Sadržaj

SADRŽAJ **1**

UVOD **3**

1. RAZVOJ RAČUNARSKIH MREŽA 5
   - *1.1 Paketski prenos podataka* *5*
   - *1.2 Standardizacija* *6*
   - *1.3 Predmet udžbenika* *11*

PRVI DEO: NIŽI SLOJEVI **12**

2. KONTROLA PRISTUPA MEDIJUMU 13
   - *2.1 Podela na kanale* *14*
   - *2.2 Pristup sa dodelom dozvole* *14*
   - *2.3 Slučajni pristup* *15*
   - *2.4 CSMA/CD* *19*
   - *2.5 Eternet – realizacija CSMA/CD* *24*
3. ETERNET 26
   - *3.1 Kolizija i njeni hirovi* *26*
   - *3.2 Do poslednjeg bajta* *29*
   - *3.3 MAC adrese* *30*
   - *3.4 Format Eternet paketa* *30*
   - *3.5 Zbogom ripiteri* *32*
   - *3.6 Zbogom koaksijalci* *35*
   - *3.7 Zbogom kolizijo* *37*
   - *3.8 Need for speed* *37*
4. DANAŠNJE ETERNET MREŽE 39
   - *4.1 Spanning tree protocol* *39*
   - *4.2 STP iz pozicije svičeva* *43*
   - *4.3 STP u stacionarnom stanju* *48*
   - *4.4 Rapid Spanning Tree Protocol – RSTP* *55*
   - *4.5 Virtualne lokalne računarske mreže - VLAN* *58*

DRUGI DEO: MREŽNI SLOJ **63**

5. INTERNET PROTOKOL 64
   - *5.1 Princip komunikacije preko IP protokola* *65*
   - *5.2 Karakteristike IP protokola* *66*
   - *5.3 Format IP paketa* *67*
   - *Fragmentacija IP paketa* *69*
   - *5.4 IP adrese* *70*
6. PRINCIPI RUTIRANJA 77
7. *DISTANCE-VECTOR* PROTOKOLI RUTIRANJA 87
   - *7.1 Princip rada* *87*
   - *7.2 Tehnike zaštite od neregularnosti* *90*
   - *7.3 RIP ruting protokol* *92*
8. LINK-STATE PROTOKOLI RUTIRANJA 94
   - *8.1 Princip rada* *94*
   - *8.2 OSPF ruting protokol* *97*
   - *8.3 Redistribucija ruta između ruting domena* *104*
9. ARP PROTOKOL 107
   - *9.1 Uparivanje IP adresa i MAC adresa* *107*

9.2 Primer IP komunikacije ... 109
10. ICMP PROTOKOL ... 113
10.1 Vrste ICMP poruka ... 113
10.2 Primena ICMP protokola ... 115
TREĆI DEO: VIŠI SLOJEVI ... 118
11. TRANSPORTNI SLOJ ... 119
11.1 Opšte funkcije transportnog sloja ... 119
11.2 UDP protokol ... 123
11.3 TCP protokol ... 125
11.4 QUIC protokol ... 139
11.5 Praćenje stanja na transportnom nivou ... 140
12. APLIKATIVNI SLOJ ... 143
12.1 Veb servis ... 143
12.2 Proksi servis ... 144
12.3 FTP – Protokol za razmenu datoteka ... 145
12.4 Servis elektronske pošte ... 146
12.5 Udaljeni pristup uređajima ... 147
13. DNS – SISTEM IMENOVANJA ... 149
13.1 Organizacija i definicija domena ... 149
13.2 Razrešavanje naziva ... 152
13.3 Zapisi u DNS zonama ... 155
REFERENCE ... 163

Uvod

Potreba za računarskim komunikacijama nastala je neposredno nakon pojave prvih računara. U to doba računari su bili znatno drugačiji od današnjih, ne samo po primenjenoj tehnologiji i performansama, već i po svom fizičkom izgledu i veličini. Tadašnji računari su bili izuzetno glomazni, podeljeni u više fizičkih celina (tehničkih ormana) za procesor, memoriju, diskove, spoljne jedinice i njihove kontrolere. Ovi računari su se nazivali mejnfrejm računari (eng. *mainframe*) i zahtevali su instalaciju u posebnim prostorijama sa obezbeđenom klimatizacijom i drugim specifičnim uslovima. Tada izuzetno skupi, njihovo korišćenje je bilo deljeno od strane više korisnika, pristupajući im preko monitora i tastature, koji su mogli da budu u susednoj sobi ili na većim rastojanjima, udaljenim zgradama ili gradovima. Pritisak na tastaturi se binarno kodirao i direktnom fizičkom vezom prenosio do računara, tačnije kontrolera periferije, a odgovor se vraćao po istoj vezi za prikaz na monitoru. Za ovakvu komunikaciju su se koristile direktne veze (kablovi), a na većim rastojanjima postojeće i stalno uspostavljene telefonske veze. Za prenos informacija koristili su se uređaji koji se zovu modemi (eng. *modem*), a koji su binarne podatke pretvarali u zvuk, koji se prenosio preko telefonske veze, a na prijemnoj strani ponovo pretvarao u binarne podatke.

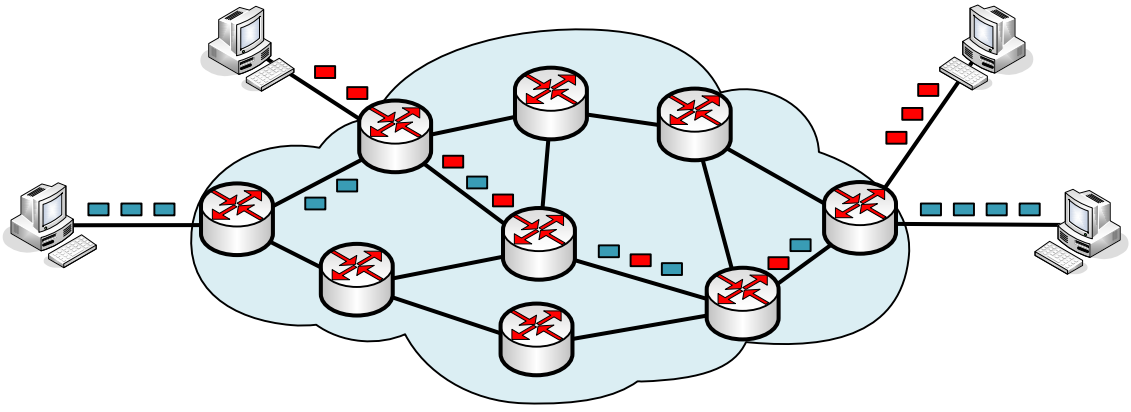
Iako je navedena tehnologija služila za prenos binarnih podataka, to ipak nisu bile računarske mreže, za koje je potrebno da postoji više računara koji međusobno komuniciraju. Računarske mreže se sastoje od fizičke infrastrukture koja povezuje računare i funkcionalne logike koja omogućava ispravnu razmenu podataka. Fizičku infrastrukturu čine fizičke veze (linkovi) i komunikacioni uređaji, dok je funkcionalna logika definisana skupom komunikacionih protokola koji uređuju mašinski prenos podataka. Materijal u ovom udžbeniku se u najvećoj meri odnosi na komunikacione protokole, budući da oni opisuju logiku funkcionisanja računarskih mreža.

1. Razvoj računarskih mreža

Prvobitni mejnfrejm računari su se povezivali tada raspoloživom tehnologijom, koja je podrazumevala modeme povezane preko telefonskih linija, što se nazivalo „komutacija kola“ nastalo iz prevoda engleskog termina *Circuit Switching*. Telefonske veze su mogle da se uspostavljaju po potrebi, ali je češći bio slučaj njihovog permanentnog zakupa samo za povezivanje krajnjih tačaka (eng. *leased line*). Podaci su se prenosili u manjim celinama, tzv. porukama, koje su bile posebno formatirane kako bi ih obe strane u komunikaciji mogle ispravno prepoznati. Prednost ovakvog načina povezivana se ogledala u dostupnosti i povezanosti telefonskih linija na globalnom nivou. Iako je tada predstavljao uobičajeni pristup, ekskluzivno korišćenje veze na celom putu između povezanih uređaja bilo je neekonomično i neskalabilno.

