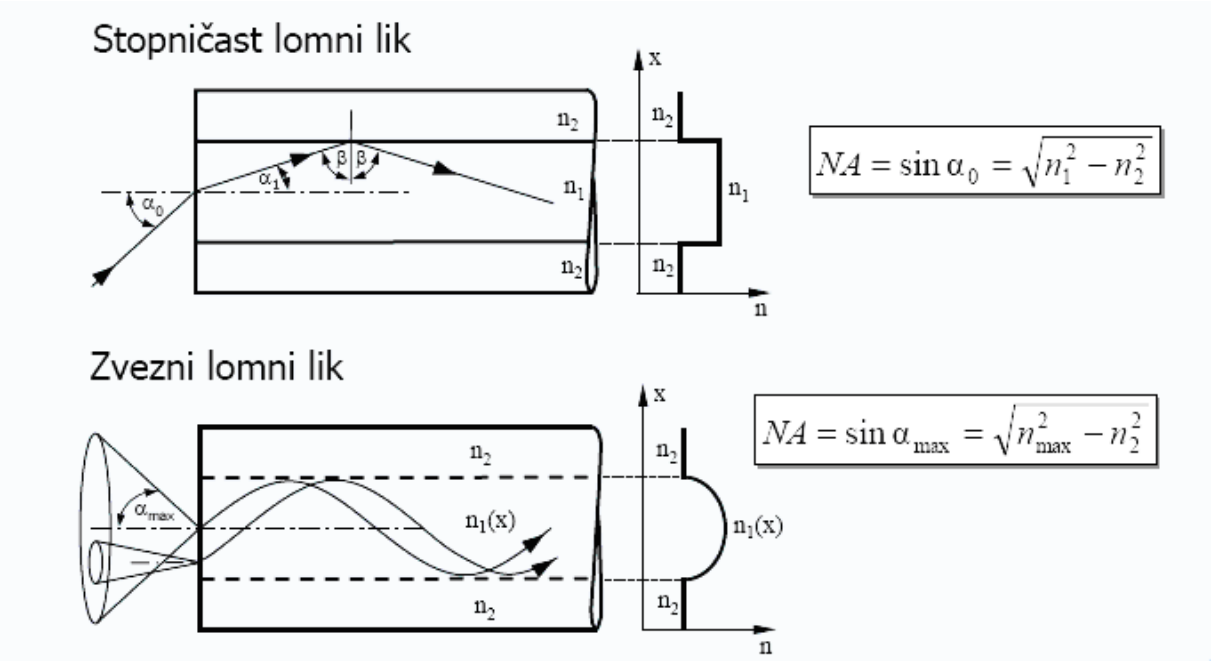
Slika 7-18. Meritev disperzije.

Mnogorodovna disperzija je parameter optičnega vlakna, ki je v veliki meri odvisen od natančnosti pri izdelavi vlakna. Kontrola končnega izdelka zato vključuje meritev mnogorodovne disperzije v obliki frekvenčne pasovne širine. Frekvenčna pasovna širina gradientnih vlaken je v velikostnem razredu 1 GHz·km in je natančno obratno sorazmerna z dolžino vlakna.

Za meritev mnogorodovne disperzije potrebujemo primerno dolg kos merjenca v velikostnem razredu 1 km. Disperzijo lahko opazujemo tako, da v merjenec pošljemo en sam kratek impulz. Meritev enostavneje izvedemo s sinusno moduliranim laserskim oddajnikom, pri čemer direktno dobimo frekvenčni odziv merjenca.

Kot merilnik modulacijskega signala uporabimo vektorski voltmeter, ker vsebuje občutljiv in selektiven sprejemnik, ki je hkrati manj občutljiv na motnje. Poleg tega ima vektorski voltmeter dva vhoda, da lahko hkrati merimo tudi jakost modulacijskega signala za laser. Pred meritvijo preverimo, da se vektorski voltmeter zanesljivo "ujame" na signal VF izvora in da APD-FET sprejemnik ni prekrmiljen.

Meritev pasovne širine mnogorodovnega optičnega vlakna je aktualna predvsem zaradi uvajanja Gigabit Ethernet tehnologije.



Slika 7-19. Numerična apertura.

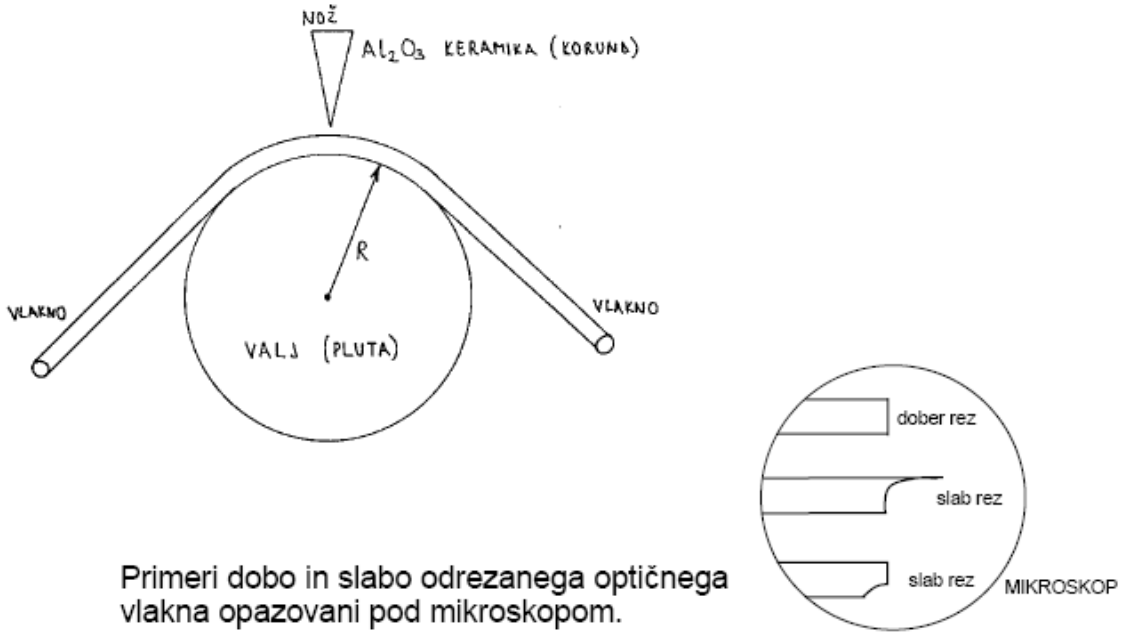
Eden najpomembnejših podatkov kakršnegakoli dielektričnega valovoda je numerična apertura (NA). Pove nam, kolikšna je kotna odprtina, skozi katero žarki vstopajo v vlakno in so v njem ujeti. To so tisti žarki, ki zadovoljujejo pogoj notranjega odboja na meji med jedrom in oblogo. Vlakno lahko sprejme le tiste žarke, ki vanj vstopajo dovolj položno. Žarki, ki vpadajo bolj strmo, izstopajo iz jedra v oblogo.

Numerična apertura povezuje lomni količnik jedra in lomni količnik obloge v pomembno veličino, ki opisuje elektromagnetne lastnosti optičnega vlakna. V mnogorodovnih optičnih vlaknih, v katerih se lahko širi zelo veliko število rodov, je numerična apertura preprosto sinus največjega vstopnega kota svetlobe, ki še izpolnjuje pogoj popolnega odboja na meji med jedrom z lomnim količnikom n_1 in oblogo z lomnim količnikom n_2.

Numerična apertura se vedno podaja kot sinus vpadnega kota svetlobe v praznem prostoru (lomni količnik enak enoti). Na ta način je numerična apertura enoveljavno podana za katerokoli optično vlakno. Pri spajanju dveh mnogorodovnih vlaken s stopničastim lomnim likom so izgube spoja majhne, ko sta premer jedra in numerična apertura izstopnega vlakna večja ali enaka primeru jedra in numerični aperturi vstopnega vlakna.

Gradientno optično vlakno ima običajno parabolični lomni lik. Numerična apertura je v tem primeru funkcija razdalje od osi vlakna in doseže največjo vrednost na sami osi vlakna. Kot podatek gradientnega vlakna se zato navaja premer jedra in maksimalna numerična apertura na osi vlakna. Tudi v primeru spajanja gradientnih vlaken so izgube majhne, ko sta premer jedra in maksimalna numerična apertura izstopnega vlakna večja ali enaka premeru jedra in maksimalni numerični aperturi vstopnega vlakna.

Šibkolomna vlakna imajo pri $n_1 \approx 1{,}45$ in $(1- n_2/ n_1)$ je od 0,001 do 0,01 kotno odprtino od približno 4 do 12 stopinj in numerično odprtino od 0,065 do 0,21.



Slika 7-20. Rezanje optičnega vlakna.

