

## Uvod u komunikacijske mreže i osnove arhitekture mreže

### 1. Vrste mreža

- kriteriji za razvrstavanje mreža
  - rasprostranjenost
    - ⇒ mreža širokog područja (*WideAN*)
      - Internet - globalna mreža širokog područja, sačinjavaju ju različite međusobno povezane mreže
    - ⇒ gradska mreža (*MetropolitanAN*) - za komunikaciju u većim urbanim središtima
    - ⇒ lokalna mreža (*LocalAN*) - povezivanje unutar zgrade ili skupine susjednih zgrada
    - ⇒ kućna mreža (*Home Network*)
    - ⇒ osobna mreža (*PersonalAN*) - povezuje uređaje u neposrednoj blizini ili vlasništvu osobe
    - ⇒ tjelesna mreža (*BodyAN*) - povezuje uređaje smještene na osobi (senzori, biomedicinska oprema)
  - namjena
    - ⇒ javna
      - dostupna korisnicima s ugovornim odnosom s mrežnim operatorom
      - Internet, PTSN<sup>1</sup>, ISDN<sup>2</sup>, GSM<sup>3</sup>, GPRS<sup>4</sup>, EDGE<sup>5</sup>, UTMS<sup>6</sup>, HSPA<sup>7</sup>, LTE<sup>8</sup>
    - ⇒ privatna
      - namijenjena ograničenoj skupini korisnika unutar iste zajednice (*Academic Research Network, corporate network*)
  - vrsta informacije
    - ⇒ razvitak od mreža s jednim osnovnim medijem (govor - telefonska, podatak - Internet) prema mrežama sposobnim za više vrsta informacije (*multimedia*) i pružanje više usluga u istoj mreži (*multiservice*)
    - ⇒ konvergencija prema integraciji više medija i njihovom objedinjenom tretiranju
    - ⇒ danas u tijeku konvergencija prema višeuslužnim i višemedijskim mrežama, s paketskom komunikacijom i zajedničkim mrežnim protokolom
  - način razmjene informacije
    - ⇒ komunikacijski kanal
      - put kroz mrežu definiranog kapaciteta između izvorišnog i odredišnog čvora
      - dodjela na zahtjev (npr. pozivanjem) ili trajno (npr. najmom)
      - tijek komunikacije:
        - uspostavljanje veze - čvorovima se dodjeljuje put kroz mrežu, dodijeljeni kanal je raspoloživ do prekidanja veze i dotad zauzima mrežne resurse
        - razmjena informacije - dodijeljeni resursi su zauzeti neovisno o tome razmjenjuje li se informacija ili ne
        - prekidanje komunikacije - oslobađanje mrežnih resursa
      - prikladan za kontinuirani protok informacija u stvarnom vremenu (razgovor)
    - ⇒ informacijski paket
      - informacija se dijeli na blokove kojima se dodaje zaglavlje s upravljačkom informacijom i formiraju paketi koji se prenose mrežom
      - mrežni resursi se zauzimaju samo tijekom prijenosa paketa
      - može doći do kašnjenja paketa koji čekaju na daljnje usmjeravanje u nekom čvoru
      - dio kapaciteta se troši na prijenos zaglavlja

---

<sup>1</sup> Public Switched Telephony Network; telefonska mreža

<sup>2</sup> Integrated Services Digital Network

<sup>3</sup> Global System for Mobile communications

<sup>4</sup> General Packet Radio Service

<sup>5</sup> Enhanced Data rates for Global Evolution

<sup>6</sup> Universal Mobile Telecommunication System

<sup>7</sup> High Speed Packet Access

<sup>8</sup> Long Term Evolution

- usmjeravanje paketa:
  - datagramski
    - svaki paket se usmjerava zasebno kroz mrežu, neovisno o ostalima
    - moguće da datagrami za isto odredište putuju različitim putovima i da redoslijed slanja nije jednak redoslijedu primitka - ovisi o duljini puta, kapacitetu i trenutnom opterećenju putova
  - virtualni kanal
    - oponašanje stvarnog kanala
    - svi paketi prolaze istim putem od izvora do odredišta
    - unaprijed se određuje put kojim će prenositi, nema isključiv pristup mrežnim resursima - moguća kašnjenja
    - uspostavlja se put kojim će prolaziti svi paketi i označava u mrežnim čvorovima; svi paketi njime stižu na odredište
    - po završetku komunikacije se može prekidati ili biti trajno uspostavljen

⇒ topologija mreže

- opisuje međusobnu povezanost čvorova
- fizička - način povezivanja čvorova prijenosnim medijima
- logička - proizlazi iz komunikacijskog protokola
- fizička i logička topologija se mogu, ali ne moraju podudarati, i nad jednom fizičkom je moguće ostvariti više logičkih topologija
- regularne topologije
  - potpuna povezanost
    - izravno povezana svaka dva čvora
    - primjena za mreže s manjim brojem čvorova ili na ograničenom području zbog velikih troškova povezivanja / velikog broja veza
  - zvijezda
    - središnji čvor na kojeg su spojeni svi ostali, posrednik u komunikaciji
    - jednostavno dodavanje novog čvora u mrežu
    - povećana osjetljivost na kvarove - ispad središnjeg čvora onemogućuje komunikaciju
    - primjena: na ograničenom području (lokalno) gdje je lako otkloniti kvar središnjeg čvora, priključak na telefonsku mrežu
  - sabirnica
    - zajednički prijenosni medij za sve priključene čvorove
    - po potrebi / na zahtjev povezuju bilo koja dva čvora - potrebni mehanizmi dodjele prava komuniciranja pojedinom čvoru i sprječavanja pristupa ostalih tijekom komunikacije određena dva čvora
    - osjetljiva na kvarove - prekid onemogućuje komunikaciju između odvojenih čvorova, a možda i u potpunosti (povezivanje pomoću više sabirnica)
    - primjena u lokalnim mrežama izvedenim koaksijalnim kabelima
  - prsten
    - svi čvorovi priključeni na zajednički prijenosni medij koji stvara zatvoren put
    - obilježja slična sabirnici (mehanizmi dodjele prava komunikacije, prekid onemogućuje komunikaciju, pouzdana rješenja pomoću dvostrukih prstenova)
    - tok informacija između svaka dva čvora se ostvaruje istim smjerom - moguće velike brzine prijenosa
    - primjena: brze optičke mreže velikog kapaciteta (u RH optičke gradske i regionalne mreže)
  - stablo
    - hijerarhijsko umrežavanje
    - komunikacija čvora s njegovim neposredno nadređenim je izravna, a sve ostale su posredne putem čvorova viših razina
    - razine proizlaze iz organizacije javne mreže ili ustrojstva korporacija
    - osjetljivost na kvarove slična kao kod zvjezdaste topologije (kritičniji su čvorovi više razine)

- susreću se i hibridna rješenja (npr. nacionalna telefonska mreža je hijerarhijski strukturirana, ali su čvorovi najviše razine međusobno potpuno povezani, dok se krajnji korisnici zvjezdasto spajaju na mrežu)

## 2. Arhitektura mreže

- horizontalna dekompozicija
  - pristupna mreža (*access network*) - pristup za korisnike / korisničku opremu
  - jezgrena mreža (*core network*) - povezivanje sustava u pristupnoj mreži, komunikacija s drugim mrežama
- različite izvedbene tehnologije - žično, bežično, optički
- vertikalna dekompozicija
  - uvođenje mrežnih slojeva u svrhu smanjenja složenosti oblikovanja
  - svakom sloju se specificiraju funkcije i sučelja sa susjednim slojevima (svaki sloj nudi uslugu višem sloju, skrivajući rješenja nižih razina)
  - namjene slojevite arhitekture
    - ⇒ definiranje koncepata i normiranje komunikacijskih sustava i mreža
    - ⇒ utvrđivanje pravila povezivanja sustava u mrežu te mreža međusobno
    - ⇒ stvaranje otvorenih rješenja, neovisnih o proizvođaču opreme ili mrežnom operatoru
  - osnovni slojeviti modeli:
    - ⇒ pojmovi:
      - sloj - građen od jednog ili više entiteta koji obavljaju funkcije
        - (N)-sloj sadrži (N)-entitete koji obavljaju (N)-funkcije
        - osnovne i obvezne funkcije
          - identificira sustave koji komuniciraju
          - određuje smjer prijenosa podataka (jednosmjerno - *simplex*, dvosmjerno istovremeno - *full-duplex*, dvosmjerno naizmjenično - *half-duplex*)
        - dodatno
          - upravljanje pogreškama
          - upravljanje tokom podataka
          - usmjeravanje jedinica podataka
          - posluživanje više komunikacija koje je pokrenuo viši sloj
        - koncept obuhvaća usluge sloja, sučelja sa susjednim slojevima i komunikacijske protokole; za (N)-sloj:
          - (N)-usluga definirana mogućnostima koje (N)-sloj i slojevi ispod njega pružaju (N + 1)-sloju
          - sučelje (N + 1) i (N) sloja definirano točkom pristupa usluzi (N)-SAP<sup>9</sup>
          - (N)-protokol - određuje pravila i formate komunikacije za taj sloj
      - protokolna jedinica podataka<sup>10</sup> - strukturirana informacija koja se prenosi unutar (N)-sloja između izvora i odredišta
        - prijenos od višeg prema nižim slojevima na izvoru:
 
$$(N)\text{-SDU}^{11} = (N + 1)\text{-PDU}$$

$$(N)\text{-PDU} = ((N)\text{-PCI}^{12}, (N)\text{-SDU})$$

$$(N-1)\text{-SDU} = (N)\text{-PDU}$$
        - prijenos od nižeg prema višim slojevima na odredištu:
 
$$(N-1)\text{-PDU} = ((N-1)\text{-PCI}, (N-1)\text{-SDU})$$

$$(N-1)\text{-SDU} = ((N)\text{-PCI}, (N)\text{-SDU})$$

$$(N)\text{-PDU} = (N-1)\text{-SDU}$$
        - ako (N+1)-PDU > (N)-SDU, provodi se fragmentiranje podataka na izvoru i ponovno sastavljanje fragmenata na odredištu, a pojedini fragmenti se označavaju posebnim parametrom u PCI da se omoguću ponovno sastavljanje

<sup>9</sup> Service Access Point

<sup>10</sup> Protocol Data Unit, PDU

<sup>11</sup> Service Data Unit - uslužna jedinica podataka

<sup>12</sup> Protocol Control Information - protokolna upravljačka informacija, npr. adresa, veličina jedinice podataka, zaštitni kod itd.

