
Uvod u računalne mreže i Internet

Poglavlje 1 — Skripta kolegija *Računalne mreže*

doc. dr. sc. Sandi Baressi Šegota

Fakultet informatike Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli

Poglavlje 1

Uvod u računalne mreže i Internet

Računalne su mreže danas nevidljiva, ali sveprisutna infrastruktura na kojoj počiva gotovo svaka moderna programska usluga — od pregledavanja weba i razmjene poruka do striminga, igara i računarstva u oblaku. Za informatičara mreža nije samo skup kabela i uređaja, nego *platforma za izgradnju distribuiranih aplikacija*: sustav dogovorenih pravila (protokola) koji omogućuju da programi na različitim, međusobno udaljenim računalima pouzdano surađuju. Cilj je ovog poglavlja izgraditi zajednički pojmovni okvir — što je Internet, kako je organiziran, čime je ograničena njegova izvedba i zašto je strukturiran u slojeve — koji će biti temelj za sva sljedeća predavanja.

1.1 Što je Internet?

Ne postoji jedna „prava“ definicija Interneta, no korisno ga je promatrati s dva komplementarna gledišta. S *tehničkoga* gledišta („odozdo prema gore“) Internet je golem sustav sastavljen od nekoliko vrsta gradivnih elemenata:

- **Krajnji uređaji (hostovi)** — milijarde računala, poslužitelja, mobilnih i ugradbenih uređaja koji izvode mrežne aplikacije.
- **Komunikacijski linkovi** — bakrena parica, koaksijalni kabel, optičko vlakno i radijske veze, vrlo različitih brzina prijenosa.
- **Paketni preklopnici** — prije svega *ruteri* u jezgri i *preklopnici* u lokalnim mrežama, koji proslijeđuju pakete prema odredištu.
- **Protokoli** — pravila poput TCP, IP i HTTP koja upravljaju slanjem i primanjem poruka.

S *uslužnoga* gledišta („odozgo prema dolje“) Internet je infrastruktura koja aplikacijama pruža usluge komunikacije i nudi im programsko sučelje (*sockete*) preko kojega mogu slati i primiti podatke, ne mareći za tehničke detalje prijenosa.

Radna definicija

Internet je *mreža mreža* — planetarni sustav međusobno povezanih, neovisno upravljanih mreža (ISP-ova) koji, poštujući zajedničke protokole, omogućuje razmjenu podataka između bilo koja dva krajnja uređaja.

Riječ „protokol“ zaslužuje posebnu pažnju. **Protokol** definira *format* razmijenjenih poruka, *redoslijed* kojim se šalju i primaju, te *akcije* koje strane poduzimaju pri slanju ili primanju poruke. Kao i u ljudskoj komunikaciji, gdje pozdrav očekuje uzvraćeni pozdrav, kriva poruka u krivom trenutku znači da komunikacija ne uspijeva. Cijeli je Internet upravo skup takvih dogovorenih protokola.

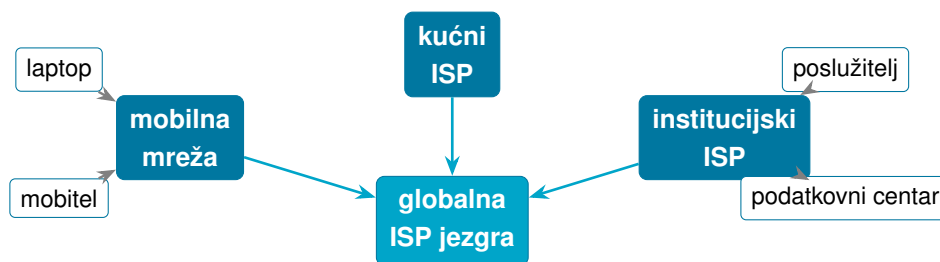


Figure 1.1: Internet kao mreža mreža. Krajnji uređaji spajaju se preko pristupnih ISP-ova, koji su međusobno povezani kroz regionalne i globalne (tier-1) operatore.