1.1 Paketski prenos podataka

Radikalno novi pristup se javio 1965. godine, koji su nezavisno predložili istraživači Donald Davies i Paul Baran [1]. Umesto direktnog povezivanja krajnjih tačaka, novi pristup je omogućavao ravnopravno povezivanje većeg broja učesnika u zajedničku komunikacionu infrastrukturu, po kojoj se podaci šalju u manjim celinama, tzv. paketima. Komunikaciona infrastruktura je time dobila novu logiku rada, koja je omogućavala da se paketi nezavisno prosleđuju do krajnjih odredišta. Ovu logiku je sprovodila mreža međusobno povezanih komunikacionih uređaja, što je nazvano **svičovanje paketa** (eng. *packet switching*). Prednost se ogledala u tome što je veći broj komunikacionih tokova mogao istovremeno da deli pojedinačne linkove, tako što su se njihovi paketi naizmenično prenosili u kratkim vremenskim intervalima (Slika 1.1). To je za posledicu imalo veliku fleksibilnost povezivanja i skalabilnost broja učesnika. Za veći intenzitet saobraćaja nije bilo potrebe uvoditi nove fizičke linkove, već samo povećavati kapacitet postojećim linkovima. Time je nastao koncept računarskih mreža u modernom smislu.



Slika 1.1. Mreža sa svičovanjem paketa

Dugačak je put od idejnog koncepta do tehničke realizacije, posebno kod ovako radikalnih promena. I sam koncept je naišao na otpor klasičnog telekomunikacionog sektora i postojeće industrije, pa je prva realizacija sprovedena kao istraživačko-eksperimentalni projekat finansiran od Agencije za napredna istraživanja pri Ministarstvu odbrane Sjedinjenih Američkih Država (eng. *Advanced Research Projects Agency, Department of Defence – ARPA*). Mreža

pod nazivom ARPANET je zaživela 1969. godine, povezujući četiri računara univerzitetskih centara u SAD. Pokretačku logiku rada mreže je činio mrežni protokol pod nazivom *Network Control Protocol* (NCP), koji predstavlja prvi protokol koji realizuje princip svičovanja paketa [2]. Narednih godina mreža je unapređivana, uz priključivanje sve većeg broja univerzitetskih i istraživačkih organizacija.

Razvoj mreže je ubrzo prevazišao istraživačke i eksperimentalne okvire, što je zahtevalo koordinirani rad, koji je organizovan u formi radne grupe (*Network Working Group*). Osim upravljačke uloge u mreži, radna grupa je usvajala i tehničku specifikaciju u vidu dokumenta pod nazivom *Request for Comments* (RFC). Inicijalno korišćeni kao neformalni dokumenti preporuka i tehničkih principa, što ukazuje i sam naziv, ubrzo su prerasli u formalne tehničke specifikacije protokola i servisa. Tako je nastala serija referentnih tehničkih dokumenata, koji su numerisani rednim brojevima, i danas aktuelni pod nazivom RFC dokumenti, u žargonu poznato kao „Internet standardi“ [3].

Koncept računarske mreže na bazi svičovanja paketa je bio potvrđen i primenjen u praksi, ali i dalje samo u akademskoj i istraživačkoj zajednici. Slične inicijative su praćene i u drugim zemljama, takođe kao istraživački projekti, poput *Cyclades* mreže u Francuskoj. Pojedini proizvođači računara su takođe realizovali svoje mrežne protokole na bazi svičovanja paketa, poput korporacije IBM koja je razvila SNA protokol (*System Network Architecture*), *Digital Equipment Corporation* (DEC) sa mrežnim protokolom DECnet i slično. Problem je bio što su svi ovi protokoli bili različiti, međusobno nekompatibilni i podržani samo od računara ovih proizvođača. Javila se potreba za standardizacijom koja bi uredila različita tehnološka rešenja i omogućila interoperabilnost opreme različitih proizvođača.

1.2 Standardizacija

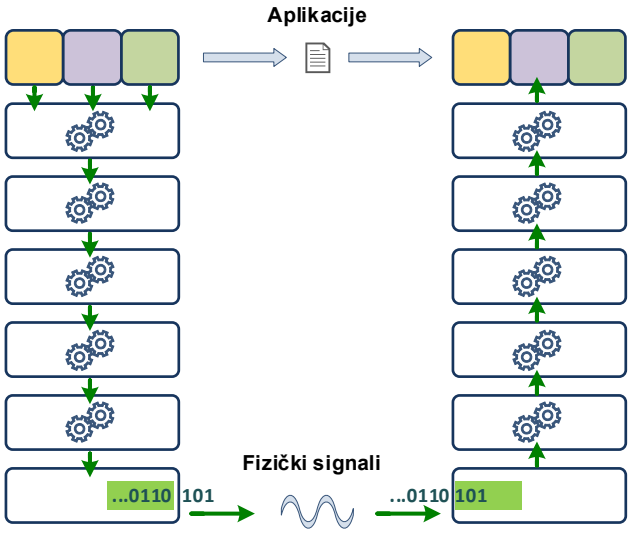
Radna grupa ARPANET mreže je prerasla u Međunarodnu radnu grupu (eng. *International Network Working Group* – INWG), koja se zalagala za promociju nove mrežne tehnologije na bazi svičovanja paketa. Oni su 1975. godine podneli predlog za standardizaciju novog protokola međunarodnoj organizaciji za standarde u telekomunikacijama – CCITT (eng. *International Telegraph and Telephone Consultative Committee*), danas pod nazivom *International Telecommunication Unit – Telecommunication Standardization Sector*, skraćeno ITU-T. Predlog je bio odbijen, pod formalnim obrazloženjem da je netestiran i riskantan, ali suštinski pod uticajem telekomunikacione industrije, koja se trudila da zadrži konzervativni monopolistički pristup na tržištu.

Proces standardizacije je 1977. godine prihvatila Međunarodna organizacija za standarde (eng. *International Organization for Standardization* – ISO), pod nazivom *Open System Interconnection* (OSI). Većina članova Međunarodne radne grupe INWG se pridružila ovom procesu, kao i veliki broj proizvođača opreme. Osnovni principi za donošenje novih standardizovanih protokola bili su:

- otvorenost, što podrazumeva da je komunikacija nezavisna od proizvođača uređaja i
- modularnost, što podrazumeva da je kompleksan problem podeljen u manje celine.

Na ovim principima uspostavljana je nova komunikaciona arhitektura koju uređaji treba da zadovolje, poznata kao OSI referentni model [4]. Ovaj model nastao je iz činjenice da postoji dosta velika razlika između interpretacije aplikativnih podataka na visokom logičkom nivou u odnosu na fizički prenos podataka kroz mrežu koji se odvija putem elektromagnetnih signala. U skladu sa principom modularnosti, proces transformacije aplikativnih podataka u prenosne

signale podeljen je u više nezavisnih celina, tzv. slojeva ili nivoa (eng. *layer*). Svaki sloj ima strogo definisanu ulogu i način komunikacije sa višim i nižim slojem, posredstvom interfejsa koji se naziva *Service Access Point* (SAP). Tom prilikom naziv „servis“ ukazuje da jedan sloj pruža usluge drugom sloju. Podaci se pri slanju između slojeva prenose naniže, dok se na prijemu sprovodi obrnuti proces rekonstrukcije podataka, od nižih slojeva do odredišne aplikacije, što ilustruje Slika 1.2.



