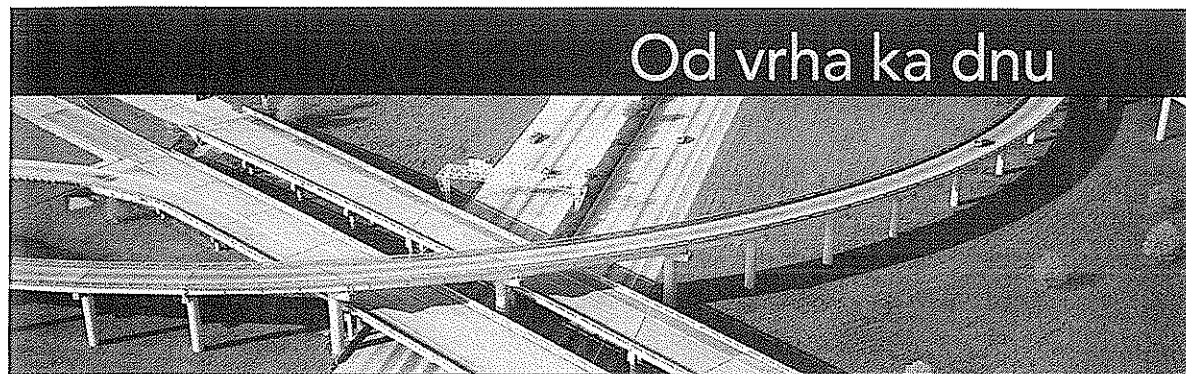


08227 38,50

UMREŽAVANJE RAČUNARA

PREVOD
ŠESTOG IZDANJA

Od vrha ka dnu

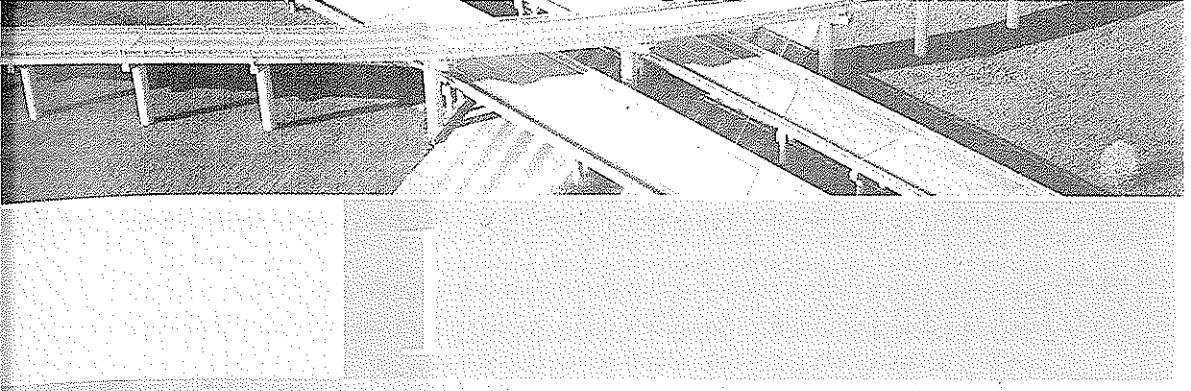


JAMES F. KUROSE

Univerzitet Masačusets, Amherst

KEITH W. ROSS

Politehnički institut u Njujorku



Računarske mreže i internet

Današnji internet je, sa milionima povezanih računara, komunikacionih linkova i komutatora; miliardama korisnika koji se povezuju putem prenosivih računara, tableta i pametnih telefona; i nizom novih povezanih uređaja: senzora, veb kamera, igrackih konzola, okvira za slike, pa čak i veš mašina, najveći je inženjerski sistem koji je čovečanstvo ikada kreiralo. S obzirom da je internet toliko veliki i da sadrži i koristi mnoštvo različitih komponenti, ima li nade da shvatimo način njegovog funkcionisanja? Postoje li vodeći principi i strukture koji pružaju osnovu za razumevanje tako čudesno velikog i složenog sistema? I ako postoje, da li je moguće da učenje o umrežavanju računara bude i interesantno i zabavno? Srećom, odgovor na sva ova pitanja su DA! U stvari, naš cilj u ovoj knjizi je da vam pružimo moderan uvod u dinamičko polje umrežavanja računara, dajući vam principe i praktična znanja koja će vam biti potrebna za razumevanje ne samo današnje, već i mreža koje će se tek pojaviti.

Pvo poglavlje predstavlja samo širi pregled umrežavanja računara i interneta. Naš cilj je da damo najopštiji prikaz i da uspostavimo okvir za ostatak knjige, kako bismo sagledali celu sliku. U ovom uvodnom poglavlju obradićemo i razmotriti osnovu i mnogo toga što se tiče računarskih mreža, pri čemu opšta slika neće biti zanemarena.

Evo kako će izgledati prikaz računarskih mreža u ovom poglavlju. Pošto predstavimo neke osnovne termine i pojmove, ispitacemo osnovne hardverske i softverske komponente koje čine računarsku mrežu. Počećemo od oboda računarske mreže i razmotriti krajnje sisteme i mrežne aplikacije koje se izvršavaju u mreži. Posle toga, prelazimo na jezgro računarskih mreža, istražujemo linkove i komutatore za prenos podataka, kao i pristupane mreže i fizičke medijume koji krajnje sisteme povezuju sa jezgrom mreže. Saznaćete da je internet mreža svih mreža, a naučićete i na koji način su te mreže međusobno povezane.

Kada završimo sa tim uvodom o obodu i jezgru računarskih mreža, u drugom delu ovog poglavlja prelazimo na šire i mnogo apstraktnije sagledavanje računarskih mreža. Ispitacemo kašnjenje i gubitak podataka u računarskim mrežama, kao i propusnu moć računarskih mreža i ponuditi jednostavne kvantitativne modele za određivanje propusne moći i kašnjenja od jednog do drugog kraja mreže, modele koji uzimaju u obzir kašnjenja nastala u prenosu, prostiranju i zbog čekanja. Zatim ćemo predstaviti i neke ključne principe u arhitekturi umrežavanja računara, tačnije, slojevitost protokola i modele usluga. Takođe ćemo naučiti da su mreže podložne raznim vrstama napada; razmotrićemo neke od tih napada i način na koji računarske mreže mogu postati mnogo bezbednije. Konačno, ovo poglavlje završavamo kratkom istorijom računarskih mreža.