1.2 Rub, pristup i jezgra mreže

Mrežu je korisno podijeliti na tri dijela. **Rub mreže** čine krajnji uređaji — klijenti koji traže usluge i poslužitelji koji ih pružaju (danas najčešće smješteni u velikim podatkovnim centrima). **Pristupna mreža** povezuje rub s prvim ruterom mrežnog operatera. **Jezgra** je isprepletana mreža rutera koja prenosi podatke od izvora do odredišta.

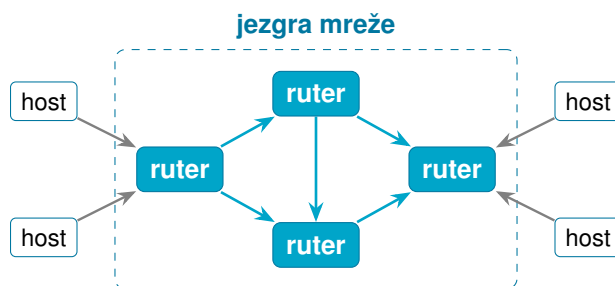


Figure 1.2: Rub i jezgra. Hostovi na rubu spajaju se pristupnim vezama na jezgru — isprepletenu mrežu rutera.

Pristupne se tehnologije razlikuju po brzini te po tome je li medij *posvećen* jednom korisniku ili *dijeljen* s drugima. U kućnom okruženju najčešći su DSL (preko telefonske parice), *kabelski* pristup (koaksijalni kabel, dijeljen sa susjedstvom) i FTTH (optičko vlakno do doma). Institucije se najčešće spajaju *Ethernetom* i *WiFi*-jem, a mobilni pristup ostvaruju 4G i 5G ćelijske mreže. Optičko vlakno, zbog velike propusnosti i malih gubitaka, okosnica je jezgre.

1.2.1 Struktura Interneta kao mreže mreža

Nijedan ISP ne poseže sam do svakog krajnjeg uređaja na svijetu; Internet zato ima *hijerarhijsku* strukturu. Krajnji se korisnici spajaju na **pristupne ISP-ove**, koji se dalje povezuju na **regionalne** operatore, a oni na globalne **tier-1** operatore koji čine jezgru. Da bi promet tekao izravnije i jeftinije, operateri se povezuju na dva načina: **tranzitom** (manji ISP plaća većemu za doseganje ostatka Interneta) i **peeringom** (dva ISP-a izravno razmjenjuju promet, često bez naknade). Fizičko mjesto gdje se mnogi operateri međusobno spajaju naziva se **internetska sabirnica** (*Internet Exchange Point*, IXP). Velike sadržajne tvrtke grade i vlastite **mreže za isporuku sadržaja** (CDN) s poslužiteljima blizu korisnika. Zbog svega toga put paketa ne određuje samo tehnika, nego i *poslovni odnosi* među mrežama — što ćemo detaljno vidjeti kod protokola BGP.

1.3 Jezgra mreže: komutacija paketa i kanala

Ključno je pitanje kako se podaci zapravo prenose kroz jezgru. Postoje dva temeljna pristupa.

Kod **komutacije paketa** (engl. *packet switching*) poruka aplikacije dijeli se na manje *pakete*. Svaki paket putuje neovisno, a ruteri primjenjuju načelo „*spremi-i-proslijedi*” (*store-and-forward*): ruter mora primiti cijeli paket prije nego što ga počne slati dalje. Zbog toga svaki link unosi *transmisijsko kašnjenje* jednako L/R , gdje je L veličina paketa u bitovima, a R brzina linka. Ako paketi na neki izlazni link stižu brže nego što ih on može otpremiti, oni čekaju u *redu* (*buffer*). Kako je red konačan, pri preopterećenju dolazi do *gubitka paketa*.