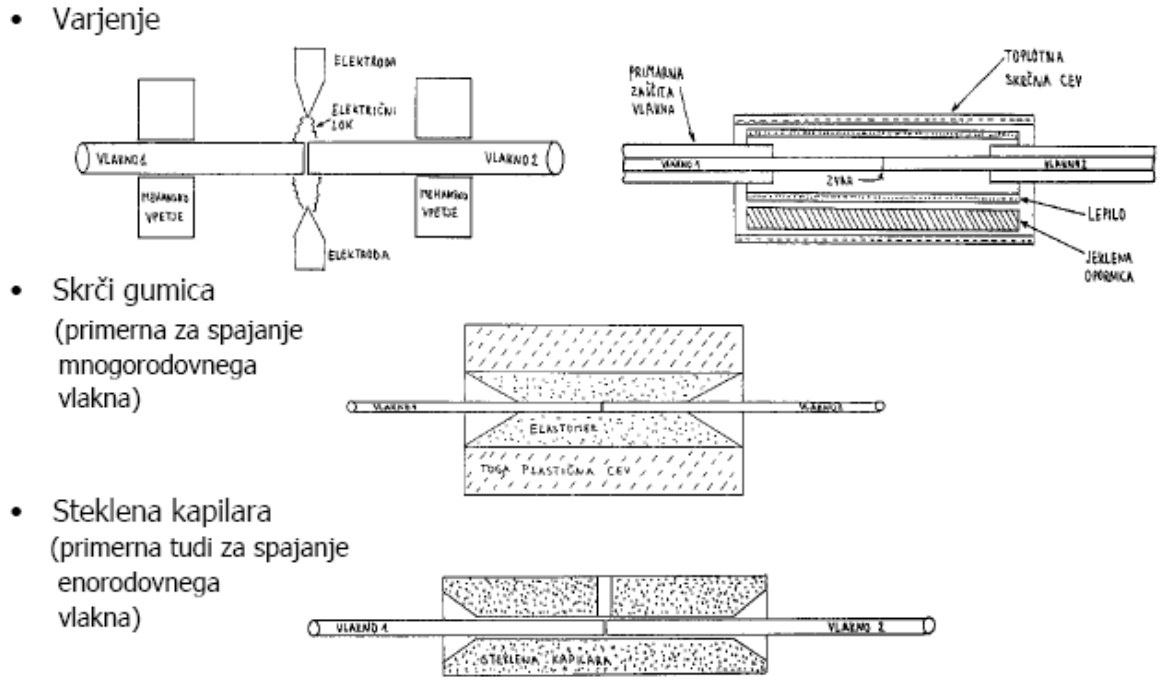
Zunanji premer vlakna (125 μm) in lomna količnika jedra in obloge so standardizirani, kar omogoča medsebojno spanje vlaken različnih proizvajalcev. Vlakna se med seboj povezujejo s spojkami. Razlikujemo med trdimi (varjenimi) in razstavljivimi spojkami.

Ne glede na vrsto spoja morata biti konca vlaken skrbno pripravljena za spoj. Najprej je potrebno odstraniti različne sloje zaščite. Le-to se lahko naredi mehansko, kemično ali toplotno. Vsako stekleno optično vlakno ima vsaj primarno akrilatno zaščito zunanjega premera 250 μm, ki stekleni del mehansko ščiti. Po odstranitvi zaščitnih slojev vlakno odrežemo z ustreznim keramičnim nožem.

Pri rezanju vlakna uporabljamo lastnost stekla, da se vlakno pod napetostjo lomi. V ta namen v vlakno najprej s keramičnim nožkom naredimo majhno zarezo (1 mikro meter). Nato vlakno upognemo na pluti in naša majhna zareza se podaljša v rez.

Pri rezanju in obdelavi koncev optičnih vlaken moramo biti zelo previdni, ker imamo opraviti z zelo majhnimi deli. Paziti moramo tudi na čistočo, saj že zrnce prahu povsem pokvari spoj dveh optičnih vlaken. Končno pazimo na to, da se nam tanko optično vlakno oziroma različni odrezki na mizi ne zapičijo v kožo, saj je odstranjevanje steklenih drobcev iz kože zelo boleče.

Prečni premik, vzdolžni razmik in zasuk sicer enakih vlaken lahko povzročijo nedopustno visoko stično slabljenje. Za prakso je predvsem pomembno, da je slabljenje vlakenskih spojk dovolj nizko zaradi velikega števila le-teh na dolžini vlakna.



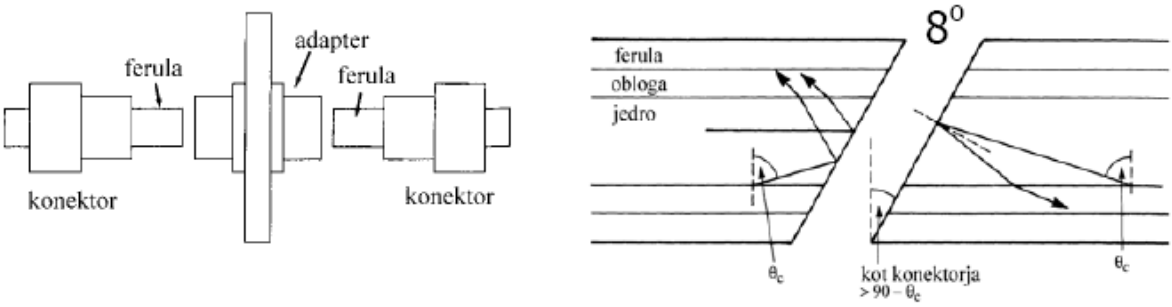
Slika 7-21. Spajanje optičnih vlaken.

Najboljša in trajna rešitev spajanja dveh vlaken je zvar. S sodobnimi varilnimi in merilnimi pripravami, ki omogočajo submikronsko nastavitev lege vlakna, je mogoče dobiti razmeroma nizko slabljenje spoja, manjše od 0,01 dB. Ker si spoji sledijo na odsekih, ki imajo tipično dolžino nekaj km, je dodatno slabljenje spojev preračunano na km dolžine že skoraj nepomembno.

Mesto zvara je potrebno takoj zaščititi, ker sta zvarjena konca vlakna brez vsakršne zaščite, zvar sam pa je v vsakem primeru mehansko najbolj oslabljeno mesto. Zvar zaščitimo s toplotno skrčno cevjo, ki jo navlečemo preko zvara in golih koncev obeh vlaken. Skrčna cev vsebuje lepilo in jekleno opornico, ki bo zaščitila zvar pred lomljenjem.

V primeru, ko ne potrebujemo trajne rešitve spajanja, izvedemo začasne spoje tako, da pravilno odrezana konca vlaken le približamo z elastomerom ali kapilarno cevko. Takšen spoj vlaken ni niti trajen niti mehansko trden in vnaša večje izgube od zvara. Upoštevati je treba tudi odboj svetlobe na prehodu steklo-zrak-steklo med konci vlaken. Odboj na vsaki od mej zrak steklo je 4 %, tako da se lahko v najslabšem primeru

nazaj odbije 16 %. Odboj znatno oslabimo z uporabo gela, ki ima podoben lomni količnik kot steklo.



	optično povratno slabljenje	
physical contact polish	PC	-30dB
ultra physical contact polish	UPC	-50dB
angled physical contact polish	APC	-60dB

Slika 22. Spajanje optičnih vlaken - KONEKTORJI.

Pri meritvah in v operativnih napravah potrebujemo spoje, ki jih lahko poljubno razstavljamo in sestavljamo s smiselno mero ponovljivosti. Takšen spoj lahko dosežemo le s konci vlaken, ki so vgrajeni v konektorje. Na tržišču obstaja cela vrsta optičnih konektorjev. Za spajanje optičnih vlaken je bilo do danes razvitih večje število različnih vrst konektorjev, med njimi tudi komplicirani z lečami in takšni, ki so potrebovali sprotno mazanje z mastjo za izenačevanje lomnih količnikov in s tem preprečevanje odbojev na koncih vlaken.

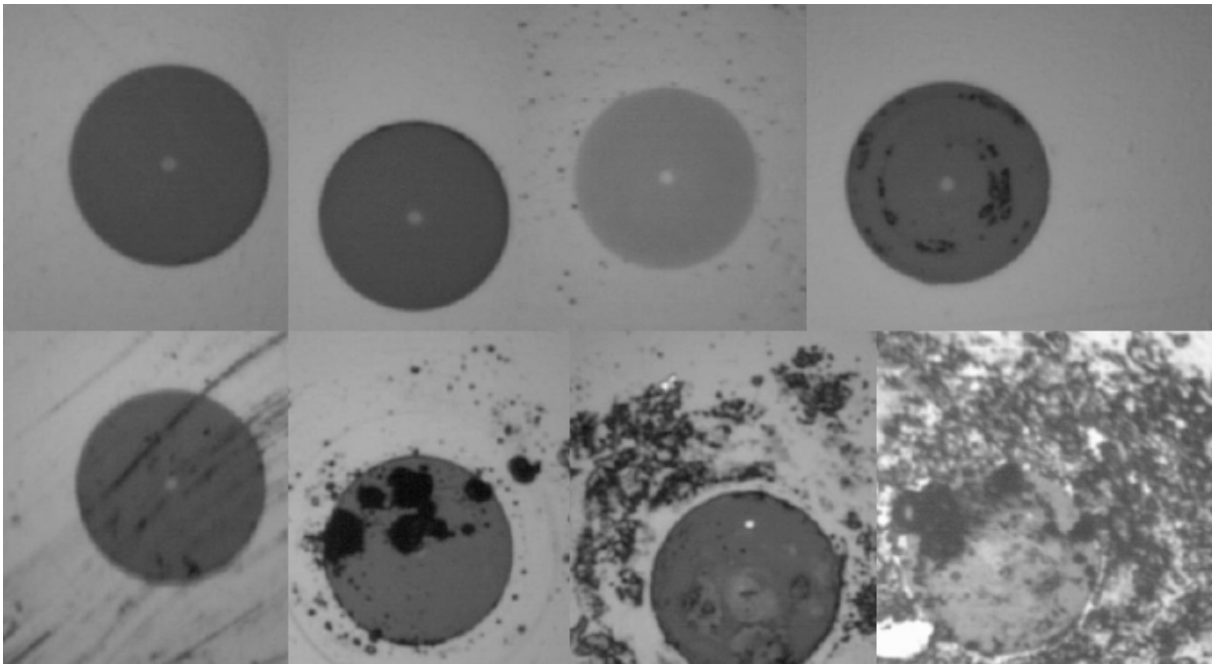
Po večini so vsi optični konektorji moškega spola, zaradi enostavnejšega čiščenja. Moški konektorji za medsebojno spajanje potrebujejo določene adapterje. Konektorji so po načinu spajanja lahko navojni (naprimer FC), bajonetni (naprimer ST) ali plastični zatični (naprimer SC).