- komunikacijski protokol - skup pravila, formata i postupaka za razmjenu informacije unutar sloja
    - pravila - opis načina razmjene informacije između dva entiteta u mreži kojim se ostvaruje usklađenost izvorišnog i odredišnog entiteta te zaštita od mogućih pogrešaka ili kvarova
    - formati - određuju izgled i sastav jedinice podataka koja se koristi za razmjenu informacije
  - protokolni složaj (*protocol stack*) - skup protokola koji se primjenjuju u slojevima nekog modela ili sustava
  - razmjena jedinica podataka - vrste usluga:
    - spojna (*connection-oriented*) - uspostavljanje veze prije razmjene podataka i prekidanje veze nakon razmjene
      - stvarna veza - jedinice podataka se prenose istim fizičkim kanalom
      - virtualna veza - virtualni kanal
      - logička veza - obilježavanje jedinica podataka da se označi njihova pripadnost nekoj komunikaciji
    - nespojna (*connectionless*) - svaka jedinica podataka se razmjenjuje neovisno o ostalima (npr. datagramski prijenos paketa u Internetu)
- ⇒ OSI RM<sup>13</sup> - veća vrijednost na konceptualnoj i teorijskoj razini
- sedam slojeva:
    7. aplikacijski sloj - definira usluge i aplikacije za korisnike
    6. prezentacijski / predodžbeni sloj - određuje prikaz i značenje informacije koja se razmjenjuje na način da propisuje kodove, formate i strukturu podataka
    5. sjednički sloj / sloj sesije - usklađuje rad sustava u komunikaciji
      - uspostavlja, održava i prekida dijalog
      - dodjeljuje prava za komuniciranje
      - moguće nastavljjanje komunikacije u slučaju prekida izazvanog smetnjama ili kvarovima
    4. transportni sloj - prijenos jedinica podataka s kraja na kraj mreže uz zadovoljenje kriterija transparentnosti
      - semantička transparentnost - razmjena podataka bez pogrešaka (važno za npr. podatke na webu - WWW)
      - vremenska transparentnost - razmjena podataka uz najmanje moguće kašnjenje (važno za npr. prijenos govora)
    3. mrežni sloj - komunikacija između krajnjih čvorova, izravno ili preko međučvorova (komunikacija s kraja na kraj mreže)
      - jedinica podataka - ovisi o vrsti mreže: npr. paket (paketske mreže)
      - osnovne funkcije:
        - usmjeravanje jedinica podataka
        - međusobno povezivanje mreža i podmreža
        - mogućnost upravljanja pogreškama i tokom
    2. sloj podatkovne poveznice - komunikacija između dva izravno povezana čvora
      - jedinica podataka: okvir (*frame*)
      - osnovne funkcije:
        - prijenos okvira od točke do točke ili od točke do više točaka
        - mogućnost upravljanja pogreškama i tokom podataka
    1. fizički sloj - funkcije potrebne za ostvarivanje komunikacije fizičkim prijenosnim medijem
      - jedinica podataka: bit
      - osnovne funkcije:
        - prijenos slijeda bita
        - mehaničko, električko ili fotoničko i vremensko sučelje s prijenosim medijem (žični, optički, bežični)

<sup>13</sup> Open System Interconnection Reference Model - referentni model povezivanja otvorenih sustava

- osnovne zadaće:
  - fizički sloj - svladavanje udaljenosti pri komunikaciji
  - sloj podatkovne poveznice i mrežni sloj - povezivanje entiteta koji komuniciraju
  - transportni sloj i viši slojevi - sama komunikacija
- ⇒ model TCP/IP (internetski model) - veća vrijednost u primjeni
- četiri sloja:
  4. aplikacijski sloj
  3. transportni sloj (TCP<sup>14</sup>)
  2. mrežni / internetski sloj (IP<sup>15</sup>)
  1. nije definiran
- osnovna zamisao modela:
  - jednostavan i učinkovit mrežni protokol IP
    - dostavlja pakete s izvora na odredište na najbolji mogući način u danim uvjetima
    - neovisan o izvedbi fizičkog i sloja podatkovne poveznice
    - jednostavno međusobno povezivanje mreža
  - transportni protokol TCP - održava semantičku transparentnost (vremenska transparentnost zahtijeva drukčije rješenje)
  - prezentacijske i sjedničke funkcije vezane uz pojedinu aplikaciju
- mrežni sloj
  - međusobno povezivanje mreža i podmreža (*internetworking*)
  - IP - središnja uloga, uz njega se koriste i dodatni protokoli za usmjeravanje, kontrolu komunikacije i komunikaciju u skupini s više od dva krajnja čvora
    - nespojna usluga
    - glavna zadaća u Internetu - usmjeravanje paketa i njihova isporuka na ispravno odredište (problemi redoslijeda slanja ili gubitaka paketa su ostavljeni višim slojevima na rješavanje)
    - važan za konvergenciju mreža - sve više mreža ga preuzima
    - različite izvedbe i rješenja nižeg sloja (IP preko X - npr. IPoDWDM<sup>16</sup>)
    - različite izvedbe i rješenja za usluge koje podržava (Y preko IP - npr. VoIP<sup>17</sup>)
- transportni sloj - dva protokola
  - TCP
    - omogućuje isporuku potpune i točne informacije u nepromijenjenom redoslijedu
    - omogućuje semantičku transparentnost pa se primjenjuje kao transportni protokol za web
  - UDP<sup>18</sup>
    - jednostavna transportna usluga uz najmanje moguće kašnjenje
    - prikladno za postizanje vremenske transparentnosti
- aplikacijski sloj - rješenja za različite usluge i primjene Interneta
  - primjeri protokola:
    - SMTP<sup>19</sup> - elektronička pošta
    - HTTP<sup>20</sup> - web
    - SNMP<sup>21</sup> - upravljanje mrežom

<sup>14</sup> Transmission Control Protocol

<sup>15</sup> Internet Protocol

<sup>16</sup> IP over Dense Wavelength Division Multiplexing

<sup>17</sup> Voice over IP

<sup>18</sup> User Datagram Protocol

<sup>19</sup> Simple Mail Transfer Protocol

<sup>20</sup> Hyper Text Transfer Protocol

<sup>21</sup> Simple Network Management Protocol

### 3. Komunikacijski protokol (definicija dana ranije)

- specifikacija svakog komunikacijskog protokola obuhvaća:
  - uslugu koju protokol pruža
    - ⇒ namjena protokola - funkcija u okviru sloja kojem pripada, suradnja s drugim protokolima u istom, višem ili nižem sloju, mreža u kojoj se primjenjuje
    - ⇒ način rada - jednosmjerna, dvosmjerna ili poludvosmjerna razmjena jedinica podataka; spojna ili nespojna usluga; od točke do točke ili od jedne prema više točaka
    - ⇒ upravljanje pogreškama - riješeno njihovim otkrivanjem ili ispravljanjem, ili prepušteno drugim protokolima s kojima taj protokol surađuje
  - rječnik protokolnih jedinica podataka
  - format protokolnih jedinica podataka
  - pravila razmjene protokolnih jedinica podataka
- pretpostavke o okružju - važne za odabir protokola
  - najvažniji parametri se odnose na korisnike i obilježja prijenosnih medija i komunikacijskih sustava
    - ⇒ opis korisnika
      - broj korisnika usluge (dva ili više; stalan ili promjenjiv sastav)
      - kretanje korisnika (stacionarno, pokretno ili nomadsko<sup>22</sup> komuniciranje)
      - način ostvarivanja usluge (stalno ili na zahtjev)
      - sigurnost i privatnost komunikacije (je li potrebna zaštita i ako da, koje razine)
    - ⇒ opis uvjeta komunikacije
      - obilježja prijenosnog medija i komunikacijskog kanala (kapacitet, smetnje, vjerojatnost pogreške bita)
      - mogući kvarovi (prekid prijenosnog medija, neispravnost i zaustavljanje komunikacijskog sustava)
      - vrste pogrešaka protokolnih jedinica podataka (promjena sadržaja, gubitak, umetanje, višestruki prijam, pogrešan redoslijed)
- razvrstavanje
  - prema sloju kojem pripadaju
  - po dijelu mreže u kojem se primjenjuju
  - po vrsti informacije kojom se komunicira
  - ...