Kod **komutacije kanala** (engl. *circuit switching*) resursi duž cijeloga puta *rezerviraju* se za jednu vezu prije prijenosa, kao u klasičnoj telefoniji. Kapacitet se dijeli *frekvencijski* (FDM) ili *vremenski* (TDM).



spremi-i-proslijedi: $d_{trans} = L/R$ po linku

Figure 1.3: Komutacija paketa. Poruka se dijeli na pakete koje ruter u cijelosti prima pa tek onda prosljeđuje.

Zašto Internet koristi pakete?

Mrežni je promet *rafalan* — korisnici rijetko šalju podatke istovremeno i neprekidno. **Statističko multipleksiranje** dodjeljuje resurse *na zahtjev*, pa isti link može opslužiti mnogo više korisnika nego kad bismo im kapacitet trajno rezervirali. Zato je Internet, za razliku od klasične telefonske mreže, građen na komutaciji paketa.

1.4 Kašnjenje, gubitak i propusnost

Izvedbu mreže opisujemo trima veličinama: kašnjenjem, gubitkom i propusnošću. Ukupno kašnjenje koje paket doživi u jednom čvoru (ruteru) zbroj je četiriju komponenti:

$$d_{nodal} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}, \quad (1.1)$$

gdje je d_{proc} *obradbeno kašnjenje* (provjera zaglavlja i odabir izlaza), d_{queue} *kašnjenje u redu* čekanja, d_{trans} *transmisijsko* i d_{prop} *propagacijsko kašnjenje*. Posljednja dva često se brkaju, no bitno se razlikuju:

$$d_{trans} = \frac{L}{R}, \quad d_{prop} = \frac{d}{s}, \quad (1.2)$$

pri čemu je L veličina paketa, R brzina linka, d duljina veze, a s brzina širenja signala u mediju. Transmisijsko kašnjenje ovisi o *veličini paketa i brzini linka*, a propagacijsko o *udaljenosti* — deblji (brži) kabel ne skraćuje put signala kroz prostor.

Kašnjenje u redu čekanja ovisi o *intenzitetu prometa* La/R , gdje je a prosječna stopa dolaska paketa. Kada $La/R \rightarrow 1$, prosječno kašnjenje naglo raste prema beskonačnosti; ako $La/R > 1$, dolazi više prometa nego što link može otpremiti, pa se redovi prelijevaju i nastaje gubitak.

Konačno, **propusnost** (engl. *throughput*) je brzina, u bitovima u sekundi, kojom podaci stvarno stižu primatelju. Na putu s više linkova ograničava ju *najsporija karika* — *usko grlo*:

$$\text{propusnost} = \min(R_1, R_2, \dots, R_n). \quad (1.3)$$

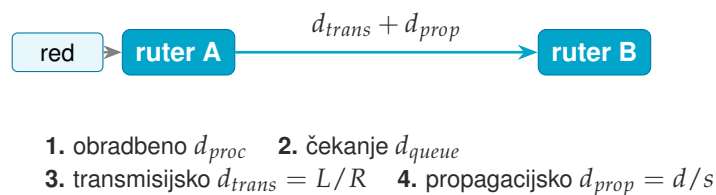


Figure 1.4: Četiri izvora kašnjenja u čvoru.

S kašnjenjem je usko povezano **vrijeme povratnog puta** (*round-trip time*, RTT) — vrijeme koje treba da paket stigne do odredišta i da se potvrda vrati. Ono je donjom granicom ograničeno brzinom svjetlosti i presudno utječe na „osjećaj brzine” (uspostava veze, web, mrežne igre); važno je uočiti da *veća propusnost ne smanjuje RTT* — to su različite veličine. Praktičan alat za mjerenje puta i kašnjenja je **traceroute**, koji slanjem paketa s rastućim brojačem skokova otkriva rutere na putu i RTT do svakoga od njih.

Riješeni primjeri

Kašnjenje. Za $L = 10\,000$ bita i $R = 100$ Mb/s je $d_{trans} = L/R = 0,1$ ms; na putu od tri linka u praznoj mreži paket kasni približno $3 \cdot 0,1 = 0,3$ ms.