Slika 1.2. Modularna arhitektura podeljena na slojeve

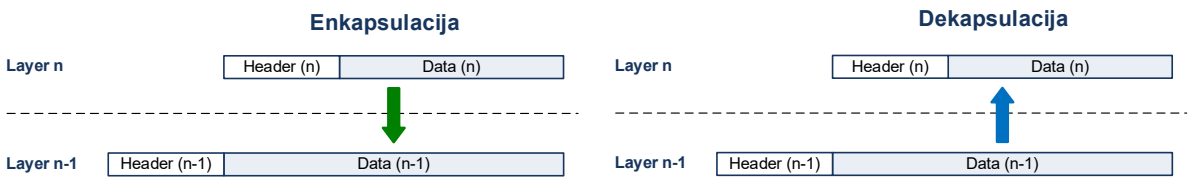
Konkretno, OSI referentni model uvodi sedam slojeva (nivoa), i to:

- L7, Aplikativni sloj (eng. *Layer 7*, *Application Layer*)
- L6, Prezentacioni sloj (eng. *Layer 6, Presentation Layer*)
- L5, Sloj sesije (eng. *Layer 5, Session Layer*)
- L4, Transportni sloj (eng. *Layer 4, Transport Layer*)
- L3, Mrežni sloj (eng. *Layer 3, Network Layer*)
- L2, Sloj veze podataka (eng. *Layer 2, Data-link Layer*)
- L1, Fizički sloj (eng. *Layer 1, Physical Layer*).

Na aplikativnom sloju uparene aplikacije međusobno logički komuniciraju razmenom struktuiranih podataka u vidu posebno formatiranih poruka. Spuštajući se naniže pri slanju, naredni niži sloj u celini preuzima ove poruke i posmatra ih kao monolitne podatke, bez poznavanja njihove strukture. Od ovih podataka kreira se nova poruka, postavljajući podatke sa višeg sloja u deo koji se naziva **telo poruke** (eng. *body*), dok se na početku poruke dodaje kontrolni podaci iz tekućeg sloja, u delu koji se naziva **zaglavlje** (eng. *header*). Ovako kreiranu poruku tekući sloj predaje nižem sloju, koji na svom nivou sprovodi isti postupak – preuzima poruku i postavlja je u telo svoje poruke, tzv. **enkapsulacija** (eng. *encapsulation*). Poruka isporučena fizičkom sloju se serijalizuje u niz bita, koji se kodiraju i transformišu u prenosne signale.

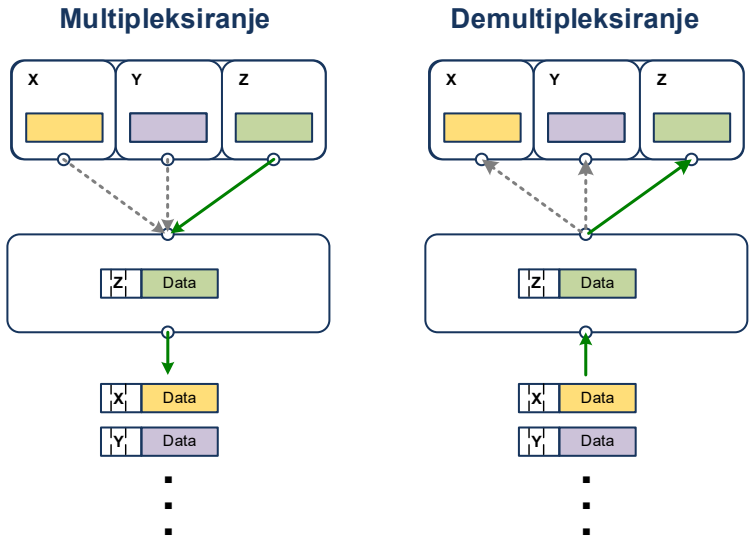
Na prijemu se u svakom sloju sprovodi inverzan proces postepenog raspakivanja podataka, tzv. **dekapsulacije** (eng. *decapsulation*). Svaki sloj dobija poruku u formatu koji je kreirao i poslao njemu upareni sloj na istom nivou. Iz zaglavlja se tumače poslati kontrolni podaci, i ako

je sve ispravno, telo poruke se u celini predaje višem sloju. Ovaj postupak se sprovodi sve do aplikativnog sloja, gde se rekonstruišu originalno poslati aplikativni podaci (Slika 1.3).



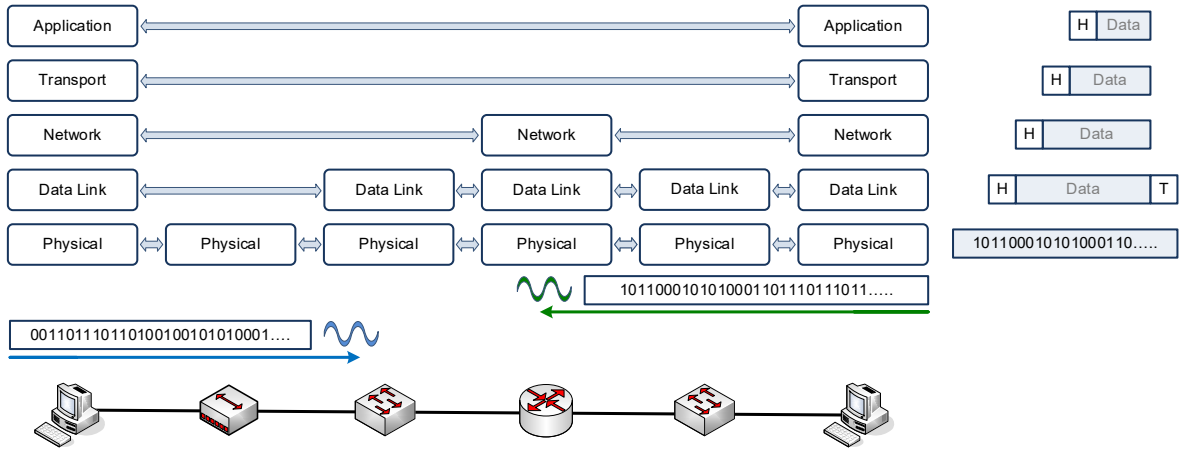
Slika 1.3. Proces enakapsulacije pri slanju i dekapsulacije pri prijemu podataka

Kao što postoji više aplikacija koje nezavisno funkcionišu na aplikativnom sloju, tako i na svakom nižem sloju mogu istovremeno funkcionisati više različitih i nezavisnih entiteta, odnosno implementacija različitih protokola. Poruke svih ovih protokola se na isti način preuzimaju i tretiraju od strane nižeg sloja, ali se one moraju posebno označiti kako bi se na prijemnoj strani adekvatno prepoznali i isporučili uparenom protokolu ili aplikaciji. Ovaj proces prenosa podataka iz različitih izvora na višem sloju kroz zajednički komunikacioni kanal koji obezbeđuje niži sloj, naziva se **mulitipleksiranje** (eng. *multiplexing*), dok se obrnuti proces na prijemnoj strani naziva **demultipleksiranje** (eng. *demultiplexing*), što ilustruje Slika 1.4.



Slika 1.4. Proces multipleksiranja pri slanju i demultipleksiranja pri prijemu podataka

Imajući ovo u vidu, može se smatrati da se na logičkom nivou sprovodi komunikacija putem poruka između slojeva istog nivoa na udaljenim uređajima. Podaci se na krajnjim uređajima fizički prenose između slojeva „po vertikali“, dok se na logičkom nivou komunikacija odvija između slojeva istog nivoa. Na ovom mestu treba istaći da se na putu između učesnika u mreži može javiti više međutačaka, odnosno komunikacioni uređaji koji implementiraju slojeve na nižim nivoima, prihvataju poruke i prosleđuju ih dalje prema odredištu, što ilustruje Slika 1.5.