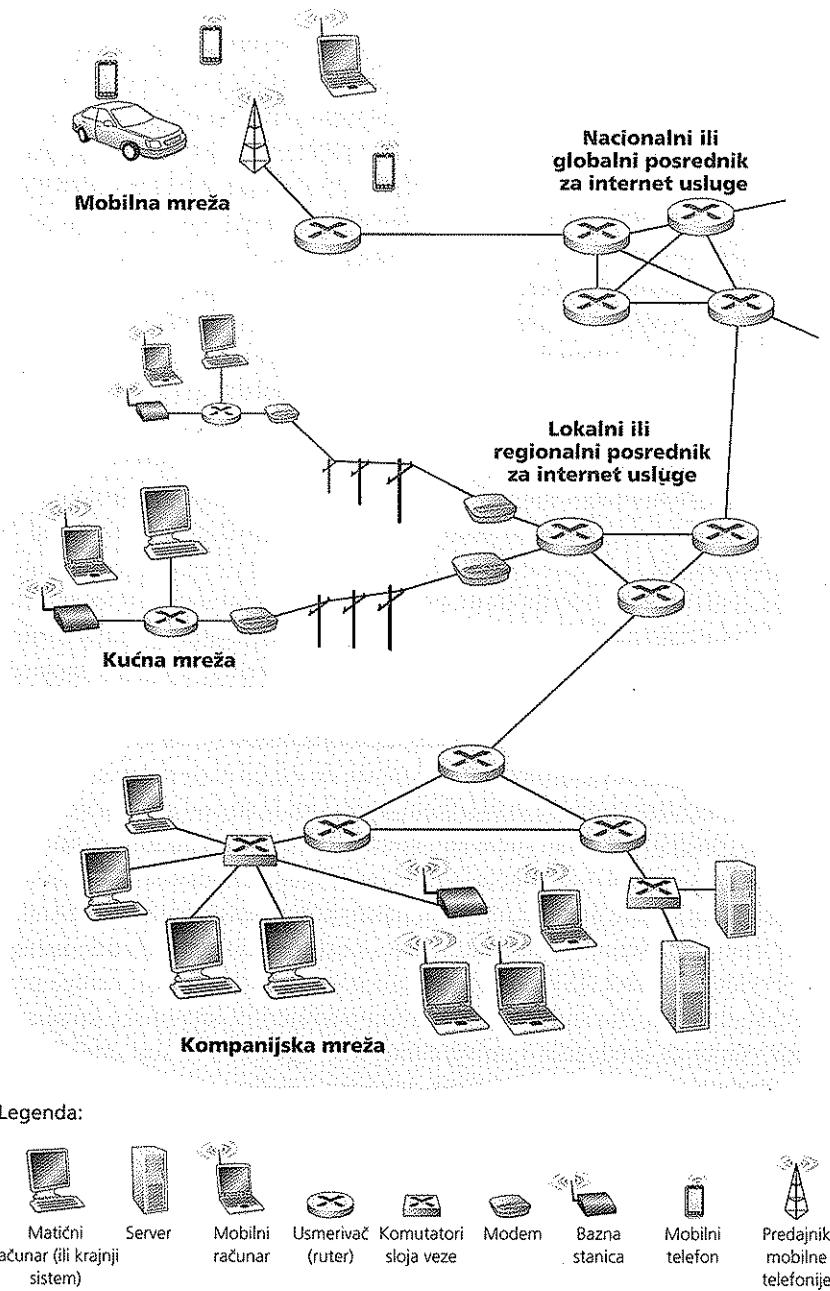
1.1 Šta je internet?

Svima dostupni internet, svojevrsnu računarsku mrežu, u ovoj knjizi koristimo kao osnovno sredstvo za razmatranje računarskih mreža i njihovih protokola. Ali šta je internet? Na ovo pitanje se može odgovoriti na nekoliko načina. Prvo, možemo dati praktičan opis interneta, koji je sačinjen od osnovnih komponenti hardvera i softvera. Drugo, možemo internet prikazati kao infrastrukturu za umrežavanje koja pruža usluge za distribuirane aplikacije. Počnimo sa praktičnim opisom, koristeći sliku 1.1 za ilustraciju naše diskusije.

1.1.1 Praktičan opis

Internet je računarska mreža koja međusobno povezuje milione računarskih uređaja širom sveta. Do nedavno su većinu ovih uređaja činili tradicionalni stoni PC računari, Linux radne stанице i tzv. serveri koji čuvaju i prenose informacije, kao što su veb stranice i elektronska pošta. Međutim, sve više neobičajenih krajnjih uređaja, kao što su: prenosivi računari, mobilni telefoni, tableti, televizori, igračke konzole, veb kamere, automobili, senzori za praćenje stanja životne sredine, okviri za slike, kućni elektronski i bezbednosni uređaji, povezuje se sa internetom. Štaviše, izraz računarska mreža počinje da zvuči pomalo zastarelo, imajući u vidu sve veći broj neuobičajenih uređaja koji se povezuju sa internetom. U žargonu računarskih mreža, svi ovi uređaji nazivaju se matični računari (eng. host) ili **krajnji sistemi**. U

julu 2011. godine skoro 850 miliona krajnjih sistema bilo je povezano na internet [ISC 2012], ne računajući mobilne telefone, prenosive računare i ostale uređaje, koji se povremeno povezuju na internet. Uopšte, procenjeno je da ima oko 2 milijarde internet korisnika [ITU 2011].



Slika 1.1 ◆ Neke komponente koje sačinjavaju internet

Krajnji sistemi su međusobno povezani u mrežu komunikacionim linkovima i komutatorima paketa. U odeljku 1.2 videćete da postoje različiti tipovi komunikacionih linkova, koji se prave korišćenjem različitih fizičkih medijuma, kao što su aksijalni kablovi, bakarni provodnici, optički kablovi i radio talasi. Različiti linkovi prenose podatke različitim brzinama, pri čemu se brzina prenosa linka meri brojem bitova u sekundi. Kada jedan krajnji sistem šalje podatke drugom krajnjem sistemu, polazni krajnji sistem deli te podatke na manje delove i svim tim delovima dodaje određeni blok bajtova zaglavlja. Dobijeni delovi informacija, u žargonu računarskih mreža poznati kao paketi se kroz mrežu šalju do odredišnog krajnjeg sistema, gde se ponovo slažu u prvobitne podatke.

Komutator paketa preuzima paket koji stiže nekim od dolaznih komunikacionih linkova i prosleđuje ga dalje nekima od svojih odlaznih komunikacionih linkova. Postoji više različitih oblika i modela komutatora paketa, ali dva najrasprostranjenija u savremenom internetu su **usmerivači** (ruteri) i **komutatori sloja veze** (svičevi). Zajedničko za obe ove vrste komutatora je to da pakete prosleđuju do njihovih konačnih odredišta. Komutatori sloja veze se tipično koriste u pristupnim mrežama, dok se usmerivači obično koriste u jezgru mreže. Od polaznog krajnjeg sistema do odredišnog krajnjeg sistema, postoji čitav niz komunikacionih linkova i komutatora paketa kojima prolaze paketi. Ovaj prenos je poznat kao **ruta** ili **putanja** kroz mrežu. Tačan obim saobraćaja na internetu teško je proceniti, ali Cisko [Cisko VNI 2011] procenjuje da će globalni internet saobraćaj u 2012. godini biti blizu 40 egzbabajtova po mesecu.

Mreže sa komutiranjem paketa (koje prenose pakete) po mnogo čemu su slične saobraćajnim mrežama autoputeva, drumova i raskrsnica (kojima putuju vozila). Uzmimo, na primer, fabriku koja bi trebalo da isporuči veliku količinu tereta do nekog odredišnog skladišta koje se nalazi hiljadama kilometara daleko. U fabrici se teret razdvaja na manje delove i utovara na više kamiona. Svaki od tih kamiona zatim putuje kroz mrežu autoputeva, drumova i raskrsnicu do odredišnog skladišta. U tom skladištu, teret se istovara i grupiše sa ostatkom tereta koji je stigao istom isporukom. Stoga, na mnogo načina, paketi su slični kamionima, komunikacioni linkovi autoputevima i drumovima, komutatori paketa liče na raskrsnice, a krajnji sistemi zgradama. Kao što kamioni putuju putnom mrežom, paketi putuju računarskom mrežom.