### 4. Kvaliteta usluge i mrežne performanse

- kvaliteta usluge - zajednički učinak performansa koji određuje stupanj zadovoljstva korisnika
  - iskustvena kvaliteta<sup>23</sup> - subjektivno zadovoljstvo korisnika
  - kvaliteta usluge<sup>24</sup> - parametri vezani uz mrežne performanse (sposobnost mreže ili dijela mreže da ostvari funkcije potrebne za komunikaciju)
    - ⇒ širina pojasa (*bandwidth*)
      - 1. značenje: frekvencijski pojas koji se može upotrijebiti za prijenos informacija - fizikalno svojstvo prijenosnog medija (označava se s B i mjeri u Hz)
      - 2. značenje: pojasni propust - najveća brzina prijenosa bita (*bit rate*, mjeri se u bit/s)
      - obje veličine su jednake ako se po 1 Hz širine pojasa prenosi točno 1 bit podataka
    - ⇒ propusnost (*throughput*) - broj ispravno prenesenih korisnih bita
    - ⇒ kašnjenje (*latency, delay*) - vrijeme potrebno da se provede neka operacija

---

<sup>22</sup> s različitih mjesta, ali ne tijekom kretanja između njih

<sup>23</sup> QoE - *Quality of Experience*

<sup>24</sup> QoS - *Quality of Service*

## 5. Normizacija

- normizacijske udruge
  - ISO<sup>25</sup> - određuje norme na svjetskoj razini u najširem smislu i za različita područja djelovanja
  - ITU<sup>26</sup> - normira i usklađuje razvoj telekomunikacija na svjetskoj razini preporukama
    - ⇒ ITU-T (*Telecommunications* - ranije CCITT<sup>27</sup>) - telekomunikacijske norme
    - ⇒ ITU-R (*Radiocommunications*) - radijski prijenos i upravljanje frekvencijskim spektrom
  - IEEE - između ostalog, skrbi o normiranju lokalnih mreža
  - IETF<sup>28</sup> - normizacija Interneta
- razvoj Interneta - RFC<sup>29</sup>, ISOC<sup>30</sup>, IAB<sup>31</sup>, W3C<sup>32</sup>

---

<sup>25</sup> *International Organisation for Standardisation*

<sup>26</sup> *International Telecommunication Union*

<sup>27</sup> *Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique*

<sup>28</sup> *Internet Engineering Task Force*

<sup>29</sup> *Request for Comment*

<sup>30</sup> *Internet Society*

<sup>31</sup> *Internet Architecture Board*

<sup>32</sup> *World Wide Web Consortium*

## Fizički sloj i prijenosni medij

### 1. Oblikovanje fizičkog sloja

- mehaničko, električko ili optičko te vremensko sučelje s prijenosnim medijem
- signalna domena prijenosa
  - pretvorba digitalnog signala (bita) na izvoru u signalne elemente prilagođene uvjetima prijenosa (kodiranje i modulacija)
  - prijenos signalnih elemenata fizičkim medijem (moguće djelovanje smetnji - pogreške)
  - pretvorba primljenih elemenata u digitalne signale (demodulacija i dekodiranje)
- parametri koji utječu na određivanje brzine prijenosa i dometa (udaljenosti) te odabir prijenosnog medija
  - širina pojasa B (Hz)
  - interferencija (smetnje)
  - izobličenje i gušenje signala
  - broj prijamnika - također mogu izazvati izobličenje i gušenje signala
- kapacitet kanala - određen širinom pojasa (B) i odnosom signal - šum

### 2. Prijenosni medij

- osnovna podjela
  - omeđeni - signal se vodi putem medija (parica, koaksijalni kabel, optičko vlakno)
  - neomeđeni - signal se širi u slobodnom prostoru, bežično (zemaljski radijski prijenos, infracrveni i laserski prijenos - elektromagnetni val na frekvencijama iznad radijskih, mikrovalne i satelitske veze...)

#### 2.1. Parica (*pair*)

- dva bakrena vodiča promjera do 1mm koji se upredaju kako bi se smanjio međusobni elektromagnetski utjecaj
- može biti ili neoklopljena (UTP - *Unshielded Twisted Pair*) ili oklopljena (STP - *Shielded Twisted Pair*)
- prikladna i za analogni (priključak telefonskog aparata na lokalnu centralu) i za digitalni prijenos (ISDN, ADSL)
- koristi se u lokalnim i kućnim mrežama zbog niske cijene, prihvatljivih troškova izvedbe i brzine prijenosa
- brzina prijenosa
  - ⇒ ovisi o duljini i debljini žice, načinu upredanja i načinu slaganja parica u kabel
  - ⇒ obrnuto proporcionalna s udaljenosti
- normiranje kategorijama CAT

#### 2.2. Koaksijalni kabel

- dva vodiča: unutarnji (žica) i vanjski (mrežica koja obavlja izolacijski sloj oko unutarnjeg)
- velika širina pojasa i dobra zaštita od smetnji, ali je skuplji od parice i neprikladan za izvedbu lokalnih mreža
- primjena ograničena na kabelsku televiziju

#### 2.3. Optičko vlakno

- tanka staklena nit unutar ovojnice od stakla obavijene zaštitnim slojem (u primjeni i plastična vlakna, ali imaju slabije performanse)
- prijenos svjetlosnog signala (emitira LED<sup>33</sup> ili poluvodički laser, prima fotodioda)
- indeks loma ovojnice manji od indeksa loma vlakna kako bi se svjetlost zadržala u vlaknu
- podjela s obzirom na način rasprostiranja svjetlosti
  - ⇒ jednomodno vlakno - jednom zrakom, promjer vlakna nije veći od nekoliko valnih duljina signala
  - ⇒ višemodno vlakno - pomoću više zraka, uz njihovo odbijanje na granici vlakna i ovojnice
    - slabijih karakteristika - veće gušenje signala i manje brzine prijenosa; za kraće udaljenosti
- omogućuje samo jednosmjerni prijenos - za dvosmjernu komunikaciju potrebna dva vlakna
- prednosti nad bakrenim vodičem
  - ⇒ veća brzina prijenosa (Gbit/s, Tbit/s)
  - ⇒ malo gušenje signala (obnavljanje signala za prijenos na velikim udaljenostima - reda veličine 10-100km)
  - ⇒ moguće multipleksiranje valnih duljina
  - ⇒ neosjetljivost na elektromagnetske utjecaje i koroziju
  - ⇒ vlakna su tanka i lagana
  - ⇒ teško prisluškivati

---

<sup>33</sup> Light Emitting Diode



- nedostatci
  - ⇒ isključivo jednosmjerni prijenos
  - ⇒ složenija i skuplja sučelja
  - ⇒ skuplja izvedba i održavanje
- osnovni parametri za prijenos informacije
  - ⇒ prijenosno kašnjenje - vrijeme potrebno za prijenos određene količine bita zadanom brzinom prijenosa
  - ⇒ propagacijsko kašnjenje - vrijeme potrebno za prijenos signala na određenu udaljenost ( $d = \frac{L}{c_m}, (s)$ )
    - $L$  - udaljenost (m),  $c_m$  - brzina propagacije signala (svjetlosti) u mediju
- u RH optička mreža izvedena u topologiji višestruko povezanih prstena

#### 2.4. Radijski prijenos

- osnovni način bežičnog prijenosa, prvenstveno za pristup korisnika javnoj pokretnoj i bežičnoj lokalnoj mreži
- radiofrekvencijski spektar - od 9 kHz do 300 GHz
- radi izbjegavanja interferencije, potrebno provoditi plansku i namjensku dodjelu radiofrekvencija
  - ⇒ međunarodna dodjela spektra po rasponima za definirane usluge (ITU-R definira 40-ak frekvencijskih pojaseva i njihovu namjenu)
  - ⇒ nacionalna dodjela koncesija - pravo isključivog rada putem određenih frekvencija unutar raspona (provode nacionalna regulatorna tijela, u RH HAKOM)

#### 3. Višestruka uporaba prijenosnog medija

- prostorna podjela - pri povezivanju više izvora s više odredišta, svakom se paru izvor-odredište dodjeljuje posebna parica ili optičko vlakno (poseban "prostor")
- istodobni prijenos informacija koje pripadaju različitim vezama putem istog prijenosnog medija pospješuje učinkovitost - pri tome se one razlikuju po nekoj drugoj komponenti (frekvenciji, vremenu, valnoj duljini, kodu)

##### 3.1. Multipleksiranje u frekvencijskoj podjeli

- svakom paru izvor-odredište dodjeljuje se drugi dio unutar raspoloživog frekvencijskog pojasa
- primjena u analognim sustavima (npr. pokretna mreža NMT koja se više ne koristi, ADSL)
- u digitalnim sustavima kombinacija frekvencijske i vremenske podjele (GSM)
- multipleksiranje u ortogonalnoj frekvencijskoj podjeli - podaci koji pripadaju istoj vezi se dijele i prenose istodobno na više različitih frekvencija
  - ⇒ visoke brzine prijenosa i otpornost na smetnje