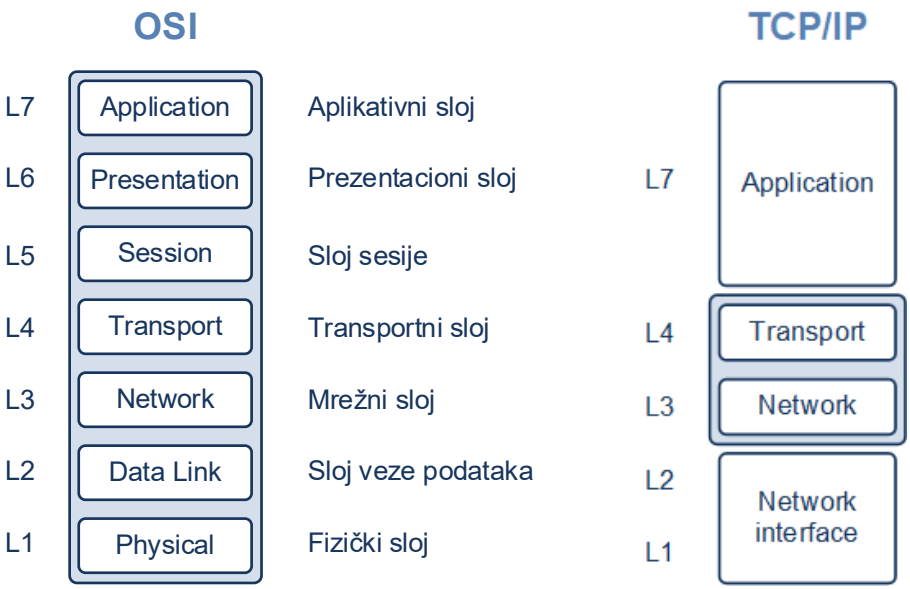


Slika 1.5. Fizički prenos podataka i logička komunikacija između uparenih slojeva

Nakon usvajanja OSI referentnog modela, proces standardizacije se fokusirao na pojedinačne protokole, pre svega na slojevima nižih nivoa, koji implementiraju mrežne funkcionalnosti i na krajnjim uređajima i na komunikacionim uređajima. Ovaj proces je ipak bio dosta spor, opterećen birokratskim procedurama, velikim brojem učesnika, često sa suprotstavljenim stavovima, ali i preambicioznim zahtevima. Protokoli koji su se razvili i usvojili bili su dosta robusni, komplikovani, skupi za realizaciju.

Nasuprot tome, razvoj u okviru ARPANET mreže je bio manje formalan, mnogo agilniji i fleksibilniji, uz efikasno testiranje i demonstraciju koncepta u praksi. To je dovelo do arhitekture koja je takođe bila bazirana na OSI referentnom modulu, ali u pojednostavljenoj varijanti, sa posebnim fokusom samo na mrežni sloj (L3) i transportni sloj (L4). Zbog velike implementacione zavisnosti dva najniža sloja, fizičkog i sloja veze podataka, oni se obično tretiraju objedinjeno, a u to vreme su bili nezavisno razvijani od strane različitih proizvođača, a standardizovani od strane organizacije *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, daleko popularnije po skraćenici IEEE (izgovara se „aj-tripl-i“, eng. „*I-triple-E*“). Sa druge strane, tri najviša sloja suštinski su bliži softverskim implementacijama nego mrežnim tehnologijama, pa su objedinjeni sa aplikativnim slojem.

Rezultat ovakvog pristupa je bio jedan jednostavan protokol na mrežnom nivou, pod nazivom ***Internet Protocol*** (**IP**), dva protokola na transportnom nivou, i to ***Transmission Control Protocol*** (**TCP**) i znatno jednostavnija varijanta pod nazivom *User Datagram Protocol* (UDP), sa još nekoliko pratećih pomoćnih protokola koji su upotpunjavali pojedine nedostajuće funkcije. Celokupni skup ovih protokola poznat je pod nazivom **TCP/IP**.



Slika 1.6. OSI i TCP/IP arhitektura podele na slojeve

TCP/IP familija protokola je predstavljala ono što se danas u razvoju softvera po agilnim metodologijama zove „minimalno održivo rešenje“ (*Minimum Viable Product* – MVP). Rešenje doneto i realizovano u minimalnom, ali funkcionalnom obliku, i primenjeno u praksi, ali samo u okviru istraživačke i univerzitetske zajednice, gde je ostvarila veliku popularnost. Za to vreme, telekomunikaciona i računarska industrija na strani proizvođača i ostali sektori na strani korisnika, sledili su konvencionalni pristup vođen ISO standardizacijom. Bilo je jasno da je tehnologija na prekretnici, što je označeno kao rat između OSI i TCP/IP tehnologija. Ovaj „tehnološki rat“ je bio nepravedan[1] – OSI pristup imao podršku svih relevantnih faktora (vlada, kapitala, industrije, komercijalnih korisnika), ali je TCP/IP model, iako podržan samo od akademske zajednice, imao ključnu prednost – bio je jednostavan, a uz to je i radio.

Bitni datumi koji ilustruju razvoj događaja su sledeći:

- **1.1.1983**: Ministarstvo odbrane SAD (eng. *U.S. Department of Defence*), donosi odluku o prelasku sa *Network Control Protocol* na TCP/IP protokol u okviru ARPANET mreže.
- **Maj 1983**: ISO OSI referentni model je zvanično objavljen kao standard [4].
- **1985**: Nacionalni istraživački komitet SAD (eng. *U.S. National Research Council*) preporučuje da ARPANET postepeno pređe sa TCP/IP na OSI standard.
- **1988**: Ministarstvo trgovine SAD (eng. *U.S. Department of Commerce*) naložio je vladinim ustanovama prelazak na OSI standard do avgusta 1990. godine.
- **Kraj 80-tih**: Naznake neostvarenih očekivanja u OSI redovima
  - Brian Carpenter, “Is OSI Too Late?” [5]
  - Louis Pouzin, „Ten Years of OSI — Maturity or Infancy?” [6]
- **1990**: ARPANET projekat je zvanično završen, ali je mreža nastavila da funkcioniše i dalje se razvija finansirana od strane Nacionalne naučne fondacije SAD (eng. *U.S. National*

[1] A koji rat nije nepravedan?

Science Foundation – NSF) kroz program pod nazivom *National Science Foundation Network* (NSFNET). Mreža je prihvaćena pod novim neformalnim imenom – Internet.

- **1991:** Nastanak veb servisa, *World Wide Web* - WWW, Tim Berners-Lee.
- **1992:** NSF dozvoljava povezivanje komercijalnih korisnika, što je dovelo do formiranja Interneta u modernom smislu.

Time je ISO OSI definitivno izgubio rat od strane TCP/IP protokola, ali se i u narednim godinama smatralo da je TCP/IP suviše jednostavan za tada narastajuće multimedijalne potrebe. Bilo je pokušaja razvoja novih naprednih protokola, a upečatljiv je primer dugo razvijanog, ali brzo zaboravljenog, ATM protokola (eng. *Asynchronous Transfer Mode*). TCP/IP se nije mnogo menjao, a nedostajuće funkcije su upotpunjene dodatnim protokolima, kao što je sigurnost i podrška za video saobraćaj u realnom vremenu. Internet mreža se eksplozivno razvijala i u novi milenijum je ušla sasvim zrela, čak punoletna, budući da je za „rođenje“ Interneta (eng. „*the birth of the Internet*”) izabran 1.1.1983. godine kao datum zvaničnog uvođenja TCP/IP protokola u tadašnju ARPANET mrežu.

1.3 Predmet udžbenika

Predmet ovog udžbenika se odnosi na opis tehnologija i protokola, prateći slojeve od nižih ka višim, podeljeno u tri celine. Prvi deo je posvećen sloju podataka veze (eng. *Data link layer*), koji je vezan za fizički sloj kroz funkciju pristupa medijumu. Detaljno se opisuje danas dominantna tehnologija ove vrste koja se primarno koristi za lokalno povezivanje manjeg broja korisnika, tzv. Eternet mreže (eng. *Ethernet*). Materija prati postepeni razvoj tehnologije, od ranih potreba i praktičnih realizacija, opisom postepenih unapređenja i naknadno razvijanih protokola i tehničkih poboljšanja do oblika u kome se koristi danas.

Drugi deo udžbenika u potpunosti je posvećen Internet protokolu (IP) koji realizuje funkcije mrežnog sloja (L3), zajedno sa pratećim protokolima koji predstavljaju jezgro rada savremenih računarskih mreža, uključujući i globalnu Internet mrežu.