Krajnji sistemi pristupaju internetu preko **posrednika za internet usluge** (**Internet Service Provider, ISP**). To mogu biti posrednici koji svoje usluge pružaju domaćinstvima, kao što su lokalni kablovski operateri ili telefonske kompanije, zatim posrednici za preduzeća i univerzitete, kao i posrednici koji obezbeđuju bežični pristup na aerodromima, u hotelima, kafeima i na drugim javnim mestima. Svaki posrednik za internet usluge, u stvari, predstavlja mrežu komutatora paketa i komunikacionih linkova. Posrednici za internet usluge krajnjim sistemima nude različite načine za pristupanje mreži, kao što su širokopojasni pristup za domaćinstva kablovskim ili DSL modemima, pristup velike brzine preko lokalne računarske mreže, bežični pristup i modemski pristup brzine 56 Kb/s. Posrednici za internet usluge obezbeđuju pristup internetu i davaocima sadržaja, povezujući veb sajtove direktno

na internet. Suština interneta je međusobno povezivanje krajnjih sistema, tako da i posrednici za internet usluge, koji povezuju krajnje sisteme, moraju da budu međusobno povezani. Ovi posrednici nižeg reda su međusobno povezani preko nacionalnih i internacionalnih posrednika višeg reda, kao što su Level 3 Communications, AT&T, Sprint i NTT. Posrednike višeg reda sačinjava veći broj rutera velike brzine međusobno povezanih veoma brzim linkovima za koje se koriste optički kablovi. Svakom ISP mrežom, bez obzira na to da li je višeg ili nižeg reda, upravlja se nezavisno. U svakoj se koristi IP protokol (videti u produžetku), i poštuju se izvesna pravila za raspodelu naziva i adresa. Posrednike za internet usluge i njihove međusobne veze podrobnije obradujemo u odeljku 1.3.

Krajnji sistemi, komutatori paketa i ostale komponente interneta, koriste **protokole** koji kontrolišu slanje i prijem informacija preko interneta. Protokol za kontrolu prenosa **TCP (Transmission Control Protocol)** i internet protokol **IP (Internet Protocol)** predstavljaju dva najvažnija internet protokola. Protokol IP utvrđuje format paketa, koje ruteri i krajnji sistemi šalju i primaju između sebe. Glavni internet protokoli zbirno, poznati su pod nazivom **TCP/IP**. Već u ovom uvodnom poglavlju pozabavićemo se ovim protokolima. Ali, to je samo početak – u većem delu ove knjige bavimoće se protokolima računarskih mreža!

Imajući u vidu značaj protokola na internetu, veoma je važno da postoji opšta saglasnost o tome što svaki od tih protokola tačno radi, kako bi mogli da se prave sistemi i proizvodi različitih proizvođača koji međusobno funkcionišu. Za to su zaduženi standardi. Za **internet standarde** zadužena je Tehnička radna grupa za internet (Internet Engineering Task Force, IETF) [IETF 2012]. IETF standardi nazuju se **RFC dokumenti** (Request For Comments – zahtevi za komentarima). RFC dokumenti nastali su kao opšti zahtevi za komentarima (otuda i njihov naziv) kako bi se rešili problemi pri projektovanju mreža i protokola sa kojima su se suočavali projektanti mreža, koje su prethodile internetu [Allman 2011]. RFC dokumenti puni su tehničkih izraza i veoma su detaljni. Njima su definisani protokoli kao što su: TCP, IP, HTTP (za veb) i SMTP (za elektronsku poštu). Trenutno postoji više od 6000 RFC dokumenata. Postoje još neka tela koja se bave standardizacijom mrežnih komponenti, posebno kada su u pitanju mrežni linkovi. Primera radi, grupa IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee [IEEE 802 2012] bavi se standardizacijom Ethernet i bežičnih Wi-Fi mreža.

1.1.2 Opis usluga

U prethodnom odeljku upoznali smo mnoge komponente koje sačinjavaju internet. Internet možemo da opišemo i iz sasvim drugačijeg ugla – tačnije, kao *infrastrukturu koja određenim aplikacijama obezbeđuje određene usluge*. U te aplikacije ubrajamo: elektronsku poštu, pretraživanje veba, društvene mreže, trenutnu razmenu poruka, telefoniranje preko interneta (VoIP), protok video zapisu, distribuirane igrice, deljenje fajlova između ravnopravnih računara (peer-to-peer, P2P), televizija preko interneta, udaljeni pristup i još mnogo, mnogo toga. Za ove aplikacije se kaže

da su **distribuirane aplikacije**, pošto se za njih koristi više krajnjih sistema koji međusobno razmenjuju podatke. Ono što je važno jeste da se internet aplikacije izvršavaju na krajnjim sistemima, a ne u komutatorima paketa u jezgru mreže. Iako komutatori paketa omogućavaju razmenu podataka između krajnjih sistema i oni ne vode računa o aplikacijama iz kojih ti podaci potiču, ili koje koriste te podatke.

Objasnićemo podrobije šta podrazumevamo pod infrastrukturom koja određenim aplikacijama obezbeđuje određene usluge. Prepostavimo da imate novu sjajnu ideju za distribuiranu internet aplikaciju od koje bi korist imalo čitavo čovečanstvo, ili biste bar vi postali bogati i čuveni. Na koji biste način tu svoju ideju pretvorili u stvarnu internet aplikaciju? Pošto se aplikacije izvršavaju na krajnjim sistemima, biće potrebno da napišete delove programa koji bi se izvršavao na krajnjim sistemima. Mogli biste, na primer, da te delove programa napišete, koristeći programske jezike Java, C ili Python. I sad, pošto razvijate distribuiranu internet aplikaciju, neophodno je da ti delovi programa koji se izvršavaju na različitim krajnjim sistemima međusobno razmenjuju podatke. I tu stižemo do najvažnijeg pitanja – onog koje vodi do drugačijeg načina za opisivanje interneta kao platforme za aplikacije. Na koji način da se program koji se izvršava na jednom krajnjem sistemu uputi internet da isporuči podatke drugom programu koji se izvršava na drugom krajnjem sistemu?

Krajnji sistemi povezani sa internetom obezbeđuju **programski interfejs aplikacije (Application Programming Interface, API)** kojima se utvrđuje način na koji program koji se izvršava na jednom krajnjem sistemu traži od infrastrukture interneta da isporuči podatke do tačno određenog odredišnog dela softvera koji se izvršava na drugom krajnjem sistemu. Internet API je skup pravila koji polazni program mora da poštuje, tako da internet određene podatke isporuči odredišnom programu. Internet API podrobije razmatramo u poglavljiju 2. Za sada ćemo se poslužiti jednostavnim poređenjem kakva inače često koristimo u ovoj knjizi. Prepostavimo da Alisa želi da pošalje pismo Bobu, koristeći običnu poštu. Naravno da Alisa ne može jednostavno da napiše pismo (podaci) i da ga baci kroz prozor. U stvari, pošta traži da Alisa stavi pismo u kovertu, napiše Bobovo puno ime, adresu i i poštanski broj na sredini koverte, zatvori kovertu, zalepi markicu u gornji desni ugao koverte i da, kada sve to završi, koverat ubaci u poštansko sanduče. Drugim rečima, pošta ima sopstveni „poštanski API“, ili skup pravila, koja Alisa mora da poštije kako bi pošta njeno pismo isporučila Bobu. Slično tome, internet ima API koji polazni program mora da sledi, kako bi internet isporučio podatke programu koji prima podatke.