Od vseh vrst konektorjev so se v optičnih komunikacijah najbolj uveljavili FC konektorji. Osnova FC konektorja je ferula - natančno brušena cevka iz jekla ali keramike z notranjim premerom 125 μm in zunanjim premerom 2.500 mm (toleranca ± 0.5 μm).

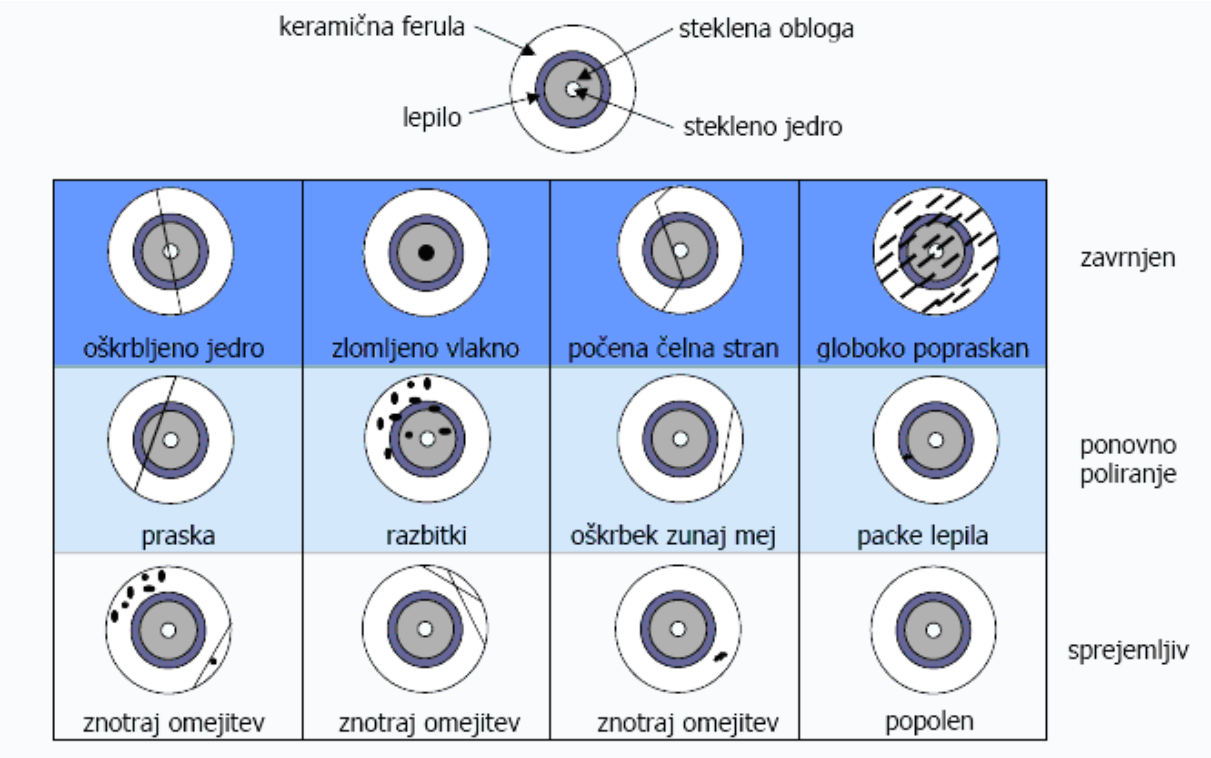
V notranjost ferule zalepimo golo optično vlakno, dve feruli pa spojimo s pomočjo okrogle vzmeti v spojnem konektorju. FC konektorji omogočajo izredno majhne izgube pod 0,5 dB tudi pri spajanju zahtevnih enorodovnih vlaken z jedrom manjšim od 10 μm. Izgube spoja so pravzaprav primerljive s samim odbojem svetlobe na meji steklo-zrak-steklo. Razen tega sama zasnova FC konektorja omogoča povsem kompaktne izboljšave,

kot so FC-PC konektorji ali najnovejši, poševno brušeni konektorji za zmanjševanje vpliva odbitih valov.

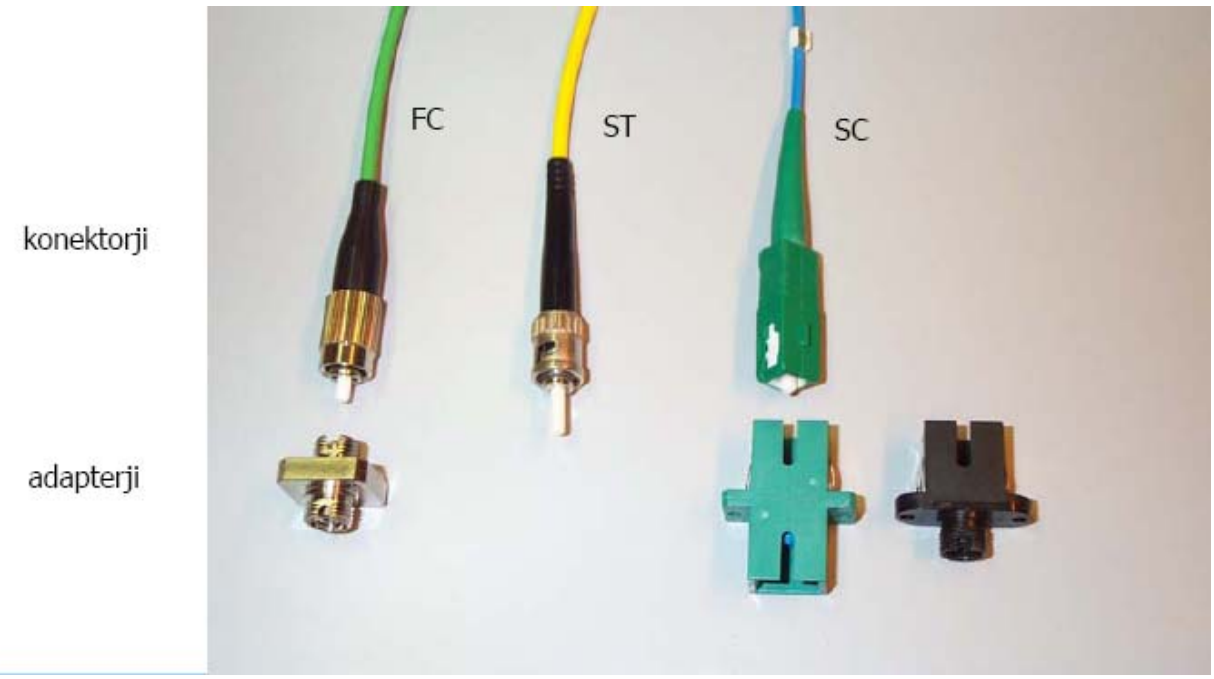
Za posebne aplikacije (CA TV) pa obstajajo tudi konektorji (AC), ki imajo sprednjo ploskev brušeno pod kotom nekaj stopinj (8°). Na ta način se izognemo povratnim odbojem od konektorja.



Slika 7-23. Primeri poškodovanih in umazanih optičnih konektorjev.



Slika 7-24. Vidne poškodbe optičnih konektorjev. Povzeto po Robert Rubin, "Fiber Optic Connectors: Meeting Polishing Demands", PHOTONICS SPECTRA, November 2003, pp. 62-66



Slika 7-25. Najpogostejši optični konektorji.

Slika 7-26. Optični kabli.

7.4. Viri v optičnih komunikacijah

Med zelo raznovrstnimi optičnimi viri uporabljamo v optičnih komunikacijah predvsem polprevodniške vire, v katerih nastaja v p-n spoju svetloba.