##### 3.2. Multipleksiranje u vremenskoj podjeli

- svakom paru izvor-odredište se dodjeljuje poseban vremenski odsječak unutar okvira trajanja
- statička podjela - odsječci se ciklički izmjenjuju i dodjeljuju neovisno o tome ima li podataka na izvoru ili ne (npr. telefonska mreža)
- dinamičko / statističko multipleksiranje - vodi računa o količini podataka, dodjela više odsječaka prometno jačem izvoru (komunikacija podacima između računala)
- vremenska podjela i pulsno-kodna modulacija (PCM) - za digitalizaciju i prijenos govora u telefonskoj mreži
- sinkrona digitalna hijerarhija (SDH) - brzi prijenos bita u ekstremno točnim vremenskim trenucima

##### 3.3. Multipleksiranje u valnoj podjeli

- specifično za optička vlakna - svakom paru izvor-odredište se dodijeli druga valna duljina, u primjeni DWDM<sup>34</sup>

<sup>34</sup> Dense Wavelength Division Multiplexing, s razmakom valnih duljina do 0,1nm

## Podatkovna poveznica i lokalna mreža

### 1. Oblikovanje podatkovne poveznice - uključuje:

- definiranje usluge mrežnom sloju
  - osnovna podjela: spojna, nespojna
  - podjela s motrišta označavanja: bez i sa potvrdom prijama
  - karakteristične usluge:
    - ⇒ nespojna bez potvrde - izvor šalje neovisne okvire
      - izvedbeno jednostavna, ali nema jamstva da će se komunikacija uspješno obaviti
      - primjena: prijenos podataka uz očekivanu malu vjerojatnost pogreške bita (dobro izvedena lokalna mreža), komunikacija u stvarnom vremenu (prijenos digitaliziranog govora ili videa)
    - ⇒ nespojna s potvrdom - odredište potvrđuje prijam svakog okvira; nepotvrđeni okviri se ponovno šalju
      - npr. pri bežičnom prijenosu
    - ⇒ spojna s potvrdom - uspostavljanje logičke veze između izvora i odredišta prije razmjene okvira
      - svi okviri koji pripadaju istoj komunikaciji nose oznaku dodijeljene veze
      - svaki okvir se označava slijednim brojem - jamstvo isporuke svakog okvira samo jednom i u točnom redoslijedu
      - primjena kad se zahtijeva visoka pouzdanost
- definiranje formata okvira - protokolne jedinice podataka
  - opći format: polje podataka za podatke koji se prenose i polje s upravljačkom informacijom (može biti zaglavlje - ispred polja podataka; ili završetak - iza polja podataka)
  - duljina okvira
    - ⇒ fiksna - primjena u radijskom prijenosu (npr. za GSM); kad je mrežna jedinica podataka kraća od duljine okvira, dodaje se ispuna (*padding*) do pune duljine
    - ⇒ varijabilna - definira se najveća moguća duljina okvira
      - određivanje kraja okvira:
        - brojanjem znakova
          - polje *duljina* je dio zaglavlja tako da odredište može brojanjem znakova odrediti kraj okvira (praksa u *Ethernet*-u)
          - moguće varirati i duljinu zaglavlja, što zahtijeva dodatno polje
        - označavanjem početka i kraja posebnom zastavicom - ista zastavica označava kraj jednog i početak sljedećeg okvira (u HDLC<sup>35</sup> protokolima)
          - opasnost da se u polju podataka pojavi kombinacija bita koja odgovara zastavici, što se rješava umetanjem bita
    - ⇒ fragmentacija u slučaju da je mrežna jedinica podataka veća od duljine polja podataka u okviru
      - smanjena učinkovitost zbog
        - trajanja procesa dijeljenja i sastavljanja paketa
        - porasta ukupnog broja bita za prijenos (svaki fragment dobiva svoje zaglavlje)
        - nemogućnosti sastavljanja u slučaju gubitka fragmenta, što uzrokuje retransmisiju svih fragmenata
      - dulji okvir znači prijenos više korisnih podataka odjednom, ali i veću izloženost smetnjama
      - ukupan broj bita koji će se prenijeti svim fragmentima:
$$\left(\frac{N}{n_p} + 1\right)(n_c + n_p)$$

- ( $N^{36} \% n_p^{37} \neq 0$ ) && ( $n_p + n_c^{38} = n$  - fiksna veličina okvira)
      - ako su poveznice na putu u mreži različite izvedbe, potrebno provođenje fragmentacije više puta ili prilagođavanje najmanjem čvoru već na izvoru
    - najčešće se primjenjuju jedinice podataka varijabilne duljine s oznakom duljine u zaglavlju - odnosi se i na više slojeve (npr. IP-datagram)

<sup>35</sup> *High-level Data Link Control*

<sup>36</sup> količina korisnih podataka za prenijeti

<sup>37</sup> veličina polja podataka okvira

<sup>38</sup> količina protokolne upravljačke informacije okvira

- upravljanje pogreškama
  - mjera kvalitete digitalnog prijenosa izražava se kao učestalost pogreške bita (*Bit Error Rate*)
  - vrste pogrešaka:
    - ⇒ oštećeni okvir - stiže na odredište, ali neki bitovi su pogrešni
    - ⇒ izgubljeni okvir - ne stiže na odredište
  - zaštitno kodiranje - pretpostavka za upravljanje pogreškama
    - ⇒ omogućuje
      - samo otkrivanje pogrešaka (npr. paritetni bit)
        - jedini način ispravljanja je retransmisija (*Backward Error Correction*)
        - jednostavniji pa se izvodi u većini mreža
        - na izvoru potrebno ograničiti vrijeme čekanja na potvrdu primanja okvira (zbog izgubljenih okvira)
        - višestruki prijam okvira (potvrđi je trebalo dulje no što je predviđeno da dođe do izvora, pa je on u međuvremenu opet poslao neki okvir) može se izbjeći numeracijom okvira slijednim brojem
      - otkrivanje i ispravljanje pogrešaka (npr. Hammingov kod)
        - odredište dekodira podatke, otkriva pogrešku i određuje gdje se dogodila te ju ispravlja (*Forward Error Correction*)
        - pri teškim uvjetima prijenosa (veća očekivana učestalost pogrešaka) - npr. komunikacija s vozilom na Marsu, *Bluetooth*
  - upravljanje tokom
    - usklađivanje izvora i odredišta - izvor ne smije slati podatke prije nego ih odredište može primiti
    - osnovni mehanizam - odredište daje izvoru dopuštenje za slanje podataka (zahtijeva numeraciju i brojanje okvira)

## 2. Komunikacijski protokoli podatkovne poveznice

- u sloju podatkovne poveznice mogu omogućiti
  - transparentan prijenos znakova (*byte-oriented*, npr. SMS)
  - transparentan prijenos bitova (*bit-oriented*) - važniji za komunikacijske mreže jer ne ograničavaju informacijski sadržaj
- jednosmjerni protokoli - podržavaju tok podataka u jednom smjeru, a u suprotnom se ne prenose podaci, ali se mogu prenositi okviri s upravljačkom informacijom (npr. potvrda)
  - jednosmjerni protokol bez ograničenja - jedan sustav šalje podatkovne okvire drugom koji ih prima
    - ⇒ idealizacija - pretpostavka da su kanali uvijek spremni, da nema pogrešaka, da je obrada okvira beskonačno brza i da su spremnici beskonačni
  - jednosmjerni "stani i čekaj" protokol
    - ⇒ uvažava se da obrada traje i da spremnici imaju konačan kapacitet, ali još uvijek je pretpostavka da nema pogrešaka
    - ⇒ sustav A pošalje podatkovni okvir pa čeka na potvrdu od sustava B nakon čega šalje drugi podatkovni okvir - neučinkovito
    - ⇒ jednosmjerni tok podataka, ali potrebna dva kanala kako bi B mogao slati potvrde
  - jednosmjerni protokol za kanal sa smetnjama - uzima u obzir mogućnost pogrešaka
    - ⇒ način rada - ispravljanje pogreške unazad
      - provode protokoli s automatskim zahtjevom za ponavljanjem<sup>39</sup> ili s pozitivnom potvrdom s ponavljanjem<sup>40</sup>
    - ⇒ potpuno rješenje obuhvaća numeraciju okvira