Propusnost. Ako je poslužiteljski link $R_s = 100$ Mb/s, a klijentski $R_c = 20$ Mb/s, propusnost je $\min(100, 20) = 20$ Mb/s; datoteku od 100 Mbit preuzet ćemo za $100/20 = 5$ s.

1.5 Slojeviti model i enkapsulacija

Zbog složenosti, mrežni se sustavi organiziraju u *slojeve*. Svaki sloj nudi uslugu sloju iznad sebe, a koristi uslugu sloja ispod, komunicirajući preko jasno definiranih sučelja. Takva **modularnost** omogućuje da se implementacija pojedinog sloja promijeni bez utjecaja na ostale. Internetski model ima pet slojeva:

Aplikacijski sloj.

Protokoli mrežnih aplikacija (HTTP, DNS, SMTP); jedinica podatka je *poruka*.

Transportni sloj.

Prijenos između procesa uz pouzdanost (TCP) ili brzinu (UDP); jedinica je *segment*.

Mrežni sloj.

Usmjeravanje datagrama kroz mnoge mreže (IP); jedinica je *datagram*.

Podatkovni sloj.

Prijenos između susjednih čvorova (*Ethernet*, *WiFi*); jedinica je *okvir*.

Fizički sloj.

Pretvorba bitova u signale na mediju.

Podaci putuju stogom prema dolje kod pošiljatelja i prema gore kod primatelja. Pri silasku svaki sloj dodaje vlastito *zaglavlje* — taj se postupak naziva **enkapsulacija**; kod primatelja se zaglavlja skidaju obrnutim redom (dekapsulacija).

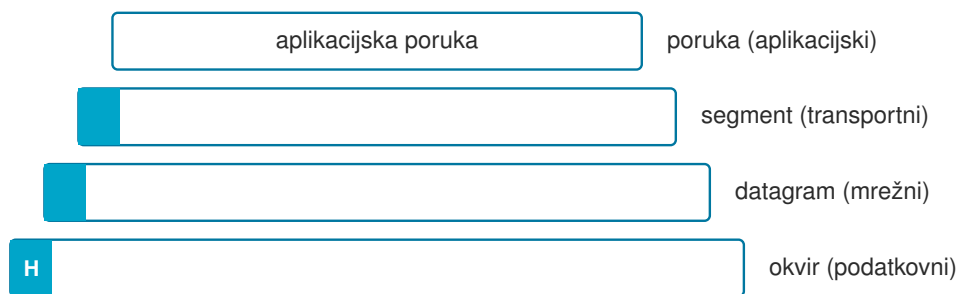


Figure 1.5: Enkapsulacija. Svaki niži sloj omata podatak dodajući vlastito zaglavlje (H).

1.6 Sigurnost: uvod

Internet je izvorno projektiran za malu, povjerljivu skupinu istraživača, pa sigurnost nije bila ugrađena u temelje. Ista otvorenost koja ga je učinila uspješnim ujedno otvara i napadačke površine. Među osnovnim prijetnjama su **zloćudni kod** (crvi, virusi, trojanci), **uskraćivanje usluge** (DoS/DDoS) preplavljanjem resursa, **prisluškivanje** (*sniffing*) paketa na dijeljenom mediju te **lažiranje** (*spoofing*) izvorišne adrese. Obrana se ne postiže jednom značajkom, nego se *dograđuje na svim slojevima* — enkripcijom, autentikacijom, vatrozidima i sustavima za detekciju upada, o čemu će detaljno biti riječi u posebnom predavanju.

Sažetak poglavlja

Internet je mreža mreža organizirana u rub, pristupne mreže i jezgru. Jezgra prenosi podatke *komutacijom paketa* uz statističko multipleksiranje. Izvedbu mjerimo kašnjenjem (četiri komponente), gubitkom (prepunjeni redovi) i propusnošću (određuje ju usko grlo). Sustav je strukturiran u pet slojeva povezanih *enkapsulacijom*, a sigurnost je svojstvo cijeloga sustava koje se gradi na više razina.