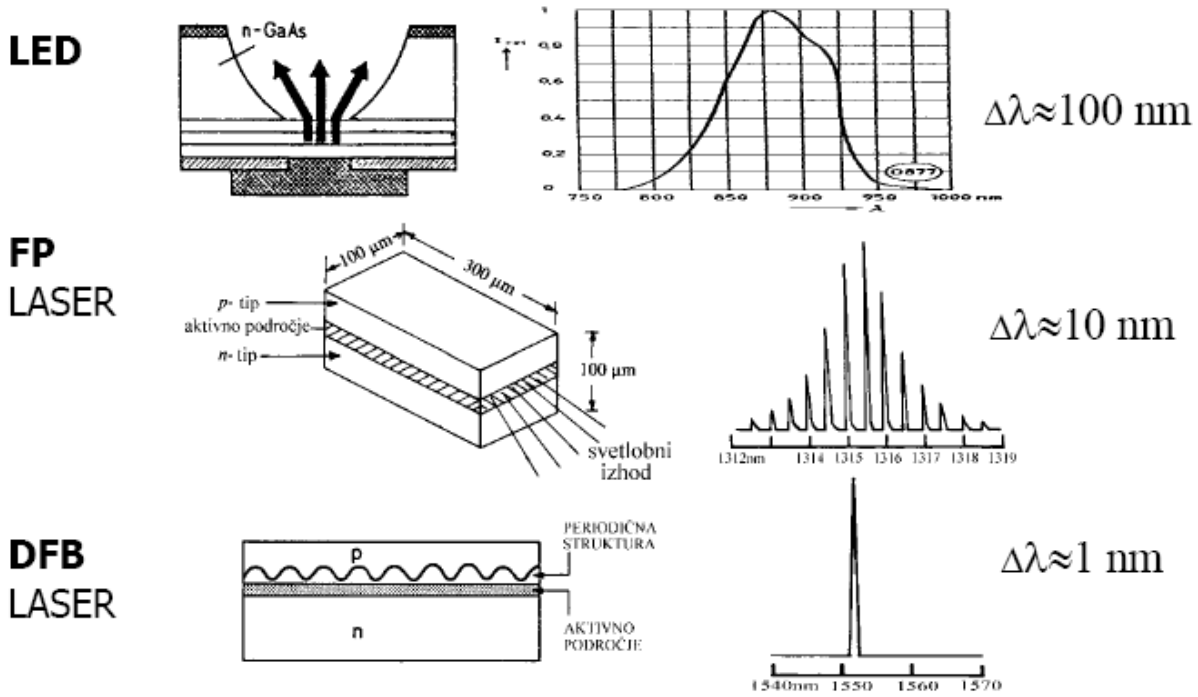
Svetleča dioda (LED) je vir nekoherentne svetlobe, ki s spontano emisijo nastaja v p-n spoju polprevodnika. Svetleča dioda ne uporablja resonatorja, ki bi dal povratno vez, potrebno za oscilator, zato štejemo svetlečo diodo kot šumni vir. Širina spektra svetleče diode znaša tipično $\lambda \approx 100$ nm oziroma $\Delta f \approx$ nekaj deset tisoč GHz. Zaradi te neprimerne širine spektra, ki je značilna za nekoherentno svetlobo, se svetleča dioda v optičnih komunikacijah uporablja zgolj za zelo kratke zveze.

Laserska dioda je vir delno koherentne ali nekoherentne svetlobe, ki nastaja s stimulirano (spodbujeno) emisijo v spoju p-n v območju resonatorja. Polprevodniški laser je dvojna heterostruktura, ki ima v območju spoja hkrati povišano koncentracijo nosilcev in svetlobnega polja. To omogoča učinkovito rekombinacijo parov elektron-vrzel in s tem nastajanje fotonov v območju močnega resonatorskega polja, kar je pogoj za nastanek plazovnega fotonskega pojava (lasing). Spoj deluje hkrati kot aktivna snov za vzdrževanje stimulirane emisije in kot planarni valovod za vodenje svetlobnega polja.

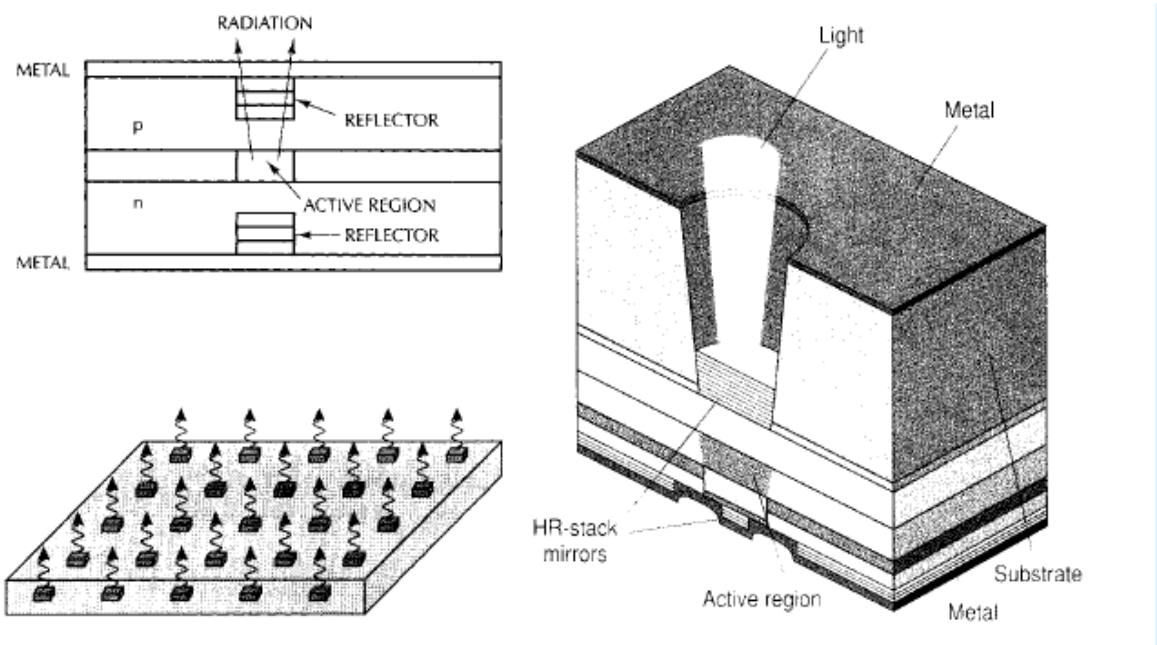
Bistveni element laserske diode je resonator, ki opravlja nalogo povratnega sklopa, potrebnega za vzdrževanje oscilacij, in je hkrati frekvenčno selektiven element, potreben za dodatno oženje frekvenčnega spektra stimulirane emisije. Po načinu, kako v resonatorju dosegamo resonančni pojav in vzdržujemo povratni sklop, razlikujemo:

- **Lasersko diodo FP (Fabry-Perot):** Resonator ima dolžino, ki znaša nekaj sto valovnih dolžin, in je na koncih omejen s planparalelnima frekvenčno neselektivnima zrcaloma (meja med snovjo GaAs aktivne plasti in zrakom). Laser niha na resonančnih valovnih dolžinah longitudinalnih rodov, kjer je dovolj veliko ojačenje aktivne snovi laserja. **Spekter laserja je torej mnogorodoven**.

- Lasersko fotodiodo na porazdeljen povratni sklop **(DFB - Distributed Feed-Back)**: V planarnem valovodu resonatorja je vgrajena periodična motnja lomnega količnika, ki učinkuje kot periodična struktura, na kateri se valovi sklapljajo v povratno smer, tako da odbiti valovi konstruktivno interferirajo. V tem primeru laser niha na valovni dolžini, ki je enaka dvakratni periodi vgrajene strukture.



Slika 7-27. Viri v optičnih komunikacijah.



Slika 7-28. VCSEL (Vertical Cavity Surface Emiting Diode) - Polprevodniški laserji z vertikalno resonančno votlino.

Izboljšane lastnosti komunikacijskih VCSEL glede na obstoječe komunikacijske laserje:

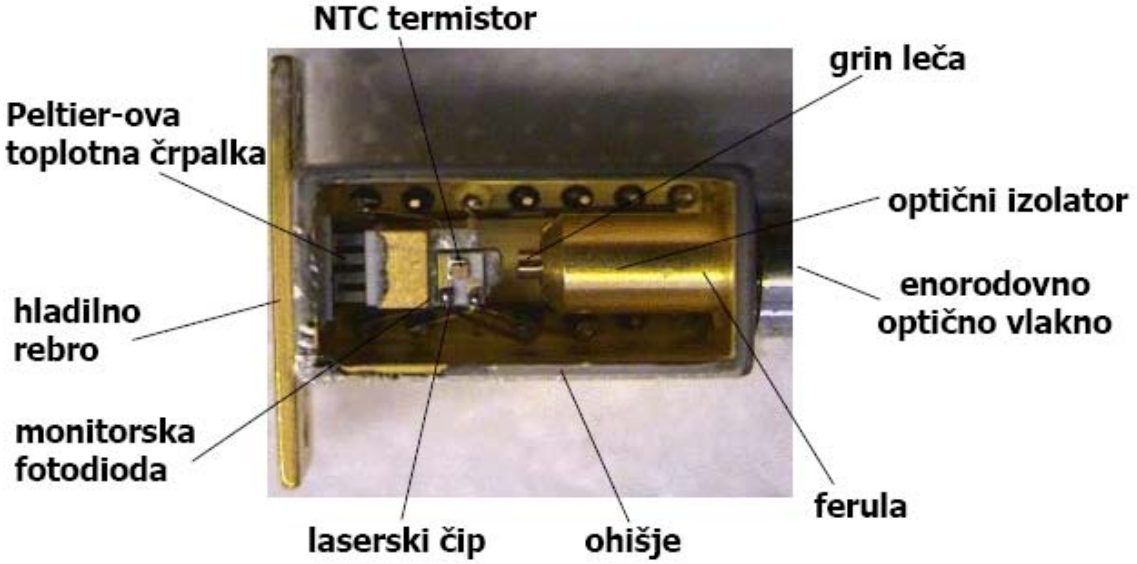
- majhne dimenzije,
- majhna vhodna moč za krmiljenje laserja,
- zelo nizek pragovni tok (do 0,1 mA) in nizek delovni tok (3mA pri 2,3V),
- visoka učinkovitost pretvorbe (do 47%),
- večje izhodne moči (do 50mW),
- velika spektralna čistost in hiter odziv (enorodovni izhod – do 2,7mW, stranski pasovi nižji za >20dB),
- daljša življenjska doba,
- učinkovitejši sklop čipa z optičnim vlaknom,
- sevalni diagram je krožen,
- možnost integracije v matrike 2x2 do 8x8,
- nižji stroški izdelave.