<sup>39</sup> Automatic Repeat reQuest - ARQ

<sup>40</sup> Positive Acknowledgement with Retransmission - PAR

- dvosmjerni protokoli - dvosmjerni tok podataka i upravljačkih okvira
  - dvosmjerni protokol za kanal sa smetnjama
    - ⇒ oblikovanje okvira u kojem su sadržani podaci koji se šalju, slijedni broj okvira koji se šalje i slijedni broj primljenog okvira koji se potvrđuje (npr. slijedni broj zadnjeg ispravno primljenog okvira)
    - ⇒ mjera iskorištenosti kanala  $\frac{L}{L+CR}$  (L - duljina jedinice podataka [bit], C - kapacitet kanala [bit/s], R - propagacijsko kašnjenje u oba smjera) - dok se čeka potvrda, moglo se preneti CR bita
      - prenošenje okvir po okvir je neučinkovito - bolje slati više okvira odjednom, no to znači da treba pamtiti slijedne brojeve poslanih nepotvrđenih jedinica podataka, ograničiti broj nepotvrđenih i omogućiti skupnu potvrdu
        - protokoli s tzv. kliznim prozorom (ovako radi TCP)
          - u prozor ( $n > 1$ ) se zapisuju slijedni brojevi poslanih nepotvrđenih okvira
          - kad se potvrdi  $m(\leq n)$  okvira, prozor klizi prema novih m okvira koji se zatim šalju
    - ⇒ složeni protokoli uzrokuju porast upravljačke informacije, odnosno manju propusnost

### 3. Studijski primjer: lokalna mreža

#### 3.1. Osnovne postavke

- povezivanje ograničenog broja stanica unutar zgrade ili skupine susjednih zgrada, redovito uz malo kašnjenje i vjerojatnost pogreške → nespojna usluga bez potvrde
- komunikacija ostvarena na fizičkom i sloju podatkovne poveznice
  - ⇒ fizički sloj - dijeljeni prijenosni medij
    - tradicionalno koaksijalni kabel, danas bakrena parica, optičko vlakno i radijski prijenos (WLAN)
  - ⇒ sloj podatkovne poveznice - potrebno riješiti pristup stanica prijenosnom mediju i ostvariti logičku poveznicu između stanica koje razmjenjuju okvire
    - podsloj upravljanja pristupom mediju<sup>41</sup>
      - više rješenja ovisno o vrsti lokalne mreže
      - dodjeljuje prijenosni medij stanici na zahtjev (tj. po potrebi), a izvodi se na mrežnoj kartici stanice ili u priključku mrežnog uređaja
      - pristupni protokoli - uređuju redoslijed pristupanja
        - statički - ukupni kapacitet prijenosnog medija podijeli se na sve stanice
        - dinamički - složenije, ali učinkovitije jer uzima u obzir stvarni promet između stanica
      - upravljanje pristupom
        - centralizirano - jedan mrežni entitet raspoređuje prava ostalima
        - distribuirano - svaka stanica se bori za pristup mediju ili čeka da dođe na red
      - pristup mediju
        - prozivka (*polling*) - stanicu se pita ima li podatke za odašiljanje
        - slučajni pristup (*random access*) - stanica pokušava pristupiti mediju kad ima spremne podatke za odašiljanje
    - podsloj upravljanja logičkom poveznicom<sup>42</sup>
      - jednako rješenje za sve vrste lokalnih mreža, neovisno o načinu upravljanja pristupom mediju
      - ostvaruje razmjenu okvira, izvodi se kao upravljački program ili programski modul uređaja

<sup>41</sup> Media Access Control - MAC

<sup>42</sup> Logical Link Control - LLC

### 3.2. Vrste lokalnih mreža

- normiranje povjereno IEEE, norme 802
  - ⇒ 802.1 - sučelja s višim slojem i povezivanje lokalnih mreža mostom
  - ⇒ 802.2 - upravljanje logičkom poveznicom
    - struktura podatkovne jedinice (LLC PDU) - omogućuje prijenos jedinica podataka koje koriste različite protokole (svaki protokol mrežnog sloja ima vlastiti SAP)
      - korisnička informacija
      - protokolna upravljačka informacija
        - odredišna točka pristupa usluzi<sup>43</sup>
        - izvorišna točka pristupa usluzi<sup>44</sup>
        - upravljačko polje - za upravljanje logičkom poveznicom
          - informacijsko (prenosi korisnu informaciju, npr. IP-datagram)
          - nadzorno (za upravljanje prometnim tokovima)
          - neoznačeno (za upravljanje logičkom poveznicom)
  - ⇒ 802.3 - pristup mediju na načelu CSMA/CD (poznato kao *Ethernet*)
    - fizička topologija - sabirnica → jednosmjerna povezanost svake stanice sa svakom
    - CSMA/CD<sup>45</sup> - dinamički distribuirani slučajni pristup mediju
      - prije slanja stanica osluškivanjem signala nositelja (*Carrier Sense*) tj. mjerenjem napona ustanovi je li medij zauzet
    - više stanica može istodobno pristupiti mediju (*Multiple Access*) - može se dogoditi da istovremeno ustanove da je medij slobodan i pošalju okvir pa dođe do sudara okvira
    - stanica koja otkrije sudar (*Collision Detection*) ga označava *jam* signalom nakon čega svaka stanica čeka neko slučajno vrijeme pa ponavlja slanje okvira
  - ⇒ 802.4 - pristup mediju na načelu *Token Bus*
    - fizička topologija - sabirnica → prenosi se *token* koji ciklički kruži između stanica (logička topologija je prsten) kojim se stanici dodjeljuje pravo slanja okvira s podacima
    - nema sudara, ali neučinkovito jer nemaju sve stanice jednaki informacijski promet
    - statičko distribuirano rješenje s prozivkom
  - ⇒ 802.5 - pristup mediju na načelu *Token Ring*
    - slično kao *Token Bus*, ali su i logička i fizička topologija prsten

### 3.3. Lokalna mreža IEEE 802.3 (*Ethernet*)

- *Ethernet* ≠ IEEE 802.3 (povijesni i razvojni razlozi), ali je Ethernet uobičajen naziv za tu vrstu mreža
- specificirana lokalna mreža sa sabirničkom fizičkom topologijom i slučajnim pristupom (CSMA/CD)
- praktične izvedbe razvrstane prema brzini prijenosa, načinu prijenosa, dozvoljenoj dužini mrežnog segmenta i prijenosnom mediju
  - ⇒ 10BASE5 → 10 Mbit/s, osnovno područje - 0 Hz do definirane frekvencije (*basedband*), maksimalna dužina mrežnog segmenta 500 m izvedenog debelim koaksijalnim kablom
  - ⇒ 100BASE-T → 100 Mbit/s s prijenosom signala u osnovnom području jednomodnim vlaknom
- struktura okvira
  - ⇒ preambula - za sinkronizaciju predajnika i prijamnika na razini bita
  - ⇒ oznaka početka okvira<sup>46</sup>
  - ⇒ adresa odredišta - 6 okteta MAC-adrese odredišta (moguća i kratka adresa od 2 okteta)
  - ⇒ adresa izvora - 6 okteta MAC-adrese izvorišta (moguća i kratka adresa od 2 okteta)
  - ⇒ duljina polja podataka
  - ⇒ podaci (46-1500 okteta)
    - minimalna duljina okvira treba jamčiti otkrivanje sudara i izvještavanje svih stanica o sudaru
      - sudar će se sigurno otkriti ako se dogodi za vrijeme odašiljanja podataka - stoga CSMA/CD nije prikladan za velike brzine prijenosa

<sup>43</sup> Destination Service Access Point - DSAP

<sup>44</sup> Source Service Access Point - SSAP

<sup>45</sup> Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection

<sup>46</sup> Start Frame Delimiter - SFD

- minimalno vrijeme potrebno za sigurno otkrivanje sudara je dvostruko vrijeme trajanja prijenosa između dviju najudaljenijih stanica u mreži
- ⇒ zaštitna suma<sup>47</sup> - ciklički kod za otkrivanje pogrešaka u okviru (ne odnosi se na preambulu)
- razmak između sukcesivnih okvira<sup>48</sup> - nakon prijenosa svakog okvira
- adresiranje
  - ⇒ adresa duljine 6 okteta (prvi oktet se prenosi obrnutim redoslijedom bitova)
  - ⇒ globalno administrirane - svaka mrežna kartica ima svoju jedinstvenu MAC adresu
    - organizacijski jednoznačni identifikator<sup>49</sup> - određuje proizvođača, prva tri okteta
    - identifikator mrežnog sučelja<sup>50</sup> - druga tri okteta
    - zapis u heksadekadskoj notaciji
  - ⇒ lokalno administrirane - određuje mrežni administrator, bez značenja izvan lokalne mreže
  - ⇒ adresa odredišta može biti jedinstvena (*unicast*), adresa skupine stanica (*multicast*), adresa razasijljanja svim stanicama (*broadcast*)
  - ⇒ 47. bit: 0 → adresa pojedine stanice; 1 → adresu skupine stanica
  - ⇒ 46. bit: 0 → globalno administrirana adresa; 1 → lokalno administrirana adresa
  - ⇒ svi bitovi postavljeni na 1 → adresa razasijljanja
- komutirani *Ethernet* - za kasnija rješenja koja se danas primjenjuju, a fizička topologija je zvijezda i prijenos je dvosmjernan (nema sudara)
  - ⇒ svaka stanica je spojena na komutator, koji omogućuje i povezivanje s drugim mrežama
  - ⇒ prijenosni mediji su parice i optička vlakna
- bežična mreža
  - ⇒ povezivanje radijskim kanalom na pristupnu točku (*access point*)