Treći i poslednji deo je posvećen višim slojevima, odnosno transportnom sloju i aplikativnom sloju. Detaljno su opisani TCP i UDP transportni protokoli, koji realizuju mrežne komunikacije između krajnjih uređaja. Na aplikativnom nivou se prikazuje princip rada aplikacija u klijent-server režimu, sa primerima najčešćih aplikativnih servisa. Zbog svoje važnosti za funkcionisanje Interneta, posebno je izdvojen servis obezbeđivanja imenovanja (eng. *Domain Name System*, skr. DNS), čiji se princip rada detaljno opisuje.

Prvi deo:

Niži slojevi

2. Kontrola pristupa medijumu

Podaci koji se prenose u računarskim mrežama predstavljaju niz bajtova određene veličine, tzv. paket, koji ima svoju definisanu strukturu kako bi se na prijemu podaci mogli ispravno rekonstruisati. Paket se zatim serijalizuje u nestruktuirani niz bitova, što i dalje predstavlja logičku interpretaciju podataka u obliku diskretnih vrednosti. Da bi se ove apstraktne informacije (nule i jedinice) prenele između učesnika u komunikaciji, one se moraju transformisati u određeni fizički signal koji se prenosi kroz njemu odgovarajući fizički medijum. To mogu biti nivoi električnog napona u bakarnim provodnicima, radio talasi u određenom opsegu frekvencija u bežičnim komunikacijama, svetlost u optičkim kablovima i slično. Shodno tome, način interpretacije jedinica i nula je različit. U optičkim komunikacijama se bitovi predstavljaju prisustvom i odsustvo svetlosti (fotona) u određenom (jako kratkom) vremenskom intervalu. U slučaju elektromagnetnih signala, što predstavljaju i radio-talasi u bežičnim komunikacijama i električni signali u bakarnim provodnicima, radi efikasnosti i prenosa veće količine informacija, više bitova se koduje u određenu vrednost, koja se pretvara u jačinu (amplitudu) signala. Tom prilikom, medijum se zauzima na određeni vremenski interval, ne samo da se svi bitovi iz paketa pretvore u vremenski promenljive signale, već i da ovi signali stignu i do najudaljenijih učesnika. Iako se signali prenose jako velikim brzinama, one su ipak konačne: elektromagnetni talasi radio komunikacija se kreću brzinom svetlosti, fotoni u optičkim kablovima nešto sporije (jer se ne prenose kroz vakuum), dok se elektro-magnetni talasi u bakarnim provodnicima prenose brzinom koja iznosi oko 2/3 brzine svetlosti. Naravno, svaki ovakav signal mora da se na prijemnoj strani jednoznačno transformiše u originalni izvorni niz bitova, da se prepozna struktura bajtova, i na osnovu toga da se ispravno izdvoje podaci koji se prenose.

Komunikacija u računarskim mrežama se sprovodi između većeg broja učesnika i svi oni pristupaju komunikacionom medijumu radi slanja i prijema paketa. Ako je medijum na ovaj način deljen od strane više učesnika, problem nastaje ako više njih šalju svoje paketa u istom ili bliskom vremenskom trenutku. Tada će paketi na medijumu da se „preklope“ u vremenu, odnosno njihovi signali će da se pomešaju (interferiraju) i međusobno unište tako da se informacije iz originalnih paketa ne mogu više rekonstruisati. Ova pojava se naziva kolizija.

Komunikacione tehnologije moraju da definišu sve detalje transformacije podataka u signale, njihov fizički prenos po medijumu i rekonstrukciju u originalne podatke. U opštem slučaju medijum se deli između više učesnika, a način njihovog dogovora oko pristupa i deljanja medijuma, uključujući i način tretiranja kolizije, naziva se kontrola pristupa medijumu (eng. *Media Access Control,* skr. *MAC*).

Svaki medijum i tehnologije prenosa podataka, ima svoj maksimalni kapacitet, odnosno propusni opseg (eng. *bandwidth*) izraženo u jedinici „biti u sekundi“ (eng. *bits per second*, skr. *bps*). Prilikom osmišljavanja određene komunikacione tehnologije postavlja se sledeće pitanje: kako na optimalan način *N* učesnika mogu da dele medijum kapaciteta *B* bps? U idealnom slučaju, ako samo jedan učesnik ima potrebu da šalje podatke, onda on treba da iskoristi maksimalni kapacitet od B bps, dok u slučaju više (N) učesnika kapacitet treba da se ravnomerno podeli da svaki učesnik ostvari protok od B/N bps. Takođe, potrebno je odrediti i način kako više učesnika deli medijum. Ipak, kao što ćemo u kasnijim primerima videti, možda i najbitniji zahtev je da tehnološko rešenje bude što jednostavnije za realizaciju, kako bi bilo ekonomski prihvatljivo za masovno korišćenje i dugoročni opstanak tehnologije.

Osnovne tehnike kontrole pristupa medijumu su sledeće:

- Podela na kanale (eng. *Channel Partitioning*)
- Pristup sa dodelom dozvole (eng. *Taking Turns*)
- Slučajni pristup (eng. *Random Access*)

2.1 Podela na kanale

Najjednostavnije rešenje kontrole pristupa je podela medijuma na više nezavisnih delova, tzv. kanala (eng. *Channel Partitioning*), i njihova dodela pojedinačnim učesnicima na ekskluzivno korišćenje. Frekvencijski domen za prenos radio signala se može podeliti na više frekvencijskih opsega koji nezavisno i istovremeno prenose signale (eng. *FDMA - Frequency Division Multiple Access*). Ovaj princip se već decenijama koristi pri emitovanju klasičnih radio i TV signala. U slučaju jedinstvenog fizičkog medijuma (npr. bakarnih provodnika), korišćenje medijuma se može podeliti u vremenu (eng. *TDMA - Time Division Multiple Access*). Tom prilikom svaki učesnik dobija fiksni vremenski interval (tzv. slot) za privremeno korišćenje medijuma po unapred utvrđenom redosledu.

Dva nedostatka su zajednička za obe tehnike. Prvo, broj učesnika je ograničen na maksimalni broj kanala koji je unapred fiksiran. Drugo, svaki učesnik može da iskoristi protok koji odgovara jednom kanalu (*B/N bps*), a ne i celom prenosnom medijumu (*B bps*). Ovo za posledicu ima da se medijum optimalno koristi jedino ako svi učesnici sprovode prenos podataka. U suprotnom i češćem slučaju, ako neko od učesnika nema podatke za slanje, njegov kanal tada ostaje neiskorišćen, što efektivno smanjuje iskorišćenost celog medijuma.

2.2 Pristup sa dodelom dozvole

Pristup medijumu sa dodelom dozvole podrazumeva dinamičko određivanje ko od učesnika i kada može da koristi medijum. Ovi se sprovodi kroz međusobnu komunikaciju učesnika, što može da bude centralno ili distribuirano.

U slučaju centralizovane kontrole, jedan učesnik, tzv. *master*, ima centralu ulogu tako što „proziva“ (eng. *polling*) ostale učesnike (eng. *slaves*) i daje im dozvolu korišćenja medijuma za slanje paketa. Ovaj mehanizam prozivanja zahteva posebnu kontrolnu komunikaciju između *master* i *slave* učesnika, koja je daleko od jednostavnog. Prvo, *master* mora da zna za sve ostale učesnike u mreži, koji zbog toga na neki način moraju da se prijave *master* uređaju. Dalje, *master* ne zna unapred da li pojedinačni učesnici imaju podatke za slanje, ali im naizmenično dodeljuje medijum na korišćenje. Ako uređaj poseduje spremne podatke za slanje, on ima na raspolaganju određeni vremenski interval za korišćenje medijuma, nakon čega ga oslobađa. U suprotnom slučaju, ako uređaj kome je dodeljen medijum u tom trenutku nema spremne podatke za slanje, on obaveštava *master* uređaj da odustaje od korišćenja medijuma. Medijum se tada oslobađa i po istom principu dodeljuje drugom učesniku, ali je određeni vremenski period ipak izgubljen, što smanjuje ukupnu efikasnost prenosa podataka. Osim ovog problema, kao i komplikovane realizacije i neravnomernog opterećenja *master* uređaja u odnosnu na ostale uređaje, možda i najveći praktičan problem je što će prestanak rada *master* uređaja da izazove prekid svih komunikacija u mreži. To ga čini tzv. jedinstvenom tačkom otkaza (eng. *single point of failure*). Ovo se može rešiti mehanizmom izbora novog master uređaja, što dodatno usložnjava logiku rada i njenu implementaciju na uređajima, što konsekventno dovodi do povećanja krajnje cene primene tehnologije.