Značilnosti trenutnih praktičnih izvedb VCSEL z omenjenimi prednostmi:

- obstaja le za valovne dolžine med 750nm in 950nm,
- izvedene aktivne kvantne jame temeljijo na InAlGaAs,
- eptikasialna zrcala so izdelana iz GaAs substrata (morajo biti termično in električno prevodna),
- zanimive VCSEL strukture obstajajo tudi za 600nm,
- velike izgube valenčnega pasu aktivnega materiala.

Trenutne aktivnosti glede razvoja VCSEL potekajo na področju:

- zmanjšanja sistemskega šuma,
- zmanjšanje občutljivosti na povratni vpliv (refleksije),
- nadzora rodov in polarizacije izhodnega žarka,
- razširitve prenosnih zmogljivosti in paralelnega prenosa.



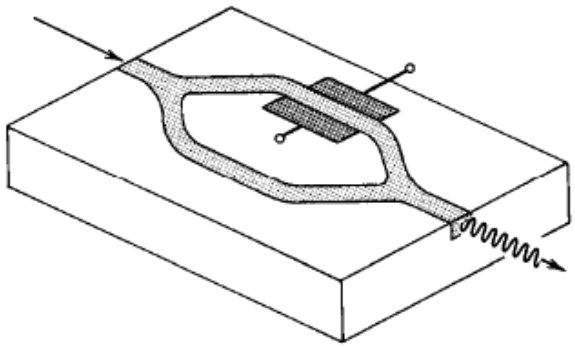
Slika 7-29. DFB laserska dioda.

V zahtevnejših optičnih povezavah prevladujejo laserji s porazdeljeno povratno vezavo (DFB – distributed-feedback), katere odlikuje zelo ozek spekter. Optične zveze izdelane z takimi laserji so precej manj občutljive na disperzijo.

Vendar je zaradi zgradbe in uporabljenih materialov pri tovrstnih laserjih **izhodna valovna dolžina odvisna od temperature laserskega čipa**.

Temperaturna sprememba valovne dolžine pri DFB laserju je manjša od temperaturnega koeficienta FP laserja in znaša tipično 0,08 nm/°C, lahko pa je v mejah od 0,02 nm/°C do 0,1 nm/°C [20]. Zato je pri tovrstnih laserjih nujna uporaba dragega pakiranja v 14-pinsko »butterfly« ohišje s termoelektričnim Peltier-ovim hladilnikom, ki prepreči drsenje valovne dolžine.

- direktna modulacija laserskega vira do **1 Gbit/s**
- zunanja modulacija laserskega žarka
  - InP WQW elekto-absorpcijski modulator
  - Mach-Zehnderjev $LiNbO_3$ modulator do **40 Gbit/s**



Slika 7-30. Intenzitetna modulacija v optičnih komunikacijah.

Za optične zveze se pogosto uporabljajo **preprosti analogni sistemi z direktno intenzitetno modulacijo (D-IM Direct Intensity Modulation)** optičnega nosilnika.

Večina sedanjih optičnih zvez uporablja neposredno modulacijo napajalnega toka skozi LED ali lasersko diodo. Izhodna moč laserja je v tem primeru modulirana v ritmu prenašanega analognega ali digitalnega signala. Pri tem je zelo pomembno, da je karakteristika P-I laserja kolikor mogoče linearna. S primerno konstrukcijo polprevodniških svetlobnih izvorov je mogoče doseči hiter odziv (1 ns) in razmeroma linearno krivuljo izhodne svetlobne moči v odvisnosti od krmilnega toka. Za digitalne optične zveze do hitrosti 1 Gbit/s je takšna rešitev povsem zadovoljiva.

Za višje hitrosti in za prenos analognih signalov, naprimer več deset TV programov po enem optičnem vlaknu, je odziv laserskih diod prepočasen. Poleg tega modulacija izredno razširi optični spekter tudi najboljših laserjev s porazdeljeno povratno vezavo (DFB). Posledica

razširjenega optičnega spektra je močno povečana disperzija, na kar so optične zveze pri hitrostih 2,5 Gbit/s in več še posebej občutljive.

Smiselna tehnična rešitev je zunanja modulacija. Pri tem se uporablja ločen modulator, tako da dela DFB laser v stabilnem režimu. Od vseh znanih fizikalnih pojavov, s pomočjo katerih lahko moduliramo svetlobni žarek, ima dovolj hiter odziv in dovolj veliko občutljivost za električne krmilne signale le **elektrooptični pojav**. Značilnost elektrooptičnega pojava je, da je lomni količnik snovi odvisen od zunanjega enosmernega ali nizkofrekvenčnega električnega polja. Za elektrooptične naprave je najprimernejši kristal **litijevega niobata (LiNbO3)**, v katerem so s pomočjo difuzije titana (Ti) izdelani planarni svetlovodi.

Ker uporablja večina sistemov optičnih zvez nekoherentne sprejemnike, ki so občutljivi le na amplitudo signala, fazni modulator vgradimo v interferometersko strukturo. Elektrooptični modulator ni brezizgubna naprava. Izgube v planarnem svetlovodu LiNbO3 znašajo okrog 0,1 dB/cm. Poleg tega se po 1 dB izgubi v vsakem smernem sklopniku in še po 1 dB v vsakem spoju optičnega vlakna na $LiNbO_3$ kristal. Najmanjše ustavitveno slabljenje modulatorja je zato okoli 5 dB, z ustreznimi krmilnimi napetostmi na elektrodah pa to slabljenje le še povečamo.

7.5. Detektorji v optičnih komunikacijah

Bistveni sestavni del sprejemniškega sistema je optični detektor (fotodetektor). To je sprejemni element, s katerim pretvarjamo optično moč v električno in s tem spreminjamo optični signal v električnega. Dober sprejemnik optičnega signala mora imeti sledeče lastnosti:

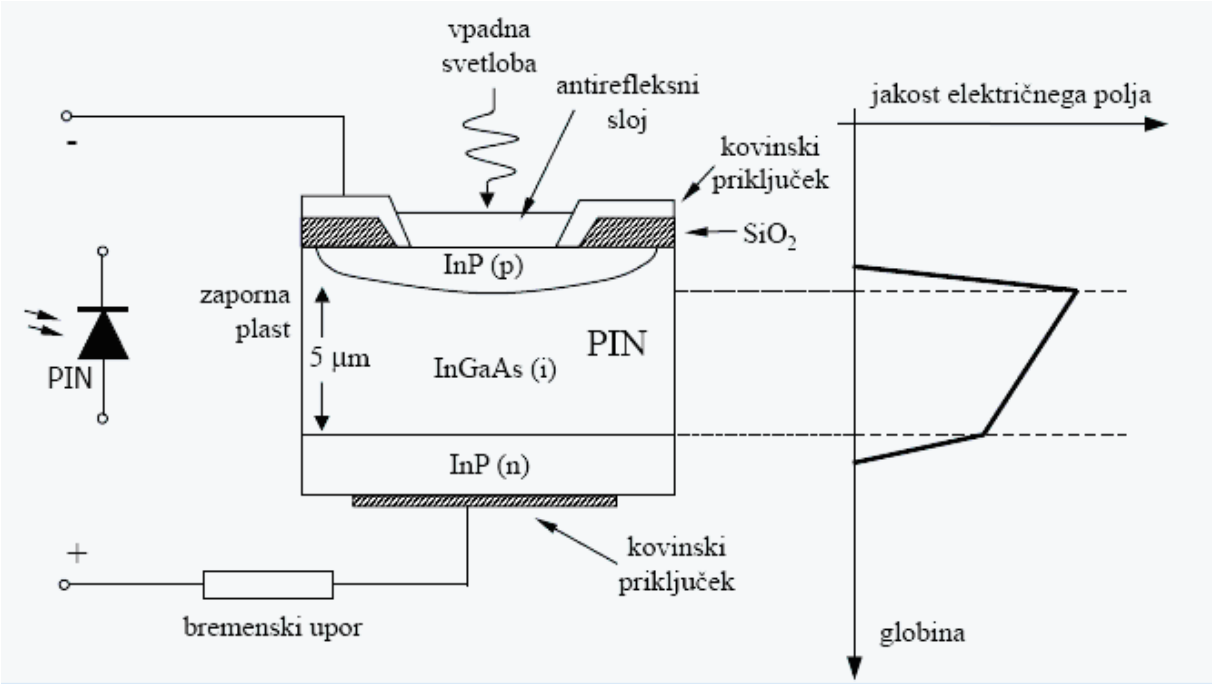
- *visoka občutljivost,*
- *širok frekvenčni pas detektiranega signala,*
- *nizka raven lastnega šuma,*
- *kratek odzivni čas,*
- *linearnost detekcije.*

Edini praktično uporaben pretvornik za pretvorbo svetlobnih signalov v električne za komunikacije po optičnih vlaknih so fotodiode različnih vrst. Pri vseh ostalih pretvornikih imamo počasen odziv, majhno občutljivost in slabo razmerje signal/šum.

Vse fotodiode za optične komunikacije se uporabljajo v zapornem režimu delovanja, kar pomeni, da imajo razmeroma debelo zaporno plast. Skoraj vsak foton vpadne svetlobe se v zaporni plasti pretvori v par elektron/vrzel in tako prispeva k električnemu toku, ki je izhodni signal fotodiode. Sodobne fotodiode imajo **visok kvantni izkoristek, običajno**

preko 80%, kar pomeni, da se več kot 80% vpadnih fotonov pretvori v pare elektron/vrzel in prispeva k izhodnemu toku.

Za delovanje v področju valovnih dolžin od 1300 nm do 1550 nm ne moremo več uporabljati silicijevih fotodiod, v poštev pridejo le germanijeve fotodiode in fotodiode iz III-V polprevodnikov (InGaAs).