---

<sup>47</sup> *Frame Check Sequence* - FCS

<sup>48</sup> *InterFrame Gap* - IFG

<sup>49</sup> *Organisationally Unique Identifier* - OUI

<sup>50</sup> *Network Interface Card* - NIC

## Mrežni sloj

### 1. Usluga mrežnog sloja

- isporuka podataka s kraja na kraj
- ovisno o vrsti mreže
  - spojna - faze uspostave veze, transfera podataka i raskida veze (virtualni kanal)
  - nespojna - faza transfera podataka (datagrami)
- nepouzdana (s obzirom na isporuku paketa) nespojna usluga s datagramskim načinom usmjeravanja
  - koristi se u Internetu
  - pogreške se rješavaju u višim slojevima
  - puno manje kašnjenje jer nema retransmisije, ali pošiljalatelj nema informaciju je li paket ispravno i u ispravnom redoslijedu isporučen
- funkcije
  - adresiranje - svakom mrežnom čvoru se dodjeljuje jednoznačna adresa (logički opisuje njegov smještaj unutar mreže)
  - usmjeravanje jedinica podataka - funkcije koje omogućuju prebacivanje podataka s jednog kraja mreže na drugi
  - upravljanje zagušenjem
  - upravljanje pogreškama i tokom - u Internetu prepušteno transportnom sloju (npr. TCP ako se želi pouzdana usluga)
  - međusobno povezivanje mreža i podmreža

### 2. Adresiranje

- uključuje hijerarhiju unutar adresnog prostora - u lokalnoj komunikaciji dovoljno koristiti lokalni dio adrese, a za globalnu potrebni svi podaci kako bi adresa bila jednoznačno određena
- dodjelom upravlja mrežni administrator
- u internetskom mrežnom sloju je glavni protokol IP, prema kojem se mrežne adrese nazivaju IP-adrese
  - 32-bitni identifikator koji globalno i jednoznačno određuje mrežno sučelje čvora spojenog na Internet
  - zapis u obliku binarnog broja ili kao četiri dekadski broja odvojena točkama

### 3. Usmjeravanje u mrežama s komutacijom paketa

- svaki paket sadrži upravljačku informaciju koja služi za dostavljanje od izvora na odredište
  - mrežne adrese izvora i odredišta (datagram)
  - oznaku puta (virtualni kanal)
- osnovni pojmovi u komutaciji paketa
  - usmjeravanje - određivanje puta (niza čvorova kroz mrežu kojima će paket proći na putu)
  - prosljeđivanje - odluka unutar čvora na koje odlazno sučelje proslijediti paket
- komutatori (usmjeritelji / usmjernici u internetskoj terminologiji) - mrežni elementi koji izvode funkcije komutacije paketa

- problemi usmjeravanja
  - formuliraju se pomoću grafova (čvor je komutacijski čvor, a grane su poveznice među čvorovima) koji mogu imati težinske funkcije (npr. udaljenost, propusnost, kašnjenje, cijena komunikacije, ...)
  - rješavaju se algoritmima usmjeravanja - traži se optimalan put
    - ⇒ Ako je čvor  $J$  na optimalnom putu od čvora  $I$  prema čvoru  $K$ , onda je optimalni put od  $J$  do  $K$  dionica tog puta.
    - ⇒ neadaptivni algoritmi (statički) - računaju putove na temelju zadanih kriterija za zadanu topologiju mreže prilikom prvog pokretanja čvora i više se ne mijenjaju
      - usmjeravanje najkraćim putem - pronalaženje puta za zadani par čvorova u težinskom grafu tako da je suma težina grana na tom putu minimalna
        - Dijkstrin algoritam - stablo najkraćeg puta za određeni izvor ili odredište
          - $S$  - elementi čije su oznake trajne
          - $T$  - elementi čije su oznake privremene
          - $c_i$  - oznaka čvora
          - $u_i$  - udaljenost čvora do ishodišta
          - $d(x, y)$  - udaljenost između dva čvora
          - algoritam:
            - $S = \{(c_1, 0)\}$
            - $T = \{(c_2, u_2), \dots, (c_n, u_n)\}$ ,  $u_k = d(c_1, c_k)$  za svaki  $u_k$
            - dok  $T$  nije prazan
              - izaberi  $(c_k, u_k)$  s najmanjom udaljenosti
              - $T = T \setminus \{(c_k, u_k)\}$
              - $S = S \cup \{(c_k, u_k)\}$
              - za svaki  $(c_k, u_k)$  iz  $T$ 
                - $u_j = \min(u_j, u_k + d(c_k, c_j))$
    - preplavlivanje
      - ideja je svaki primljeni paket u čvoru uvišestručiti i poslati svim sučeljima osim onog s kojeg je paket primljen
      - u praksi nužni dodatni algoritmi kako bi se spriječila beskonačna petlja
        - ograničenje maksimalnog broja prosljeđivanja paketa - brojač se postavi na neku vrijednost i u svakom čvoru u koji dođe se smanjuje za jedan dok se ne dođe do nule, kada se paket odbacuje
        - praćenje već viđenih paketa na svakom čvoru i odbacivanje duplikata
      - nije učinkovito što se tiče opterećenja mreže
      - primjena: za konkurentno osvježavanje raspodijeljenih baza podataka te na mjestima gdje je potrebna visoka robusnost
    - ⇒ adaptivni algoritmi (dinamički) - donose odluke o usmjeravanju uzimajući u obzir aktualne podatke
      - usmjeravanje prema vektoru udaljenosti
        - svaki usmjeritelj ima vektor koji za svako odredište daje najbolju poznatu udaljenost i prvi korak prema njemu
        - Ford-Fulkerson - računa maksimalni tok u mreži tokova
        - Bellman-Ford - računa stablo najkraćih putova za jedan izvor u težinskom grafu, pri čemu su dozvoljene i negativne vrijednosti (za razliku od Dijkstrinog algoritma)
        - svaki čvor mora moći
          - otkriti susjede i saznati njihove mrežne adrese
          - izmjeriti kašnjenje / udaljenost prema svakom susjedu
          - osvježiti tablicu usmjeravanja na temelju izmjerenog kašnjenja i vektora udaljenosti koje dobije od susjeda
          - stvoriti paket koji sadrži njegov vektor udaljenosti
          - poslati paket susjedima
        - brzo reagira na dobre vijesti, a jako sporo na loše
        - u Internetu ga koristi protokol RIP (*Routing Information Protocol*)



- usmjeravanje prema stanju poveznice
  - temelji se na razmjeni podataka o topologiji i izmjerenih podataka o stanju poveznice (kašnjenje) među čvorovima i zatim primjeni Dijkstrinog algoritma
  - nužno periodično osvježavati stanje i slati podatke susjedima, što mora biti pouzdan prijenos
  - svaki čvor mora
    - otkriti svoje susjede i saznati njihove mrežne adrese
    - izmjeriti kašnjenje (tj. parametar koji se prati) prema svakom od njih
    - stvoriti paket kojim javlja što je saznao
    - razaslati paket svim čvorovima u mreži
    - izračunati najkraći put do svih ostalih čvorova i osvježiti tablicu usmjeravanja
  - u Internetu ga koristi protokol OSPF (*Open Shortest Path First*)

#### 4. Upravljanje zagušenjem

- mreža utemeljena na komutaciji paketa u pravilu uvijek prihvaća nove pakete, što može dovesti do prevelikog opterećenja na dio mreže
- porast opterećenja uzrokuje porast gubitaka paketa i kašnjenja te pad propusnosti za sve pakete koji su trenutno u mreži
- dva osnovna pristupa
  - rješenja s otvorenom petljom - dobro oblikovanje sustava s ciljem izbjegavanja zagušenja
    - ⇒ funkcije čvorova
      - ograničeni prihvati novih zahtjeva / prometnih tokova
      - odbacivanje paketa po potrebi i odluka kojih
      - oblikovanje prometa
      - raspoređivanje paketa ili tokova unutar mreže
  - rješenja sa zatvorenom petljom - stalno praćenje ponašanja mreže i povratna veza
    - ⇒ nadziri sustav; detektiraj pojavu i mjesto zagušenja
    - ⇒ proslijedi informaciju o zagušenju na mjesto/mjesta gdje se može djelovati
    - ⇒ prilagodi način rada sustava radi ispravljanja problema

#### 5. Povezivanje mreža i podmreža

- Adresiranje čvorova
  - svakom mrežnom sučelju dodjeljuje se mrežna adresa - odgovara podmreži u kojoj se nalazi (krajnji čvorovi obično imaju jedno, a čvorovi unutar mreže obično imaju više sučelja)
- Usmjeravanje i prosljeđivanje paketa
  - u upravljačkoj informaciji paketa u mrežnom sloju se IP adrese izvorišta i odredišta ne mijenjaju - označavaju izvorište i kranje odredište paketa
  - u sloju podatkovne poveznice se adrese mijenjaju tako da se u svakom čvoru on adresira kao izvorište, a sljedeći čvor kroz koji okvir treba proći kao odredište
- Fragmentacija paketa
  - maksimalna jedinica transmisije<sup>51</sup> - maksimalna dopuštena veličina podatkovnog polja koje se predaje sloju podatkovne poveznice
  - provodi se kad je paket veći od MTU
    - ⇒ transparentna fragmentacija - rastavljanje na fragmente i ponovno sastavljanje fragmenata se obavlja na ulazu i izlazu iz podmreže u kojoj je došlo do fragmentacije
    - ⇒ netransparentna fragmentacija - jednom stvoreni fragmenti ostaju fragmentirani i ponovno se sastavljaju tek na odredištu