Kod distribuirane dodele medijuma svi učesnici su ravnopravni i međusobno komuniciraju radi dogovora po pitanju korišćenja medijuma. Najpoznatija tehnologija ove vrste se bazira na mehanizmu kruženja posebnog kontrolnog paketa, tzv. žetona (eng. *Token Passing*). Ovaj paket sa kontrolnim podacima se prenosi u kružnom redosledu između svih učesnika, i preko njega se razmenjuju određene kontrolne informacije o korišćenju medijuma. Kružna komunikacija se obično rešava fizičkim povezivanjem učesnika u prstenastu topologiju (eng. *ring*). Uprošćeno govoreći, svaki učesnik kada dobije žeton, može da šalje podatke ako ih ima, nakon čega predaje žeton narednom učesniku čime mu se prepušta mogućnost korišćenja medijuma. Kao i žeton, paketi sa podacima se takođe prenose u kružnom redosledu do uređaja kome su namenjeni.

Najpoznatija tehnologija ove vrste je bio tzv. *TokenRing*, realizovana od strane proizvođača IBM. Ova tehnologija se dosta koristila krajem osamdesetih i početkom devedesetih godina dvadesetog veka, ali daleko od toga da je bila jednostavna i jeftina[2]. Budući da je mreža bazirana na prstenastoj topologiji, prekid rada jednog uređaja potencijalno može da prekine rad cele mreže. Zato su se računari na *TokenRing* mrežu povezivali preko posebnih pristupnih uređaja, tzv. *Media Access Unit* (skr. MAU). Prestankom rada povezanog računara, MAU uređaj je u bio u stanju da „prespoji“ prekinutu prstenastu vezu i omogući kontinuitet rada ostalih uređaja. Iako je *TokenRing* mreža omogućavala povezivanje i bakarnim i optičkim kablovima, brzine prenosa podataka su bile fiksne, ograničene na svega 4 Mbps, sa mogućnošću povećanja na 16 Mbps. Tehnologija se pokazala neskalabilna po pitanju povećanja brzine prenosa, što je uskoro postalo i najveće ograničenje.

U to vreme novija generacija tehnologije na bazi mehanizma kruženja žetona je bila tzv. FDDI (eng. *Fiber Distributed Data Interface*). Kao što ime ukazuje, prvenstveno je bila namenjena za prenos po optičkim vlaknima (eng. *fiber optics*), takođe po prstenastoj topologiji, ali kruženjem podataka u oba smera brzinama od 100 Mpbs. Jedna od specifičnosti je bila mogućnost otpornosti na fizički prekid prstena, tako što se ostatak dvosmernog prstena rekonfiguriše u jednosmerni prsten. Iako se od FDDI tehnologije dosta očekivalo, njen životni vek je bio još kraći. Osim ove, u to vreme egzotične osobine rekonfiguracije, malo šta je od FDDI tehnologije ostalo vredno za pamćenje.

2.3 Slučajni pristup

Metod slučajnog pristupa medijumu (eng. *Random Access*) je nastao upravo iz potrebe da se na što jednostavniji način omogući komunikacija većeg broja učesnika, bez složenog mehanizma dogovora oko korišćenja medijuma. Da bi sagledali kontekst u kome je nastala ova metoda, kao i njene specifičnosti, vratimo se još ranije u prošlost. Krajem šezdesetih godina prošlog veka Univerzitet na Havajima je imao potrebu da poveže svoje objekte koji su se nalazili na različitim ostrvima u radijusu od oko 300 km. Tačnije, postojao je samo jedan centralni računar, a bila je potreba da se sa njime omogući komunikacija velikog broja udaljenih pasivnih terminala (monitor i tastatura). Za komunikacioni medijum su izabrane radio veze i to sa dve frekvencije: jedna za komunikaciju u smeru od centralnog računara prema terminalima (eng. *downstream*), a druga u obrnutom smeru, od terminala do centralnog računara (eng. *upstream*). U oba slučaja se radi o deljenom medijumu (izabrani opseg frekvencija radio talasa), ali u smeru od centra ka periferiji samo jedan učesnik (centralni računar) može da šalje podatke, pa nema potrebe za posebnim mehanizmom dodele medijuma. Za razliku od toga, u

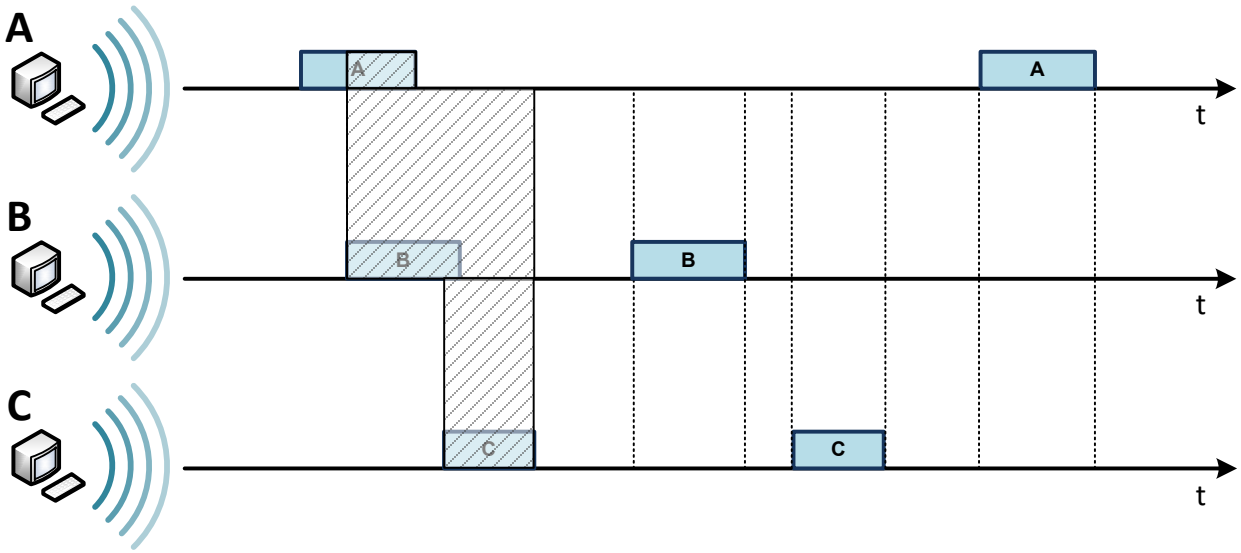
[2] IBM je u to vreme bio poznat po izuzetno kvalitetnim, ali skupim rešenjima.

suprotnom smeru više terminala može da šalje podatke ne deljeni medijum, pa je bilo potrebno rešiti problem pristupa medijumu. Podela na kanale po frekvenciji ili vremenu je odbačena, jer se predviđao porast broja učesnika, kao i potreba za prenosom sve veće količine podataka. Upravo zbog očekivanog velikog broja krajnjih terminala i tada skupih hardverskih resursa[3], posebno bitan uslov je bila jednostavnost same tehnologije i niska cena njene implementacije.