Slika 7-31. Izvedba in delovanje PIN fotodiode.

Najenostavnejša fotodioda je PIN fotodioda. Fotodioda PIN je polprevodniški spoj, ki ima med plastema p in n visoke koncentracije primesi, široko vmesno osiromašeno plast z nizko koncentracijo primesi. Z reverzno napetostjo, s katero vsilimo plasti p negativni, plasti n pa pozitivni potencial, povzročimo drsenje fotoioniziranih parov elektron-vrzel. Pari elektron vrzel nastanejo z notranjim fotoelektričnim pojavom. Ko na fotodiodo vpade foton, ki ima dovolj veliko energijo, se njegova energija porabi za nastanek para elektron-vrzel. Fototok je sorazmeren vhodni moči.

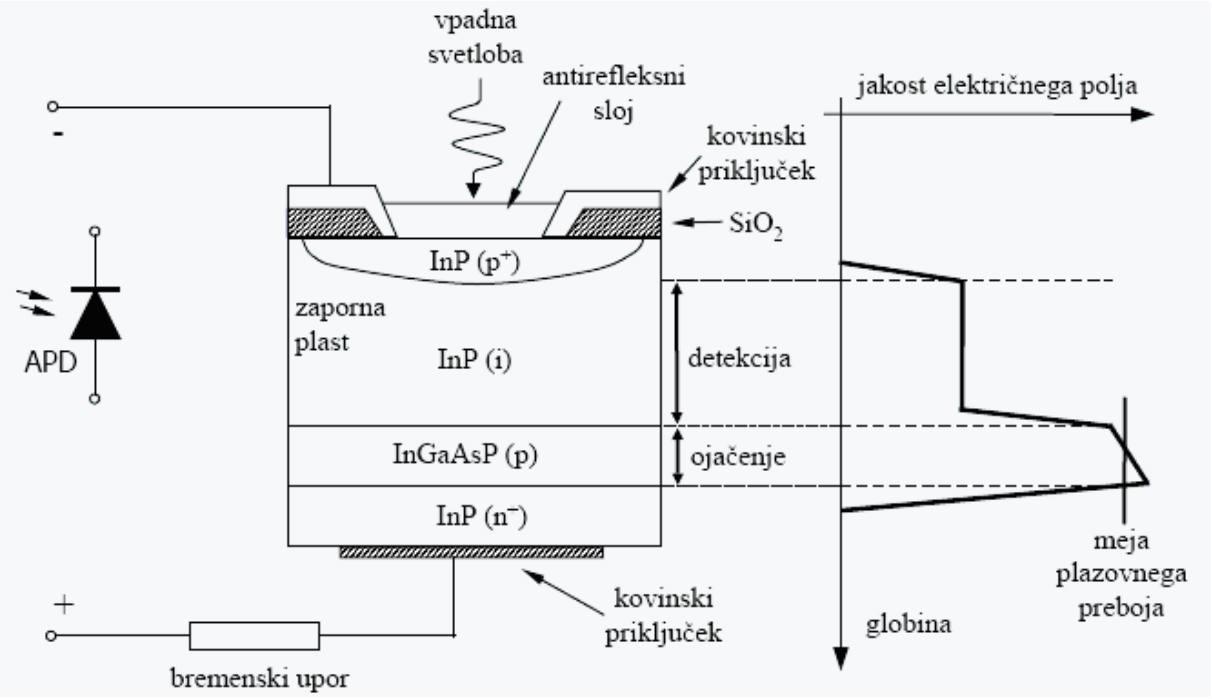
Fotodioda je izdelana iz materiala InGaAs, ki je primeren za sprejem svetlobe na valovnih dolžinah drugega in tretjega spektralnega okna, in ima kvantni izkoristek fotoionizacije (razmerje med številom parov elektron-vrzel in številom fotonov) 0,8. Kvantni izkoristek fotodiode izboljšujeta debela zaporna plast in antirefleksni sloj na površini diode.

Poleg fototoka, ki ga vzbuja vpadna svetloba, teče v fotodiodi v odvisnosti od zunanje svetlobe takoimenovani temni tok, ki je posledica notranjih termičnih procesov. Temni tok določa prag občutljivosti sprejema, zato želimo, da bi bil čim manjši. Omenjena fotodioda InGaAs ima temni tok 5 nA.

Izhodna električna moč detektiranega signala na delovnem bremenu R je sorazmerna kvadratu vhodne optične moči. To pomeni, da ima sprememba optične moči za, na primer, 1 dB za posledico spremembo električne moči za 2 dB.

Detektirani signal ojačujemo v radiofrekvenčnem ojačevalniku. Velika vrednost upornosti R delovnega bremena fotodetektorja je potrebna za to, da vhodni signal ojačevalnika dvignemo na čim višjo raven.

Za fotodetekcijo je potrebna nizka napetost zunanjega vira (reda 1 V). Fotodioda PIN se uporablja v optičnih zvezah, ki imajo optični ojačevalnik za ojačevanje svetlobnega signala, in v koherentnih optičnih zvezah.



Slika 7-32. Izvedba in delovanje plazovne fotodiode.

Občutljivost optičnih sprejemnikov omejuje šum električnega ojačevalnika, ki ojačuje signal s fotodiode. Problem ni rešljiv z uporabo boljšega nizkošumnega ojačevalnika, ker je že izhodna impedanca same fotodiode zelo neugodno visoka vrednost z veliko kapacitivno komponento.

Občutljivost optičnega sprejemnika s fotodiodo lahko zato izboljšamo edino tako, da vhodni signal ojačimo preden se pretvori v električni tok zunaj diode. V ta namen se poslužimo ojačevanja v sami fotodiodi z uporabo plazovnega pomnoževanja nosilcev elektrine.

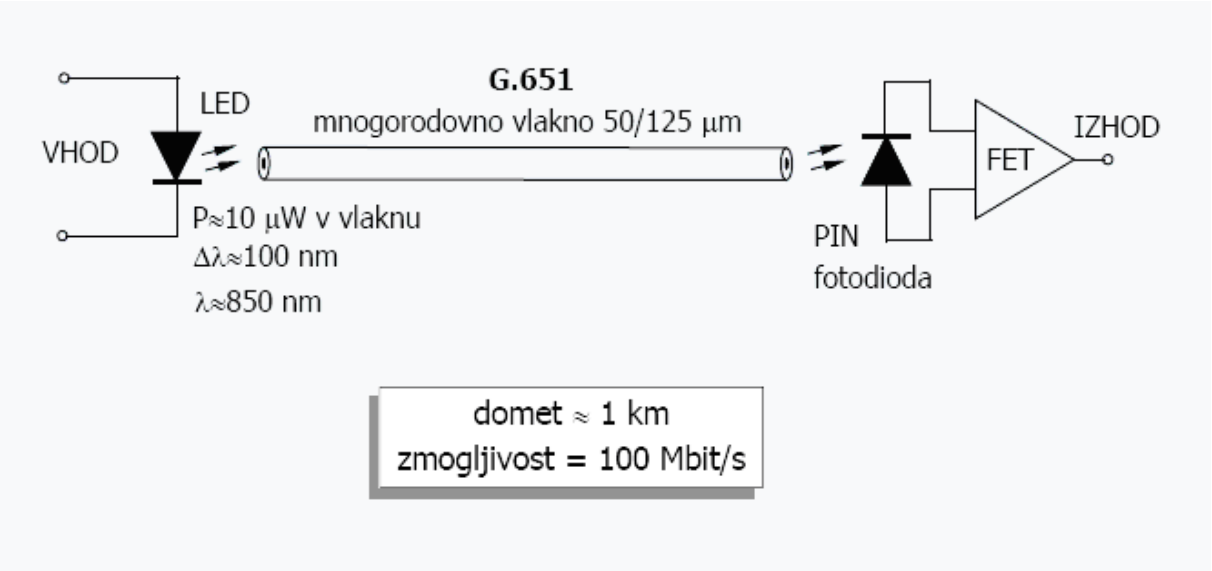
Razmeroma šibek fototok je mogoče ojačiti, če v diodi ustvarimo pogoje za nastanek notranjega ojačevanja tako, da sprožimo plazovni pojav fotoioniziranih parov elektron-vrzel. Notranje ojačenje dosežemo z udarno ionizacijo, ki jo povzročijo močno pospešeni nosilci v plasti, v kateri je prisotno močno električno polje.

Žal predstavlja plazovno ojačenje in plazovni preboj dodaten izvor šuma, ki lahko v neustreznih okoliščinah pokvari razmerje signal/šum sprejemnika. Fotodioda z grajenim plazovnim ojačenjem (Avelanche Photo Detector) je zato načrtovana tako, da dosežemo čim večje ojačenje signala in proizvedemo čim manj šuma.