Pošta, naravno, svojim korisnicima nudi više različitih usluga, a među njima su ekspresna isporuka, potvrda o prijemu, obična usluga i još mnogo drugih usluga. Slično tome, internet svojim aplikacijama nudi više različitih usluga. Kada razvijate internet aplikaciju morate da izaberete jednu od tih internet usluga za nju. Internet usluge opisuјemo u poglavljiju 2.

Upravo smo dali dva opisa interneta, jedan sa stanovišta njegovih hardverskih i softverskih sastavnih delova, drugi u smislu infrastrukture kojom se distribuiranim aplikacijama obezbeđuju određene usluge. Ipak, verovatno ste i dalje zbuljeni time što je internet u stvari. Šta je to komutiranje paketa i TCP/IP? Šta su ruteri? Koje se

sve vrste komunikacionih linkova koriste unutar interneta? Šta je distribuirana aplikacija? Kako i zbog čega bi se toster ili meteorološki senzor povezivali sa internetom? Ukoliko ste još uvek pomalo zbuljeni svim tim pitanjima, ne brinite se – svrha ove knjige i jeste da predstavi sastavne delove interneta i principe koji upravljaju time kako i zašto sve to radi. U odeljcima i poglavljima koja slede objasnićemo sve ove važne pojmove i dati odgovore na ta pitanja.

1.1.3 Šta je protokol?

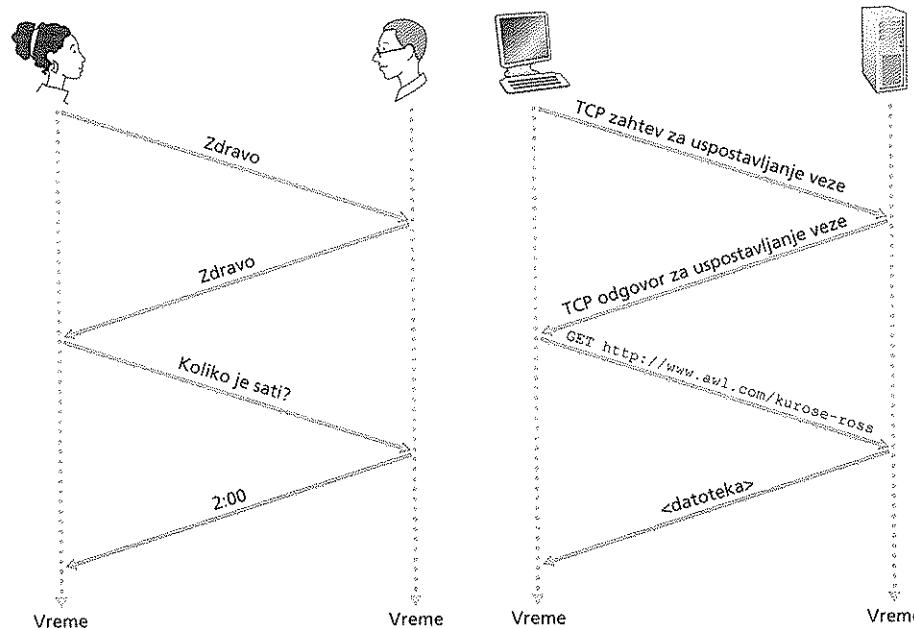
Pošto sada imamo osnovnu predstavu o tome što je internet, razmotrićemo još jedan veoma važan termin koji se stalno pominje u umrežavanju računara: *protokol*. Šta je protokol? Šta protokol radi?

Poređenje sa ljudima

Verovatno najjednostavniji način za objašnjenje pojma protokola računarskih mreža je poređenje sa ljudima pošto se mi, ljudi, stalno držimo nekakvih protokola, odnosno pravila ponašanja. Uzmite recimo slučaj kada bi nekoga trebalo da pitate koliko je sati. Uobičajeni razgovor prikazan je na slici 1.2. Pravila ponašanja među ljudima (ili makar, dobro vaspitanje) nalaže da sve počinje pozdravom (prvo: „Zdravo“ na slici 1.2). Uobičajen odgovor bi takođe glasio: „Zdravo“. Jasno je da srdačan odgovor: „Zdravo“ prvoj osobi znači da se razgovor može nastaviti i da se može pitati koliko je sati. Drugačiji odgovor na početno „Zdravo“ (recimo, „Ostavi me na miru!“ ili „Ne razumem!“, ili neki odgovor koji nije kulturni) ukazivao bi na to da druga osoba ne želi, ili ne može da nastavi razgovor. U tom slučaju, prema pravilima ponašanja među ljudima, prva osoba ne bi ni upitala: „Koliko je sati?“ Dešava se da prva osoba ne dobije odgovor na svoj pozdrav i u tom slučaju ona odustaje od toga da pita koliko je sati. Uočavate da u pravilima ponašanja među ljudima važi to da *postoje određene poruke koje šaljemo kao i određeni postupci koje preduzimamo u zavisnosti od dobijenog odgovora i drugih okolnosti* (recimo da ne dobijemo odgovor u toku nekog određenog vremena). Jasno je da poslate i primljene poruke, kao i postupci koje preduzimamo prilikom slanja i primanja tih poruka, ili dok čekamo na odgovor, imaju ključnu ulogu u pravilima ponašanja među ljudima, to jest ljudskom protokolu. Ukoliko bi se ljudi ponašali drugačije, to jest koristili drugačije protokole (na primer, jedna je osoba dobro vaspitana, ali druga nije, ili jedna razume pojmom vremena, a druga ne) razgovor između njih ne bi bio moguć i ne bi se postiglo ništa korisno. Isto važi i za umrežavanje – neophodno je da dva (ili više) uredaja koji međusobno komuniciraju koriste isti protokol, kako bi ispunili neki zadatak.

Razmotrimo sada još jednu sličnost sa ljudima. Prepostavimo da ste na predavanjima (na predavanju iz računarskih mreža, recimo). Predavač nejasno priča o protokolima i zbuljeni ste. Predavač zastaje i pita: „Ima li nekih pitanja?“ (poruka je poslata i primili su je svi studenti koji ne spavaju). Dizete ruku (šaljući nedvosmislenu poruku predavaču). Predavač razume što želite i nasmeši se, izgovarajući: „Izvolite...“ (šalje poruku koja vas ohrabruje da postavite pitanje – predavači vole da

im se postavljaju pitanja), vi postavljate pitanje (to jest, šaljete svoju poruku predavaču). Predavač sluša vaše pitanje (prima poruku sa vašim pitanjem) i odgovara na njega (šalje poruku sa odgovorom). I iz ovog primera vidite da su prenošenje i primanje poruka, kao i niz uobičajenih postupaka koji se preduzimaju prilikom slanja i prijema tih poruka predstavljaju srž protokola za postavljanje pitanja i dobijanje odgovora na njih.