Uz ova ograničenja, nametnulo se rešenje koje je bilo neuobičajeno, ali ipak inventivno, što će se kasnije pokazati i kao revolucionarno – svakome se dozvoljava pristup medijumu u bilo kom trenutku kada postoje raspoloživi podaci za slanje, kao da nema drugih terminala koji takođe mogu da šalju svoje podatke. Budući da na ovaj način može nastati kolizija, za svaki paket koji se šalje od terminala očekivala se potvrda o njegovom uspešnom prijemu od strane centralnog računara. U slučaju da ovaj paket potvrde izostane, smatra se da je došlo do kolizije i paket će ponovo da se pošalje. Činjenica da je došlo do kolizije ukazuje na to da je i paket nekog drugog učesnika takođe uništen i da i on mora ponovo da se pošalje. Da bi se u ovakvim slučajevima izbegla ponovna kolizija neposredno nakon oslobađanja medijuma, pre ponovnog slanja istog paketa potrebno je sačekati i dodatni vremenski interval promenljivog trajanja, a koji se određuje na slučajan način, tako što se generiše pseudo-slučajan broj koji se množi fiksnim jediničnim intervalom. Na taj način se ipak ne garantuje uspešan prenos paketa, ali se značajno smanjuje verovatnoća ponovnog nastanka kolizije. Štaviše, prilikom svakog slanja se može proceniti verovatnoća nastanka kolizije u zavisnosti od opterećenja medijuma, ali se kroz određeni broj pokušaja očekuje da se paket ipak uspešno pošalje.

Slika 2.1 ilustruje primer slanja paketa od strane tri uređaja prema ovom principu. Čak iako su paketi manjim delom preklopljeni u vremenu nastaće kolizija i svi paketi će da budu u celini uništeni. Ukupno vreme od početka slanja prvog paketa do kraja slanja trećeg paketa će da bude izgubljeno, kao i vreme dodatnog čekanja na retransmisiju, što sve zajedno smanjuje rezultujuću efektivnost prenosa podataka. Redosled slanja paketa takođe nije određen, pa može da se desi da uređaji koji su inicijalno kasnije započeli slanje podataka, u narednim pokušajima posle kolizije to mogu uspešno da završe i pre drugih uređaja.

[3] Cena memorijskog bafera od 88 bajta za prijem i slanje paketa je tada koštala oko 300 dolara [7].



Slika 2.1. Primer kolizije i retransmisije pri slanju paketa od strane tri različita uređaja

Implementacija navedenog protokola podrazumevala je izradu novih uređaja preko kojih su se terminale povezivali na radio mrežu, a koji su nazvani *Terminal Control Unit* (skr. TCU). U junu mesecu 1971. godine prvi terminal je povezan na centralni računar brzinom od 9.600 kbps (Slika 2.2). Povezivanjem većeg broja terminala koje je usledilo nakon toga, koncept je u praksi uspešno verifikovan, a cela mreža je nazvana ALOHAnet.

Potrebno je imati u vidu da su tada terminali prenosili samo kratke tekstualne poruke zapakovane u male pakete, pa i pored, za današnja merila, skromnih brzina prenosa i mogućnosti nastanka kolizije, ovaj vid komunikacije je uspešno funkcionisao i za veći broj povezanih uređaja. Novi princip pristupa medijumu nazvan je slučajni pristup (*Random Access*), a ovaj konkretan metod je nazvan *Pure ALOHA*.



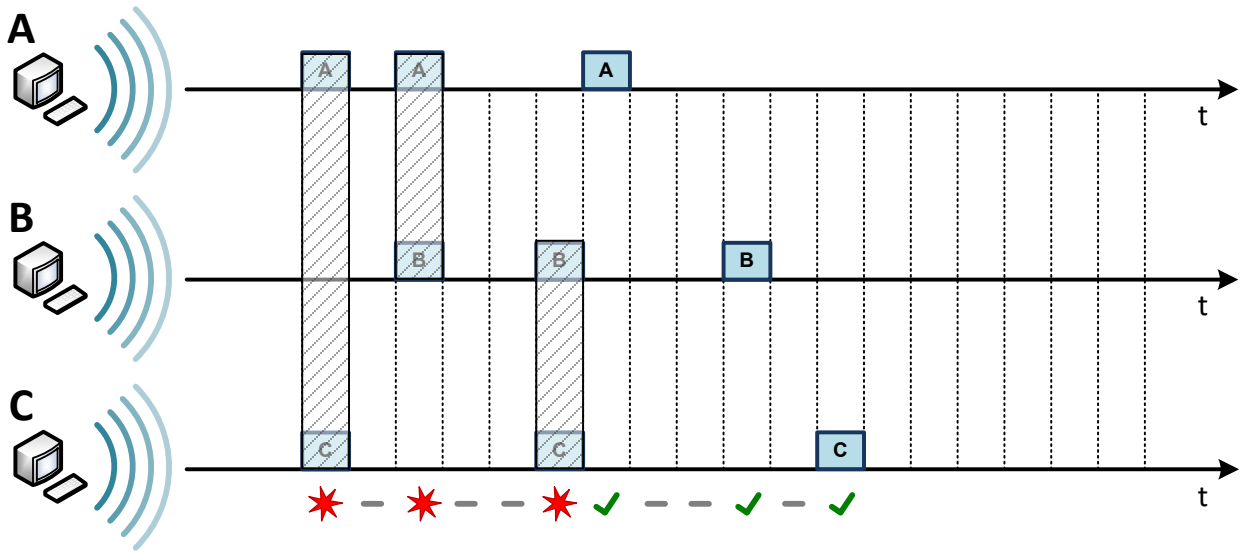
Slika 2.2. ALOHAnet, korisnički terminal povezan na TCU (eng. Terminal Control Unit), Havaji, 1971. godine [7].

Ipak, intuicija nam govori da povećanjem opterećenja mreže, kroz veći broj učesnika i njihovu intenzivniju komunikaciju, raste verovatnoća nastanka kolizije i retransmisije paketa. Time se smanjuje efikasnost prenosa, mereno kao količina uspešno prenetih bita u odnosu na raspoloživi kapacitet. To potvrđuje i matematički proračun, koji predviđa da sa povećavanjem opterećenja raste iskorišćenje mreže, ali samo do određenog nivoa, kada se ulazi u zasićenje, a koje iznosi svega 18.4% ukupnog kapaciteta. Daljim povećavanjem opterećenja, javljaju se

učestalije kolizije, čime se iskorišćenost naglo smanjuje. Drugim rečima, ako veći broj korisnika koristi ukupni kapacitet od 9.600 kbps, može se očekivati da se postiže ukupno iskorišćenje od svega 1.766 kbps. Budući da je broj povezanih terminala u ALOHAnet mreži bio sve veći, ovo se ubrzo pokazalo kao ozbiljno ograničenje.

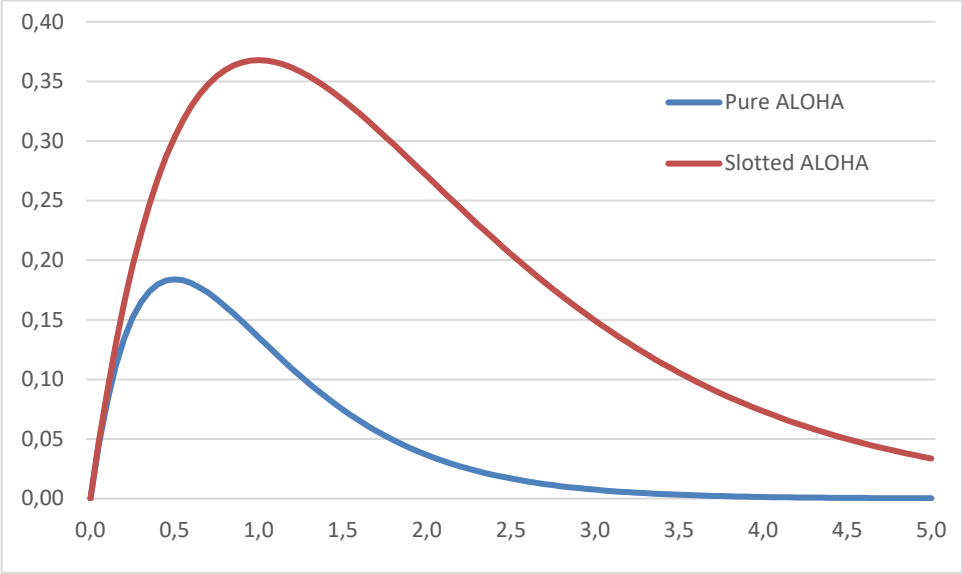
Posebno nepovoljna okolnost kod *Pure ALOHA* metode se odnosila na mogućnost „nadovezivanja“ kolizije od strane naknadno poslatih paketa, kao što ilustruje Slika 2.1. Da bi se trajanje kolizije kontrolisalo i ograničilo na fiksni interval, predloženo je da paketi budu ograničene veličine i da se mogu slati samo u određenim vremenskim periodima, tzv. vremenskim slotovima (eng. *time slot*). Tokom trajanja jednog slota, ako postoji samo jedan paket spreman za slanje, on će se uspešno preneti. U suprotnom slučaju, ako postoji više paketa, doći će do kolizije, ali će ona trajati najduže jedan slot vremena, bez obzira koliko paketa u tome učestvuje.