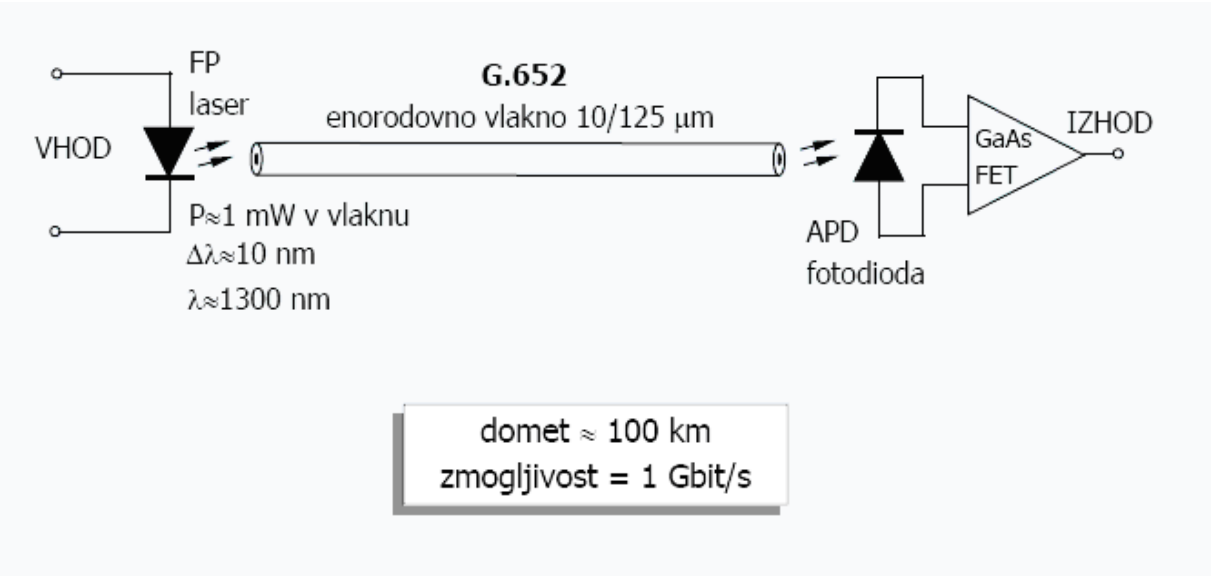
V plazovni fotodiodi je zaporna plast ločena na dva sloja:

- v gornjem sloju pride do detekcije svetlobe,
- v spodnjem sloju pa do plazovnega ojačenja nosilcev elektrine.

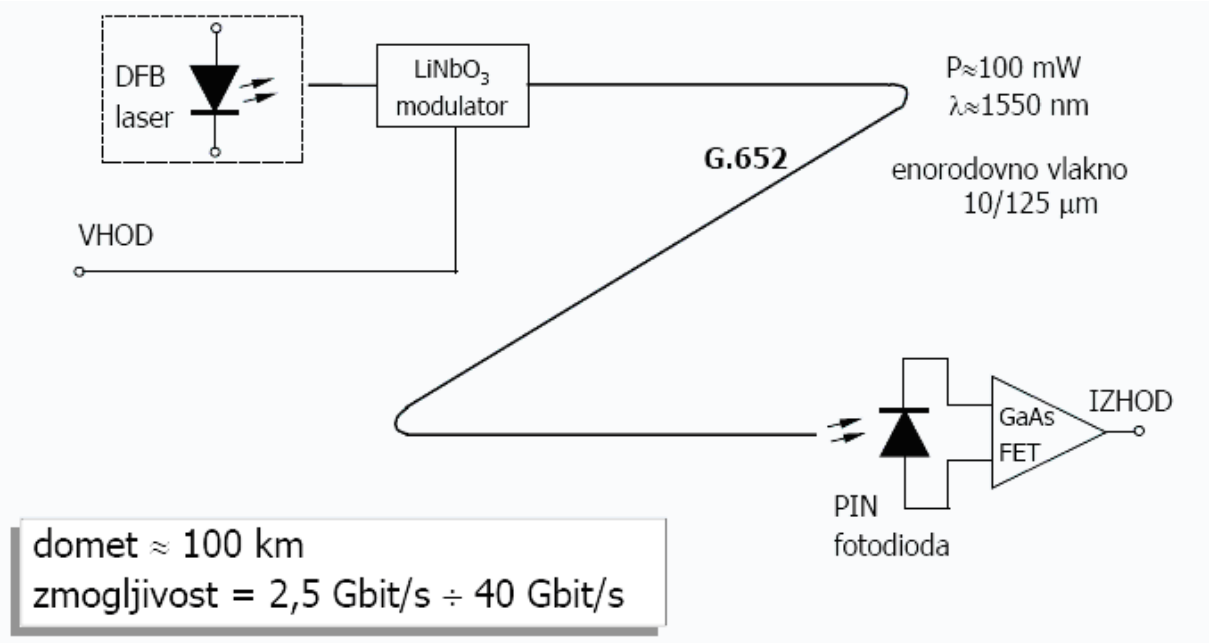
Ločitev detekcije in plazovnega ojačenja omogoča boljše razmerje signal/šum, ker na ta način plazovni mehanizem ne ojačuje nekaterih izvorov temnega toka fotodiode. Ločitev detekcije od plazovnega ojačenja dosežemo z uporabo različnih polprevodnikov v zaporni plasti, ki so izbrani tako, da električno polje preseže mejo plazovnega preboja samo v spodnji (ojačevalni) plasti, v zgornji plasti (detekcija) pa ne pride do plazovnega preboja. Vrednost plazovnega ojačenja lahko nastavljamo tudi od zunaj, z izbiro zaporne napetosti na fotodiodi.



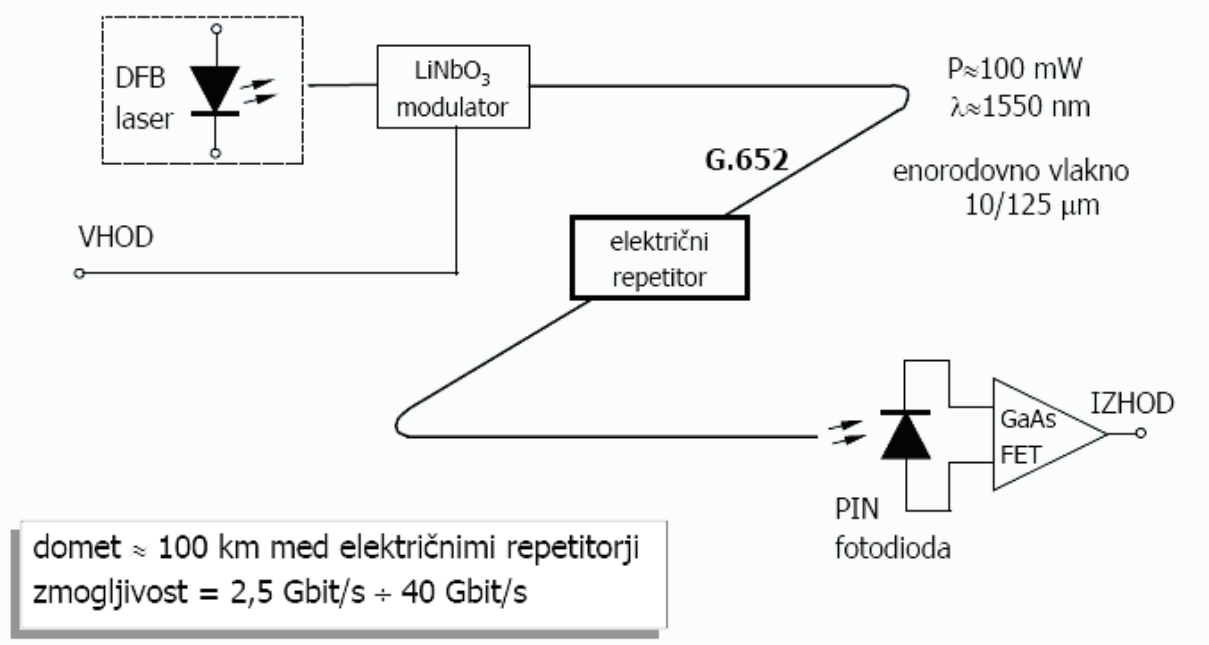
Slika 7-33. Optična vlakenska zveza z LED oddajnikom.



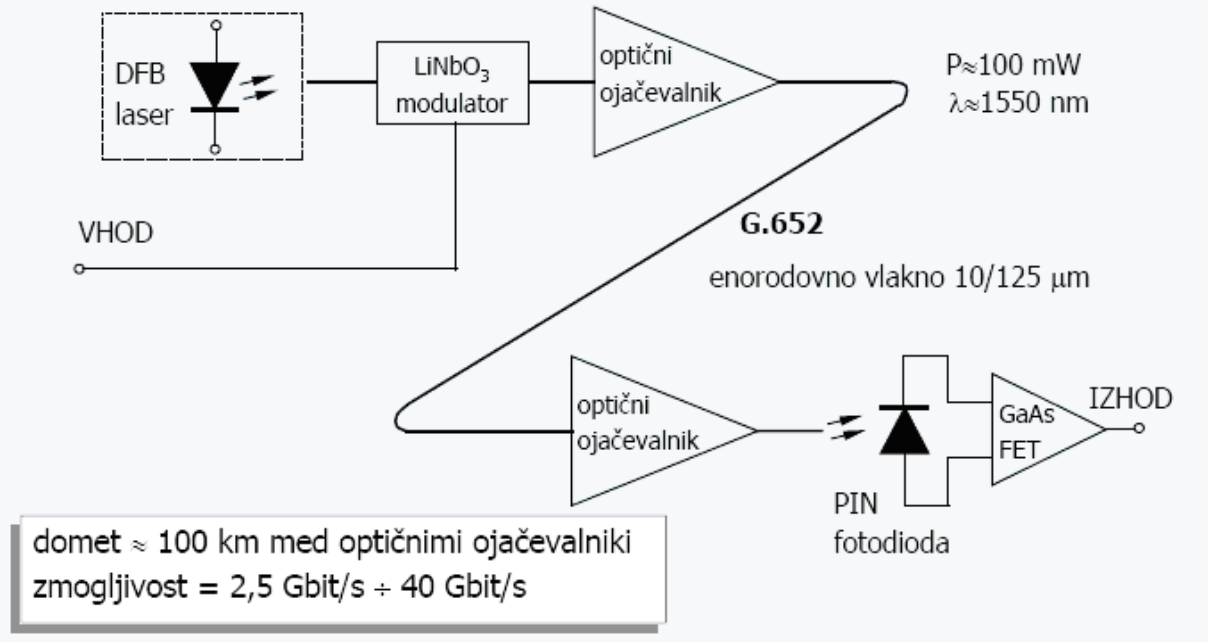
Slika 7-34. Optična vlakenska zveza s FP laserjem.