Slika 1.2 ◆ Pravila ponašanja među ljudima, ljudski protokol, i protokol računarske mreže

Mrežni protokoli

Mrežni protokol sličan je pravilu ponašanja među ljudima, ljudskim protokolima, osim što poruke razmenjuju i određene postupke sprovode hardverske i softverske komponente nekog uređaja (računara, mobilnog telefona, tableta, rutera, ili nekog drugog uređaja koji može da se umreži). Sve što se dešava na internetu, a obuhvata komunikaciju dva ili više udaljenih entiteta upravlja neki protokol. Na primer, protokoli koji su hardverski implementirani u mrežnim karticama dva fizički povezana računara upravljaju protokom bitova kroz „žicu“ između ove dve mrežne kartice; protokoli za kontrolu zagruženja saobraćaja u krajnjim sistemima kontrolišu brzinu kojom se paketi prenose između pošiljaoca i primaoca; protokoli u ruterima odre-

đuju putanju kojom paketi putuju od polazišta do odredišta. Protokoli se izvršavaju u svim delovima interneta, pa je upravo zbog toga dobar deo ove knjige posvećen protokolima računarskih mreža.

Kao primer protokola računarskih mreža koji verovatno poznajete, razmotrićemo šta se događa kada pošaljete zahtev veb serveru, odnosno kada u svoj veb čitač upišete URL adresu neke veb strane. Ono što se dešava prikazano je na desnoj polovini slike 1.2. Prvo, vaš računar šalje poruku sa zahtevom za povezivanje odgovarajućem veb serveru i čeka njegov odgovor. U najvećem broju slučajeva, veb server prima ovaj zahtev i odgovara porukom da je povezivanje moguće. Znajući da sada može da zatraži određeni veb dokument, vaš računar porukom GET šalje naziv veb stranice koju želi da preuzme sa veb servera. Na kraju, veb server šalje tu veb stranicu (datoteku) vašem računaru.

Navedeni primjeri ponašanja među ljudima i primer mrežnog protokola ukazuju na to da ključni elementi koji definišu protokole su razmena poruka i postupci koji se preduzimaju prilikom slanja ili prijema tih poruka:

Protokol definiše format poruka i redosled po kome se te poruke razmenjuju između najmanje dve zasebne celine koje međusobno komuniciraju, kao i postupke koji se preduzimaju posle slanja i/ili prijema određenih poruka ili nekog drugog događaja.

Internet, a i sve druge računarske mreže, dosta koriste protokole. Prilikom komunikacije se za ispunjavanje različitih zadataka koriste različiti protokoli. Čitajući ovu knjigu, saznaćete da su neki protokoli veoma jednostavni i lako razumljivi, dok ima i onih koji su složeni i teško razumljivi. Ovladavanje znanjem o umrežavanju računara znači da se razume šta protokoli rade, zašto to rade i kako to rade.

1.2 Obod mreže

U prethodnom odeljku predstavili smo internet i mrežne protokole na uopšteniji način. Sada želimo da malo dublje uronimo u prikaz sastavnih delova računarske mreže (internet posebno). Ovaj odeljak počinjemo od oboda mreže i od onih komponenti koje najbolje poznajemo, a to su računari, mobilni telefoni i drugi uređaji koje svakodnevno koristimo. U narednom odeljku prelazimo sa tog oboda mreže ka njenom središtu i istražujemo komutiranje i rutiranje paketa u računarskim mrežama.

VRTOGLAVO MNOŠTVO KRAJNJIH SISTEMA NA INTERNETU

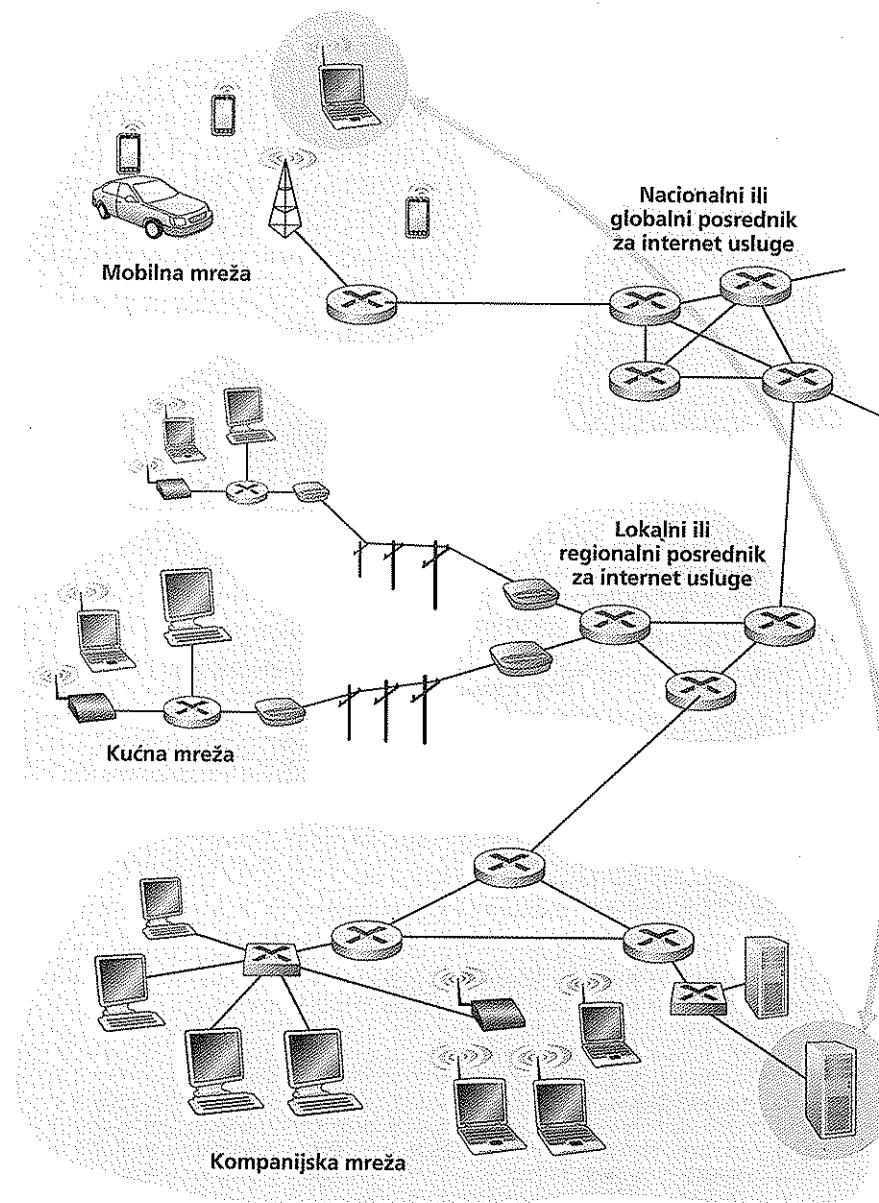
Ne tako dugo, skoro jedini uređaji koji su se kao krajnji sistemi povezivali na internet bili su tradicionalni računari, kao što su stoni računari i moćni serveri. Počevši od kasnih devedesetih godina, pa sve do danas, sve više interesantnih uređaja se povezuje sa internetom, šireći njihovu sposobnost da šalju i primaju digitalne podatke. Zahvaljujući sveprisutnosti interneta, njegovim dobro definisanim (standardizovanim) protokolima i dostupnosti hardvera koji može da se poveže na internet, bilo je prirodno da se internet tehnologija iskoristi za međusobno povezivanje tih uređaja i umrežavanje sa serverima povezanim na internet.