---

<sup>51</sup> Maximum Transmission Unit - MTU

## Mrežni sloj u Internetu

1. Arhitektura i protokolni složaj
  - opisuje se pomoću TCP/IP referentnog modela
  - dvije inačice IP: IPv4 (u primjeni u današnjim mrežama, razrađuje se dalje u sklopu ovog predmeta) i IPv6 (postupno se uvodi; veće mogućnosti adresiranja i nova rješenja u mrežnom sloju)
2. Fizički, logički i organizacijski pogled na Internet
  - logički - jedinstvena globalna mreža s velikim brojem krajnjih sustava
    - jedinstveni adresni prostor zasnovan na IP-u
    - jedinstveni protokol usmjeravanja među autonomnim sustavima
    - primjena protokola zasnovanih na modelu TCP/IP
  - fizički - međusobno povezane podmreže
  - organizacija i globalna koordinacija - podmreže administrativno podijeljene u autonomne sustave
  - autonomni sustavi (AS)
    - povezani dio mrežne topologije, može obuhvaćati jednu ili više podmreža, ima jedinstvenu i jasno definiranu politiku usmjeravanja prema ostalim autonomnim sustavima
    - najčešće pod administracijom i u vlasništvu jednog mrežnog operatera
    - protokoli unutrašnjeg usmjeravanja<sup>52</sup> - razna rješenja; u primjeni najviše:
      - ⇒ *Routing Information Protocol* (RIPv2) - temelj algoritam vektora udaljenosti
      - ⇒ *Open Shortest Path First* (OSPFv2) - temelj algoritam stanja poveznice
      - ⇒ vlasnički protokol *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol* (EIGRP)
      - ⇒ u domeni davatelja internetskih usluga OSI IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*)
    - protokoli za usmjeravanje između različitih autonomnih sustava<sup>53</sup> - samo jedan
      - ⇒ *Border Gateway Protocol* (BGPv4) - sličan algoritmu vektora udaljenosti, ali uzima u obzir staze kao niz AS-ova na putu do odredišta
    - globalno jedinstveni identifikatori za svaki sustav - dodjelom upravlja IANA<sup>54</sup> (npr. CARNetov broj je 2108)
3. Odlike protokola IP
  - datagramski način rada
  - pruža transportnom sloju nespojnu, nepotvrđenu mrežnu uslugu bez primjene mehanizama upravljanja tokom i bez jamstva isporuke ili očuvanja redoslijeda paketa
  - usmjeritelji - prebacuju IP-datagrame tako da odabiru sljedeći usmjeritelj i odlazno sučelje po kojem će se proslijediti
  - funkcije
    - omata protokolne jedinice transportnog sloja u datagram koji predaje sloju podatkovne poveznice
    - adresiranje i fragmentacija
  - NE obavlja funkciju samog usmjeravanja datagrama, time se bave protokoli usmjeravanja
4. Adresiranje
  - IP-adresa za IPv4 - 32-bitni identifikator, globalno i jednoznačno označava mrežno sučelje na Internetu
  - zapis adrese prikladan za ljude
    - četiri dekadski broja odvojena točkama (svaki broj jedan byte)
    - simbolički zapis (npr. *www.fer.unizg.hr*)
  - dva dijela adrese
    - ⇒ mrežni identifikator - *NetID*
    - ⇒ identifikator krajnjeg računala ili korisnika - *HostID*
  - svrha - hijerarhijsko usmjeravanje

---

<sup>52</sup> *Interior Gateway Protocol* - IGP

<sup>53</sup> *Exterior Gateway Protocol* - EGP

<sup>54</sup> *Internet Assigned Numbers Authority*

- pet klasa IP-adresa - početkom 1990-ih uvedeno besklasno usmjeravanje<sup>55</sup> jer se ovo s klasama pokazalo neprikladno
  - ⇒ A (za mali broj mreža s velikim brojem računala), B i C (za jako veliki broj mreža s malim brojem računala) za mrežna sučelja uređaja
  - ⇒ D za višeodredišno razošljavanje
  - ⇒ E za buduće potrebe
- besklasno usmjeravanje - razgraničenje dijelova *NetID* i *HostID* se može provesti na bilo kojem bitu
  - 128.211.168.0/21 znači da je duljina *NetID* 21 bit (usmjerava se na raspon adresa 128.211.168.0 do 128.211.175.255)

## 5. Upravljanje adresnim prostorom

- mrežni identifikator
  - IANA dodjeljuje slobodne dijelove adresnog prostora regionalnim internetskim registrima<sup>56</sup> koji dalje dodjeljuju adresu lokalnim registrima, operatorima ili korisnicima
- identifikator krajnjeg uređaja
  - dodjeljuje mrežni administrator
  - neke adrese su rezervirane (npr. 127.0.0.1 je *loopback* adresa, adrese koje počinju s 0.0.0 se odnose na "ovo računalo", 255.255.255.255 je *broadcast* u lokalnoj mreži)
- tri bloka adresa odvojena za privatne mreže pa ne moraju biti globalno jedinstvene (za komunikaciju s Internetom se vrši preslikavanje adrese u javni raspon)
  - 10.0.0.0/8, 172.16.0.0/12, 192.168.0.0/16
- podmreže - uvode se u slučaju proširenja ili reorganizacije postojeće lokalne mreže
  - mrežni administrator dio *HostID*-a izuzme za identifikaciju podmreže (određuje se pomoću maske podmreže)
  - nova lokalna podjela IP adrese
    - ⇒ identifikator mreže
    - ⇒ identifikator podmreže
    - ⇒ identifikator krajnjeg računala ili uređaja

## 6. Dodjela i pretvorba IP-adresa

- dodjela
  - statički - upis adrese u postavke računala i mrežnih uređaja (poslužitelji, usmjeritelji i sl.)
  - dinamički - dodjela adrese po potrebi, obično na zahtjev
    - ⇒ adresa se dodjeljuje uređaju kad pristupa mreži
    - ⇒ mrežne postavke dobivaju se od posebnog poslužitelja na osnovi protokola DHCP<sup>57</sup>
  - DHCP - dodjela IP-adrese i konfiguracija komunikacijskih parametara (maska podmreže, pretpostavljeni usmjeritelj, adresa DNS-a i sl.)
    - ⇒ dodjela IP-adresa
      - DHCP *discovery* - uređaj bez adrese traži poslužitelja
      - DHCP *offer* - poslužitelj se odaziva i nudi uslugu dodjele adrese
      - DHCP *request* - računalo zahtijeva adresu
      - DHCP *acknowledge* - poslužitelj odabire raspoloživu IP-adresu, dodjeljuje ju uređaju i prebacuje u skup izdanih adresa
- pretvorba adresa - u slučaju kad računalo iz privatne mreže želi pristup Internetu
  - pretvarač mrežnih adresa<sup>58</sup> - pretvara privatnu adresu u javnu
    - ⇒ mijenja zaglavlje datagrama tako da preslikava privatnu adresu u jednu od adresa iz javnog raspona
    - ⇒ ako za zadani par privatna adresa - javna adresa određeno vrijeme nema aktivne komunikacije, javna adresa se oslobađa

<sup>55</sup> *Classless Inter-Domain Routing* - CIDR

<sup>56</sup> *Regional Internet Registry*, 5 regija: Afrika (AfriNIC), Azija i Pacifik (APNIC), Sjeverna Amerika (ARIN), Latinska Amerika i Karibi (LACNIC), regija Europe, Srednjeg istoka i središnje Azije (RIPE NCC)

<sup>57</sup> *Dynamic Host Configuration Protocol*

<sup>58</sup> *Network Address Translator* - NAT

## 7. Format IP-datagrama

- IP-zaglavlje - bez opcija ima duljinu 20 okteta
  - 4 bita: duljina IP-zaglavlja (*Internet Header Length*) - duljina zaglavlja izražena u 32-bitnim riječima
  - 8 bita: vrsta usluge - kvaliteta tražena za datagram (zamišljeno kao polje za prioritet, kašnjenje, propusnost i sl., ali se većinom ne koristi za inicijalnu namjenu)
  - 16 bita: ukupna duljina datagrama - uključuje zaglavlje, mjeri se u oktetima
  - 16 bita: identifikacija - jedinstveni broj datagrama, isti za sve fragmente
  - 3 bita: zastavice vezane uz fragmentiranje (0, DF<sup>59</sup>, MF<sup>60</sup>)
  - 21 bit: offset fragmenta - za izračunavanje položaja fragmenta u datagramu
  - 8 bita: vrijeme života datagrama u mreži (*Time To Live*) - najveći dopušteni broj skokova prije nego datagram bude odbačen (u svakom usmjeritelju se umanjuje za jedan)
  - 8 bita: protokol - brojčana oznaka protokola višeg sloja čije podatke IP nosi (npr. TCP 0x06, UDP 0x11)
  - 16 bita: zaštitna suma zaglavlja - za otkrivanje pogrešaka u zaglavlju datagrama
  - 32 bita: izvorišna IP adresa
  - 32 bita: odredišna IP adresa
  - opcije - posebne mogućnosti, npr. izvorno određivanje puta, sigurnost
  - punjenje - popunjavanje nulama do višekratnika od 32 bita
- povezanost polja s funkcijama IP-a
  - omatanje podatkovnih jedinica transportnog sloja - IHL, ukupna duljina datagrama, oznaka protokola višeg sloja
  - adresiranje - izvorišna i odredišna IP-adresa
  - fragmentiranje - identifikacija datagrama, zastavice, oznaka mjesta fragmenta
  - usmjeravanje - TTL, izvorišna i odredišna IP-adresa