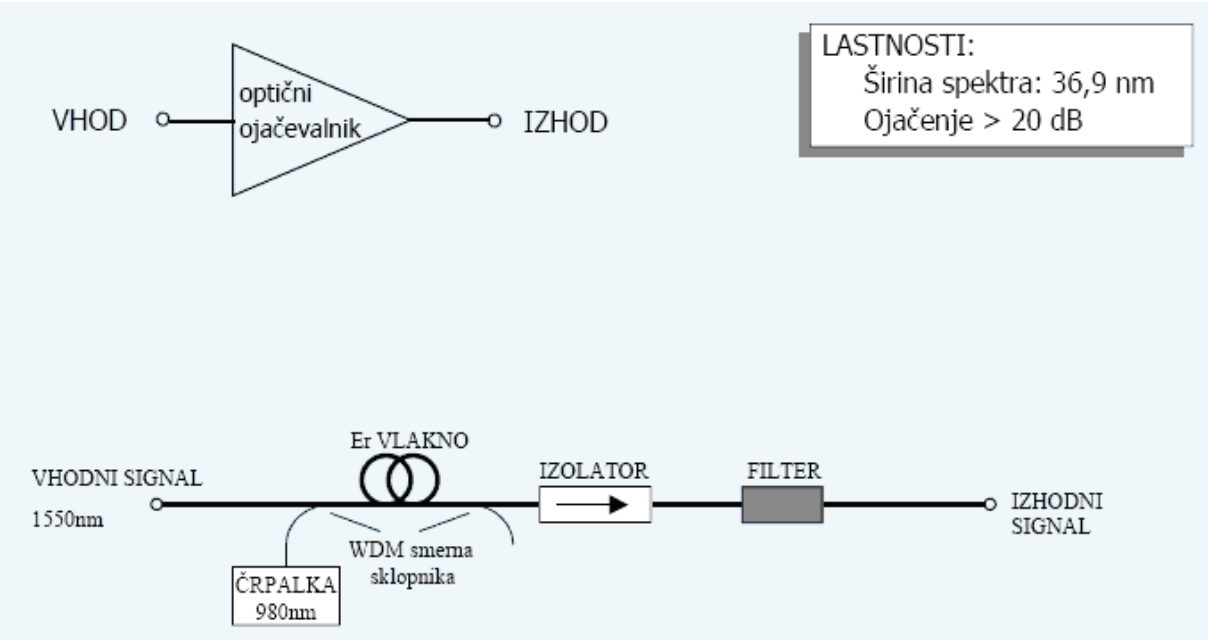
Slika 7-35. Optična vlakenska zveza z zunanjo modulacijo.



Slika 7-36. Optična vlakenska zveza z električnimi repetitorji.



Slika 7-37. Optična vlakenska zveza z optičnimi ojačevalniki.



Slika 7-38. EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) vlakenski ojačevalnik s primesjo erbija

Erbijev vlakenski ojačevalnik je bil izumljen leta 1987 in po letu 1990 so optični ojačevalniki pomembno zaznamovali razvoj optičnih komunikacij in izjemno vplivali na kakovost ter doseg optične zveze. Ojačevanje EDFA

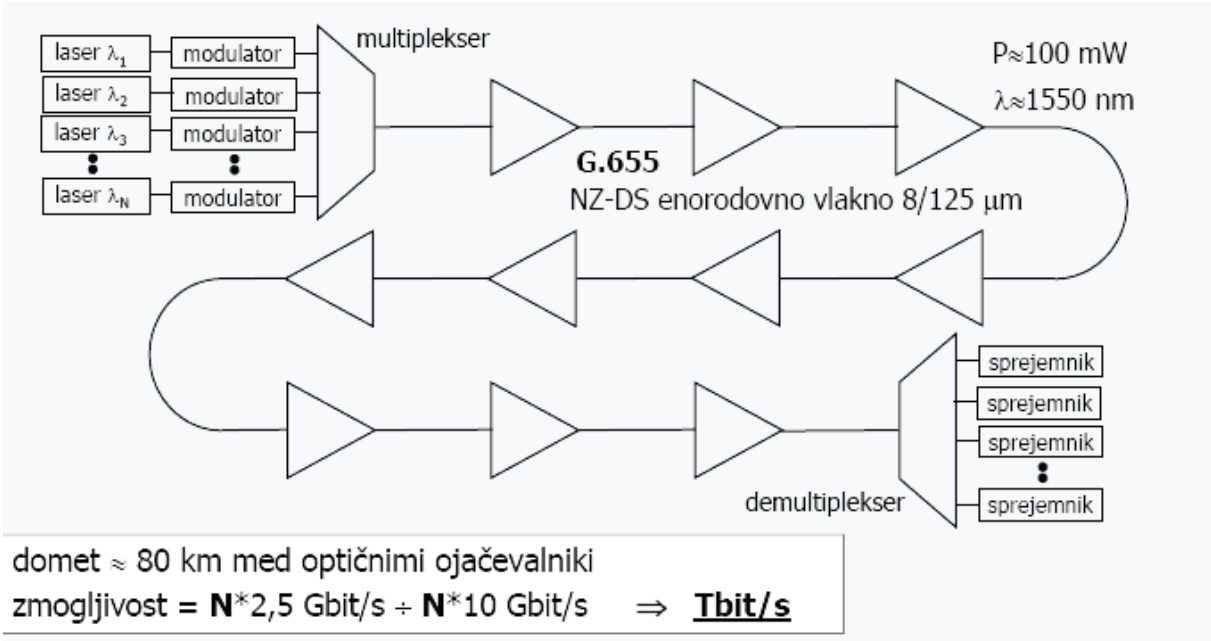
(Erbium Doped Fiber Amplifier) znaša od 30 dB do 40 dB v pasu od 1535 nm do 1565 nm.

Ključni sestavni del Erbijevega vlakenskega ojačevalnika je vlakno dolžine približno 10m, ki ima zelo tanko jedro in je obogaten z ioni Er+ (snov iz skupine elementov redkih zemelj). Poleg erbijevega vlakna je EDFA sestavljen še iz naslednjih elementov:

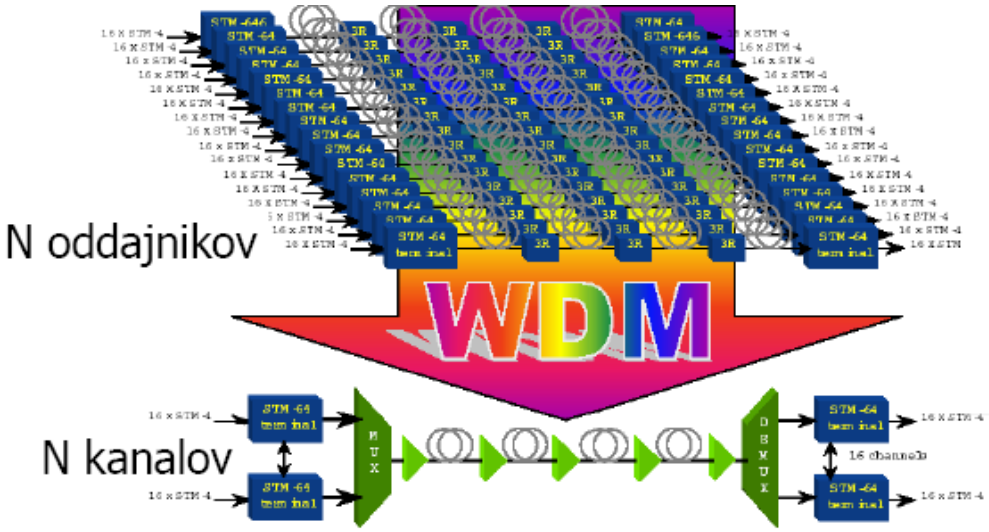
- Črpalni laser: 980 nm ali 1480 nm
- Optični vlakenski izolator
- WDM smerni sklopnik
- Optični filter - dolga periodična struktura

Energetske nivoje erbijevih ionov se črpa s svetlobo črpalnega signala. Kot črpalka se zlasti uporablja optični vir na valovni dolžini 980 nm ali 1479 nm. Pri prehodu delcev iz metastabilnega na osnovni nivo nastane stimulirana emisija (signal) in spontana emisija (šum) svetlobe v področju valovne dolžine 1550 nm. Ojačevalni proces je porazdeljen na celotni dolžini aktivnega vlakna. Hkrati s koristnim signalom ojačuje ojačevalnik tudi lasten šum, ki neizogibno nastaja s spontano emisijo v aktivnem delu vlakna, to pa je ob vseh prednosti tudi edina večja pomanjkljivost tega ojačevalnika.

Slika 7-39. WDM (Wavelength Division Multiplexing) tehnologija.



Slika 7-40. Zveza z valovno dolžinskim razvrščanjem.



Namesto uporabe večjega števila optičnih vlaken, se v eno optično vlakno uvede več valovnih dolžin (kanalov).

Slika 7-41. Ekonomski razlogi za uvedbo WDM.