Većina ovih uređaja je za kućnu upotrebu – konzole za video igre (npr. Microsoft Xbox), internet televizija, digitalni okviri za slike koji preuzimaju i prikazuju digitalne fotografije, veš mašine, frižideri, pa čak i toster koji preuzima meteorološke informacije i na vaš jutarnji tost dodaje prognozu vremena za taj dan (npr. prikazujući oblačnost i sunčane periode dana) [BBC 2001]. Mobilni telefoni koji koriste IP protokol i imaju GPS mogućnosti pružaju lokacijske i geografske usluge (mape, informacije o najbližim uslugama ili ljudima) na dohvrat ruke. Umreženi senzori ugrađuju se u predmete koji nas okružuju i omogućavaju da nadziremo zgrade, mostove, seizmičke pojave, navike divljih životinja, korita reka i vreme. Takođe, moguće je ugraditi i umrežiti biomedičke senzore u lične mreže. Sa toliko različitih uređaja koji su međusobno povezani, internet zaista postaje „internet stvari“ (eng. Internet of things) [ITU 2005b].

Sećate se iz prethodnog poglavlja da se za računare i ostale uređaje povezane sa internetom, u žargonu računarskih mreža, koristi izraz krajnji sistemi. Zovemo ih tako pošto se nalaze na obodu (krajnjim tačkama) interneta, kao što je prikazano na slici 1.3. U krajnje sisteme interneta spadaju stoni računari (tj. stoni PC računari, Mac računari i Linux sistemi), serveri (tj. veb serveri i serveri za e-poštu) i prenosivi računari (tj. laptopovi, mobilni telefoni i tableti). Pored njih, sve više drugih uređaja koji se povezuju sa internetom, povezuju se kao krajnji sistemi (videti izdvojeni tekst).

Krajnji sistemi se takođe nazivaju *matični računari* (eng. hosts) pošto predstavljaju maticu za aplikacije (koje se na njima se izvršavaju) kao što su programi za pregledanje sadržaja na internetu, programi za distribuciju sadržaja na internetu (veb serveri), programi za čitanje e-pošte (klijent e-pošte), ili programi za opsluživanje e-pošte (serveri e-pošte). U čitavoj knjizi ravnopravno koristimo izraze matični računar i krajnji sistem; drugim rečima, *matični računar = krajnji sistem*. Matični računari dalje se ponekad dele na dve vrste: *klijenti* i *serveri*. To nije uvek slučaj, ali klijenti su obično stoni ili prenosni računari, mobilni telefoni i tako dalje, dok su serveri mnogo moćniji računari koji se koriste za čuvanje i distribuciju veb stranica, protok video zapisa, prosleđivanje e-pošte i tome slično. Danas se većina servera iz

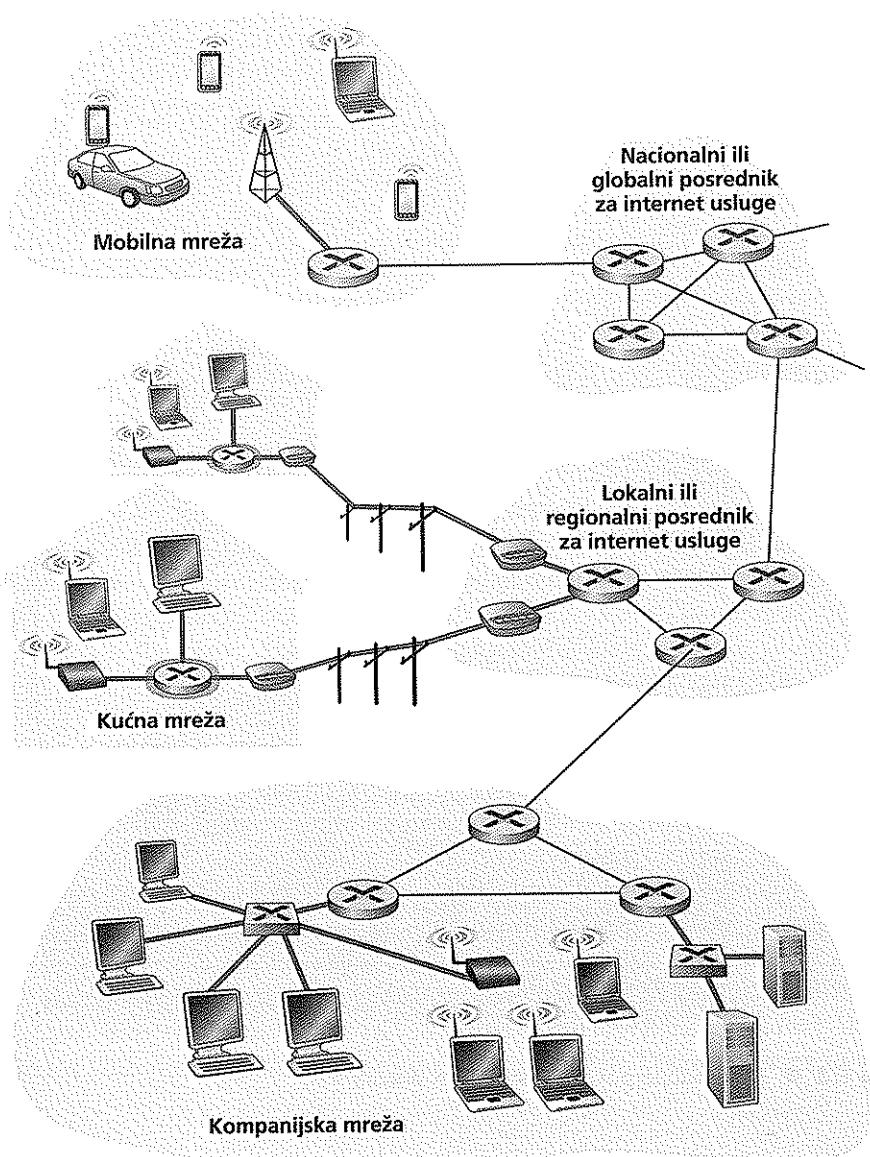
kojih primamo rezultate pretrage, e-poštu, veb strane i video zapise preraspodeljuje u velike **centre podataka**. Na primer, Google ima 30-50 centara podataka od kojih većina ima više od sto hiljada servera.