Ovaj metod je nazvan *Slotted ALOHA* (Slika 2.3), a matematički proračun pokazuje da se time duplira maksimalni protok u odnosu na *Pure ALOHA* prenos, čime se postiže maksimalno iskorišćenje od 36.6% ukupnog kapaciteta (Slika 2.4). Udvostručavanje protoka je predstavljalo značajno unapređenje, ali ipak po cenu nešto komplikovanijeg dizajna – bilo je potrebno da svi uređaji budu vremenski sinhronizovani, kako bi znali tačne trenutke početka slotova. Nakon implementacije ovog rešenja, *Slotted ALOHA* je uspešno puštena u rad 1973. godine.



Slika 2.3. Princip slanja paketa kod Slotted ALOHA mreže

Osim što je u ALOHAnet mreži prvi put primenjen metod slučajnog pristupa medijumu, ona će ostati upamćena i kao prva bežična mreža paketskog prenosa podataka, kao preteča današnjih bežičnih mreža (eng. *wireless*). Još značajnije, ALOHAnet je inspirisala razvoj nove tehnologije prenosa u lokalnim računarskim mrežama, tako što je princip slučajnog pristupa medijumu primenjen na bakarnim provodnicima koji su omogućili daleko veće brzine prenosa.

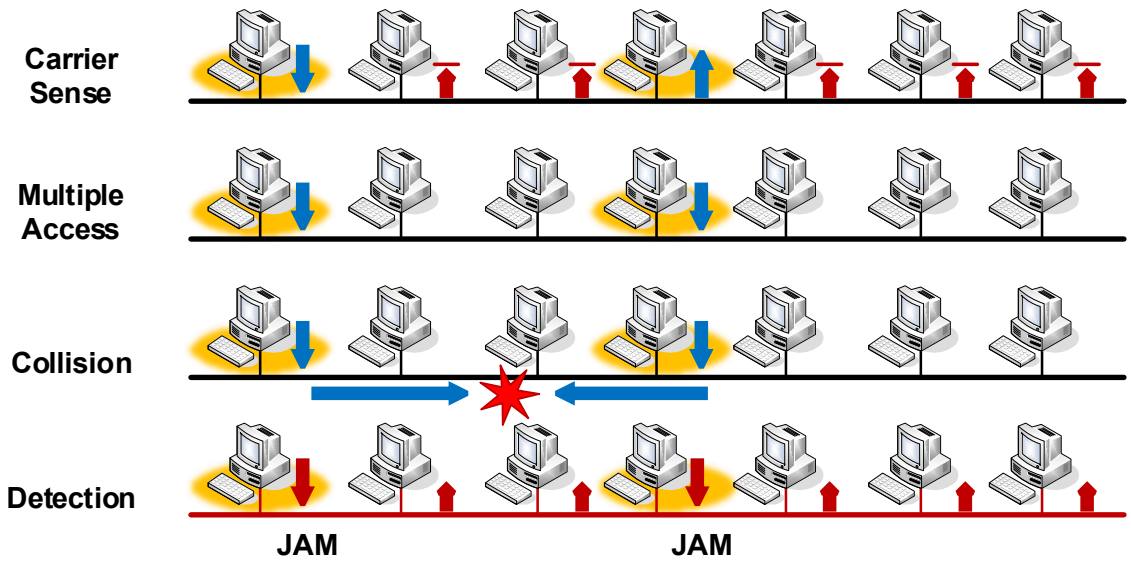


Slika 2.4. Iskorišćenost propusnog opsega za Pure ALOHA i Slotted ALOHA metod slučajnog pristupa medijumu

2.4 CSMA/CD

U tehnologijama koje se primenjuju u računarskim mrežama, pa tako i u ovoj knjizi, dosta se koriste različite skraćenice i akronimi. Neki od njih su zvučni i jednostavni za izgovaranja, poput do sada spominjanih „LAN“ i „MAC“ pojmova, dok su mnoge skraćenice čak i nezgrapne. Ipak, učestalim korišćenjem u tehničkoj literaturi i inženjerskoj praksi, ovi pojmovi se vremenom odomaće čak i u neengleskom govornom području. To je slučaj i sa pojmom CSMA/CD, koji se u ovom obliku ipak lakše piše i izgovara nego puni naziv tehnologije – „*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*“.

CSMA/CD metod pristupa medijumu je nastao adaptacijom *Pure ALOHA* i *Slotted ALOHA* metoda primenjenih na električnom provodniku (inicijalno na koaksijalnom kablu). Pojam „*Multiple Access”* odnosi se na pristup većeg broja učesnika uz mogućnost nastanka kolizije, što smo imali i kod ALOHAnet mreže, ali se uvode i dva nova koncepta: „*Carrier Sense”* i „*Collision Detection”*. Prenosni medijum („*Carrier”*) se najpre osluškuje da li ga neko trenutno koristi („*Sense”*), tako da se paketi mogu poslati jedino ako je medijum slobodan. Drugi koncept se odnosi na eksplicitni način detekcije kolizije (eng. *Collision Detection*), koji se umesto obavezne potvrde prijema za svaki uspešno preneti paket sada bazira na aktivnom praćenju saobraćaja na medijumu (Slika 2.5).



Slika 2.5. CSMA/CD kontrola pristupa medijumu

Slično principu *Pure ALOHA*, i kod CSMA/CD metode paketi se mogu poslati u bilo kom trenutku, bez vremenske sinhronizacije, ali samo ako je medijum slobodan. Ako je medijum zauzet od strane drugog učesnika koji šalje podatke, posmatrani uređaji će najpre da sačeka da se medijum oslobodi pre nego što pošalje svoj paket. Ali čak i kada je medijum slobodan u nekom trenutku, zbog međusobne udaljenosti računara u mreži i ograničene brzine propagacije signala, dva ili više uređaja mogu gotovo istovremeno da pošalju svoje pakete, što će dovesti do kolizije. Ovaj slučaj ilustruje Slika 2.6, gde su računari prostorno raspoređeni po X osi, dok je vreme prikazano po Y osi. U trenutku t_1 računar B konstatuje da je medijum slobodan i šalje svoj paket, koji nastavlja da propagira po mreži. Neposredno nakon toga, u trenutku t_2, ovaj paket još nije stigao do računara D, koji konstatuje da je medijum i dalje slobodan, pa stoga i on šalje svoj paket. Čak iako računari B i D završe slanje paketa, oni će po koaksijalnom kablu i dalje da propagiraju i u nekom delu mreže će ubrzo da se sretnu i izazovu koliziju (trenutak t_3). Neki uređaji će da prime ispravne pakete, poput računara A koji prima ispravan paket od računara B, i računar E koji prima ispravan paket od računara D. Ipak, nakon nastanka kolizije, oba paketa su uništena, a rezultujući signal će da nastavi da propagira kroz mrežu. Primetimo da i ovaj interferirani signal ima određeni oblik i intenzitet, koji se takođe može interpretirati kao niz nula i jedinica, ali su ovi podaci ipak nevalidni.