## 8. Fragmentiranje IP-datagrama

- netransparentno fragmentiranje
- u slučaju gubitka jednog fragmenta cijeli datagram je uništen
- pošto svaki fragment ima cijelo zaglavlje, prenosi se manje korisne informacije

## 9. Usmjeravanje u Internetu

- funkcije - obavlja usmjeritelj
  - usmjeravanje u užem smislu - postupak pronalaženja puta od izvorišnog do odredišnog čvora, koristi odredišnu IP-adresu
    - ⇒ osim upravljačke informacije, potrebno imati znanje o topologiji i uvjetima u mreži - tablica usmjeravanja
      - sastoji se od putova / ruta (*route*) - svaka sadrži adresu sljedećeg skoka i pripadajućeg odlaznog sučelja
      - *default* - put koji se primjenjuje ako u tablici nije pronađeno specifičnije rješenje
  - prosljeđivanje - određivanje na koje odlazno sučelje proslijediti paket
    - ⇒ priprema za spuštanje datagrama u okvir protokola sloja podatkovne poveznice
    - ⇒ pronalaženje MAC-adrese sljedećeg skoka na temelju IP-adrese

## 10. Kontrolni protokoli mrežnog sloja

- *Internet Control Message Protocol* (ICMP) i *Internet Group Management Protocol* (IGMP) - smatraju se dijelom IP-a, ali zapravo koriste IP kao dostavni mehanizam
- ICMP - za dojavu pogrešaka pri usmjeravanju i dostavi datagrama te neke druge funkcije nadgledanja i upravljanja
  - omogućuje dijagnostiku problema u mreži - ne ispravlja problem, samo javlja stanje
  - mehanizam kojim se prenose dvije vrste kontrolnih poruka (dijave o pogrešci i zahtjevi za informacijom)
- IGMP - prijava i odjava sučelja krajnjeg uređaja u skupinu primatelja za višeodredišno razaslanje

---

<sup>59</sup> *Don't Fragment*

<sup>60</sup> *More Fragments* - 1 označava da ima još fragmenata nakon ovog

#### 11. *Address Resolution Protocol (ARP)*

- odgovoran za pridruživanje fizičke adrese IP-adresi
- primjena samo u lokalnoj domeni gdje određenoj IP-adresi treba pridružiti odgovarajuću MAC-adresu
- način rada
  - računalo koje šalje datagram u lokalnoj mreži razaslije opći upit s IP-adresom
  - na upit se odaziva računalo i šalje podatak o svojoj MAC adresi
- *Reverse ARP* obavlja suprotnu zadaću - iz MAC adrese određuje IP-adresu

## Međusobno povezivanje mreža

- opći model - povezivanje se ostvaruje međusustavom putem kojega komuniciraju krajnji sustavi
  - krajnji sustav - računalo, cijela mreža ili dio mreže
  - međusustav - mrežni uređaj koji može imati dvije funkcije: povezivanje krajnjih sustava u mrežu i povezivanje mreža
  - kad krajnji sustavi imaju jednake sve slojeve do uključivo (N)-sloja, međusustav samo razmjenjuje protokolne jedinice podataka tog sloja između priključenih sustava
  - kad su (N)-sloj ili niži slojevi u krajnjim sustavima različite izvedbe, u međusustavu se provodi usklađivanje
  - mrežni uređaji (N)-sloja imaju izvedene i sve funkcije nižih slojeva
- povezivanje u fizičkom sloju - produljenje fizičkog prijenosnog medija
  - osnovni problem je gušenje ili izobličenje signala pa se svako toliko postavi obnavljač ili regenerator
    - ⇒ za velike udaljenosti najbolja optička vlakna jer je regenerator potreban jednom u svakih 100 km ili više
- povezivanje u sloju podatkovne poveznice - most
  - omogućuje prosljeđivanje okvira i povezivanje raznovrsnih ili istovrsnih lokalnih mreža
- povezivanje u mrežnom sloju
  - pomoću usmjeritelja
- povezivanje u aplikacijskom sloju - potrebno ako je riječ o potpuno različitim mrežama
  - prilaz (*gateway*) - povezivanje dijelova mreža različitih obilježja kojima se ostvaruje ista usluga (npr. VoIP ili paketski pristup Internetu iz pokretne mreže)

### 1. Povezivanje lokalnih mreža

- u fizičkom sloju i sloju podatkovne poveznice
- domena sudara - dio mreže unutar kojeg se javlja sudar kad više stanica istodobno šalju okvire (obilježje lokalne mreže)
- domena razašiljanja - dio mreže unutar kojeg se svim stanicama razašilju jedinice podataka (obilježava sve mreže i sve slojeve koji mogu razašiljati podatke)
- obnavljač
  - povezuje dva segmenta lokalne mreže i obnavlja signal izobličen zbog gušenja i disperzije
  - povećava kašnjenje pa se ne preporuča više od četiri u seriji
  - prvotno se koristio s koaksijalnim kabelom, no kako je ta primjena mala u lokalnoj mreži, više nema praktično značenje
  - parični obnavljač (*hub*)
    - ⇒ signal primljen na jednom priključku pojačava i obnavlja njegov izvorni oblik te ga šalje na sve ostale priključke
    - ⇒ stanice se priključuju putem dvije parice (četverožično): jedna parica za predaju, a druga za prijam signala
    - ⇒ poludvosmjerna komunikacija i svugdje ista brzina prijenosa
    - ⇒ fizička topologija je zvijezda, a logička sabirnica
  - nema razdvajanja domene sudara ni domene razašiljanja
  - konceptijsko značenje - u primjeni nisu obnavljač ni parični obnavljač, nego LAN-komutator koji obavlja prosljeđivanje okvira i obnovu signala

- most
  - puna funkcionalnost sloja podatkovne poveznice → povezivanje više lokalnih mreža
  - geografska podjela: lokalni i udaljeni mostovi
  - podjela s obzirom na vrstu lokalnih mreža
    - ⇒ mješoviti/translacijski - povezuje lokalne mreže s različitim protokolima podsloja MAC, vrši pretvorbu protokola na podsloju LLC
    - ⇒ transparentni/MAC most - povezuje mreže s istim protokolima podsloja MAC (nije potrebna pretvorba)
  - razdvaja domene sudara
  - najčešće koriste metodu *spremi pa proslijedi*
    - primi cijeli okvir
    - provjeri ispravnost okvira
    - proslijedi okvir na izlazni priključak ili više njih
  - ⇒ kašnjenje ovisi o duljini okvira
  - ⇒ prednost što omogućuje povezivanje lokalnih mreža različitih brzina prijenosa
  - sadržava tablicu prosljeđivanja (broj fizičkog priključka, MAC-adresa) koja se popunjava na temelju MAC adrese izvorišta i broju fizičkog priključka na koji je okvir stigao
  - provjeravanje unosa u tablici za primljeni okvir
    - ⇒ namjena za stanicu koja je spojena na priključak s kojeg je okvir došao → uklanja ga se iz memorije
    - ⇒ namjena za stanicu koja je spojena na neki drugi priključak → prosljeđivanje na taj priključak
    - ⇒ MAC-adresa odredišta nepoznata → šalje se na sve priključke osim onog s kojeg je primljen
  - L2-komutator (zamjena za most)
    - ⇒ funkcije izvedene sklopovski, što pridonosi povećanju brzine obrade okvira
    - ⇒ omogućuje više istodobnih dvosmjernih komunikacija između različitih priključaka
    - ⇒ LAN-komutator - namjena za lokalne mreže; povezivanje istovrsnih mreža istih ili različitih brzina prijenosa
      - povezivanje u stablastu topologiju → korištenje *Spanning Tree* protokola za generiranje optimalne topologije
    - ⇒ ethernetki komutator - fizička i logička topologija zvijezde i parica kao fizički medij (CSMA/CD više nije potreban)

## 2. Povezivanje u mrežnom sloju: IP-mreža

- usmjeritelj (*router*) - usmjerava i prosljeđuje pakete
  - ako povezuje dvije mreže s različitim slojevima podatkovne poveznice, obavlja pretvorbu formata okvira
  - razdvaja domene sudara i domene razošiljanja okvira
  - ne razdvaja domene razošiljanja paketa (datagrama)
  - više priključaka, moguće međusobno povezivanje više usmjeritelja (stvaranje velikih mreža)
  - L3-komutatori - za potrebe u lokalnim mrežama (zamjena za usmjeritelj u lokalnim mrežama)
    - ⇒ sklopovski izvedene funkcije prosljeđivanja paketa → velike brzine rada
    - ⇒ razlika u odnosu na usmjeritelj - vrste priključaka, funkcije potrebne za povezivanje