Slika 1.3 ◆ Međusobna povezanost krajnjih sistema

1.2.1 Pristupne mreže

Pošto smo razmotrili aplikacije i krajnje sisteme na „obodu mreže“, razmotrićemo pristupne mreže – mreže koje fizički povezuju neki krajnji sistem sa prvim ruterom (takođe se naziva i „ivični ruter“) na putanji od tog krajnjeg sistema do bilo kog udaljenog krajnjeg sistema. Na slici 1.4 prikazano je nekoliko vrsta pristupnih mreža podebljanim, osenčenim linijama i okruženjima (kuća, preduzeće i širokopojasna mobilna bežična mreža) u kojima se koriste.



Slika 1.4 ◆ Pristupne mreže

Pristup za domaćinstva: DSL, kablovski, FTTH, Dial-Up i satelitski

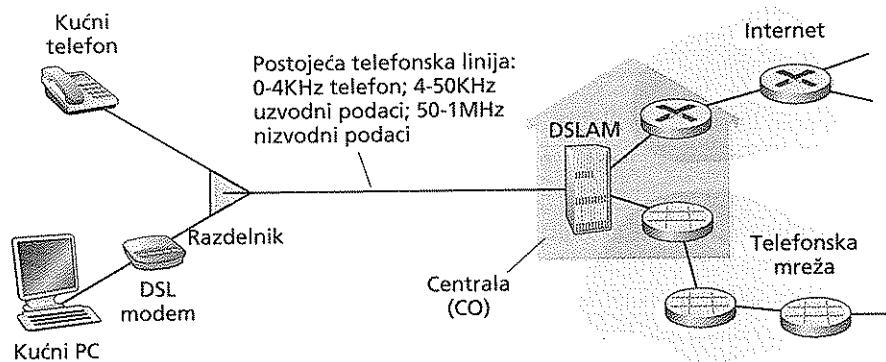
Danas, više od 65% u razvijenim zemljama ima pristup internetu, pri čemu su Koreja, Holandija, Finska i Švedska vodeće, u kojima više od 80% domaćinstava ima pristup internetu, koristeći većinom širokopojasne veze velike brzine [ITU 2011]. Finska i Španija su pristup brzom internetu proglašile „zakonskim pravom“. S obzirom na ovako veliki interes u pristupu građanstva, počnimo naš pregled pristupa mrežama tako što ćemo objasniti kako se iz kuće možete povezati na internet.

Danas su dva najrasprostranjenija tipa širokopojasnih pristupa od kuće **digitalna preplatnička linija (DSL)** i kablovski sistemi prenosa. Kuća obično dobija DSL internet pristup od iste lokalne telefonske kompanije koja pruža i lokalni ožičen telefonski pristup. Stoga, kada se koristi DSL, telefonska kompanija je takođe i posrednik za internet usluge klijenta. Kao što je prikazano na slici 1.5, svaki DSL modem klijenta koristi postojeću telefonsku liniju (upredena parica bakarne žice, o kojoj ćemo govoriti u odeljku 1.2.2) za razmenu podataka pomoću multipleksera, pristupa digitalnoj preplatničkoj liniji (DSLAM) koji se nalazi u lokalnoj centrali telefonske kompanije (CO). Kućni DSL modem uzima digitalne podatke i prevodi ih u visokofrekventne tonove za prenošenje putem telefonskih žica do CO; analogni signali se iz većeg broja ovih domaćinstava prevode nazad u digitalni format u DSLAM-u.

Kućna telefonska linija nosi u isto vreme podatke i tradicionalne signale, koji su kodirani na različitim frekvencijama:

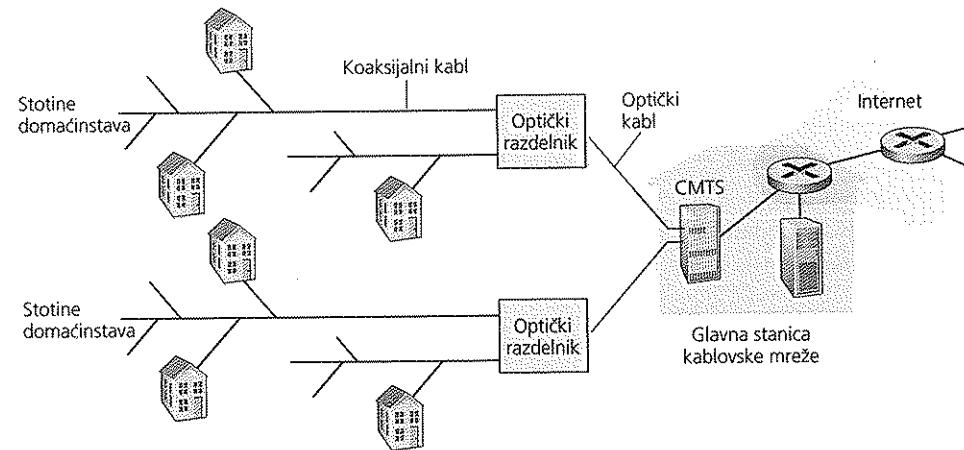
- nizvodni kanal (eng. downstream) velike brzine, u opsegu od 50 kHz do 1 MHz;
- uzvodni kanal (eng. upstream) srednje brzine, u opsegu od 4 kHz do 50 kHz;
- običan dvosmerni telefonski kanal, u opsegu od 0 do 4 kHz.

Na ovaj način, jedan DSL link izgleda kao da postoje tri zasebna linka, tako da je DSL linkom moguće istovremeno razgovarati telefonom i biti povezan sa internetom. (Ovu tehniku frekvencijskog multipleksiranja opisujemo u poglavљу 1.3.1.) Kod korisnika, razdelnik razdvaja podatke i telefonski signal koji stiže u domaćinstvo i prosleđuje signal sa podacima u DSL modem. U telefonskoj kompaniji, u CO, DSLAM razdvaja podatke i telefonski signal i šalje podatke na internet. Stotine, pa čak i hiljade domaćinstava se povezuju na jedan DSLAM [Dischinger 2007].



Slika 1.5 ◆ Pristup internetu preko DSL tehnologije:

DSL standardi definišu brzinu prenosa od 12 Mb/s za nizvodni protok i 2,5 Mb/s za uzvodni protok [ITU 2003]. Pošto su brzine prenosa podataka nizvodno i uzvodno različite, i pristup je asimetričan. Stvarne brzine nizvodnog i uzvodnog prenosa podataka mogu biti manje od gore navedenih, jer davalac DSL internet usluga može smisleno da ograniči brzine za domaćinstva čemu nudi više različitih nivoa usluge (različite brzine raspoložive po različitim cenama), ili maksimalna brzina može biti ograničena i udaljenošću između domaćinstva i CO, prečnika provodnika uporednih parica i nivoa električnih smetnji. Inžinjeri su namerno dizajnirali DSL za kratke udaljenosti između domaćinstva i CO; uopšteno, ako se domaćinstvo ne nalazi na oko 8 do 16 kilometara od CO, najčešće mora da pređe na alternativnu formu internet pristupa.



Slika 1.6 ◆ Hibridna optičko-koaksijalna pristupna mreža

Dok DSL i standardni modemi koriste obične telefonske linije, **kablovski pristup internetu** koristi postojeće kablove kablovske televizije. Domaćinstvo dobija kablovski pristup internetu od iste kompanije koja pruža uslugu kablovske televizije. Kao što je prikazano na slici 1.6, glavna stanica je optičkim kablovima povezana sa razdelnicima u pojedinim delovima grada, od kojih se klasični koaksijalni

kablovi koriste za povezivanje pojedinačnih kuća i stanova. Ovi razdelnici obično služe za priključivanje između 500 i 5000 kuća. S obzirom da se u sistemu koriste i optički i koaksijalni kablovi, često se nazivaju hibridni optičko-koaksijalni sistemi (HFC, engl. *hybrid fiber coax*).

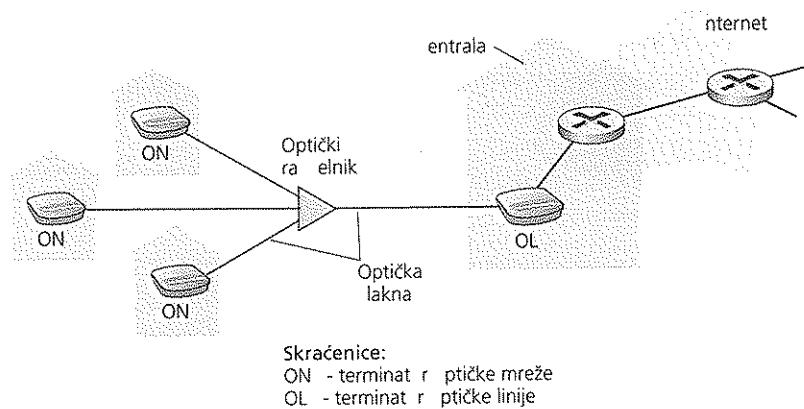
Kablovski pristup internetu zahteva specijalne modeme, nazvane kablovski modemi. Kao i DSL modem, i kablovski modem je tipično eksterni uređaj koji se pomoću Eternet priključka povezuje na kući PC. (O Eternetu ćemo detaljnije govoriti u poglavlju 5). U glavnoj stanici kablovskog sistema, završni sistem kablovskog modema (CMTS – engl. *cable modem termination system*) ima sličnu ulogu kao i DSLAM kod DSL mreže – pretvara analogni signal poslat iz kablovskih modema brojnih domaćinstava koja se nalaze nizvodno u digitalni format. Kablovski modemi dele HFC mrežu na dva kanala: nizvodni kanal i uzvodni kanal. Kao i kod DSL, pristup je obično asimetričan, tako da se nizvodnom kanalu obično dodeljuje veća brzina prenosa nego uzvodnom kanalu. Standard DOCSIS 2.0 definiše nizvodnu brzinu prenosa podataka od 42,8 Mb/s i uzvodnu brzinu od 30,7 Mb/s. Kao i u slučaju DSL mreže, maksimalno moguća brzina neće biti realizovana zbog nižih ugovorenih brzina podataka ili neprilagođenosti medijuma.

Bitna karakteristika kablovskog pristupa internetu je to što je reč o širokopojasnom mediju. Naime, svaki paket poslat od strane glavne stanice putuje nizvodnim kanalom svakim linkom ka svakom domaćinstvu, a svaki paket poslat iz domaćinstva putuje uzvodnim kanalom do glavne stanice. Iz tih razloga, ako nekoliko korisnika istovremeno preuzima datoteku sa video zapisom na nizvodnom kanalu, stvarna brzina po kojoj svaki korisnik prima tu video datoteku biće znatno niža od zbirne nizvodne brzine kabla. S druge strane, ukoliko je samo nekoliko korisnika aktivno i oni svi pretražuju veb, tada će svaki korisnik moći da primi veb strane pri punoj nizvodnoj brzini kabla, jer će oni retko zahtevati veb strane u istom trenutku. S obzirom da se i uzvodni kanal takođe deli, potreban je distribuirani protokol za višestruki pristup kako bi se koordinisao prenos i izbegle kolizije. (Pitanjem kolizija bavimo se detaljnije u poglavlju 5).

Iako DSL i kablovske mreže predstavljaju trenutno više od 90 procenata širokopojanog pristupa za domaćinstva u Sjedinjenim Državama, najnovija dolazeća tehnologija pod nazivom optika do kuće (FTTH – engl. *Fiber To The Home*) obećava čak i veće brzine [FTTH Council 2011a]. Kao što i ime govorи, FTTH koncept je jednostavan – pruža optički put od CO direktno do domaćinstva. U Sjedinjenim Državama, kompanija „Verizon“ forsira ovu tehnologiju i svoju FIOS uslugu [Verizon FIOS 2012].

Postoji nekoliko konkurentnih tehnologija za optičku distribuciju od CO do kuće. Najjednostavnija mreža za optičku distribuciju zove se direktno vlakno (engl. *direct fiber*), u kojoj po jedno vlakno vodi iz CO u svako domaćinstvo. Češći slučaj je da vlakno koje napušta centralu bude u stvari deljeno za potrebe mnogih domaćinstava; ono je deljeno sve dok ne bude relativno blizu domaćinstava, gde se onda razvrstava u pojedinačna vlakna za korisnike. Postoje dve konkurenčne mrežne arhitekture za optičku distributivnu mrežu koje vrše ovo razdvajanje: aktivne optičke mreže (AONs) i pasivne optičke mreže (PONs). AON je u suštini komutirani Eternet, o kome ćemo govoriti u poglavlju 5.

Ovde ćemo ukratko nešto reći o PON, koji se koristi u usluzi FIOS kompanije „Verizon“. Slika 1.7 prikazuje FTTH koji koristi PON arhitekturu za distribuciju. Svako domaćinstvo ima jedan terminator optičke mreže (ONT – engl. optical network terminator), koji je povezan pomoću namenskog optičkog vlakna na razdelnik u određenom delu grada. Razdelnik kombinuje određeni broj domaćinstava (obično manje od 100) na jedno, deljeno optičko vlakno, koje se povezuje na terminator optičke linije (OLT – engl. optical line terminator) u CO telekomunikacione kompanije. OLT koji omogućava konverziju između optičkih i elektronskih signala se povezuje na internet preko rutera telekomunikacione kompanije. U PON arhitekturi, svi paketi poslati iz OLT ka razdelniku se umnožavaju na razdelniku (slično kao i kod glavne centrale).



Slika 1.7 ◆ FTTH pristup internetu:

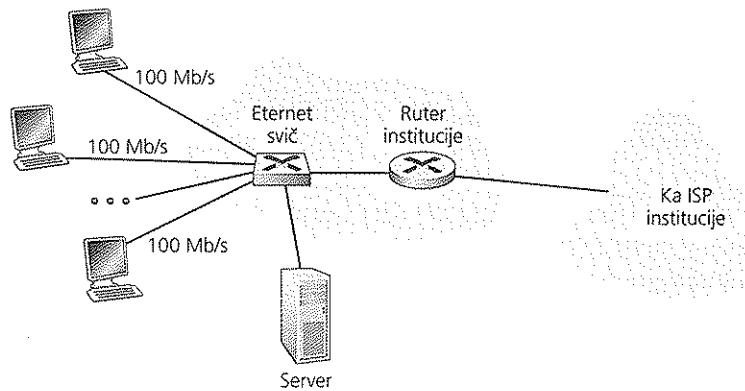
FTTH može da pruži brzine internet pristupa u gigabitima po sekundi. Međutim, većina FTTH posrednika za internet usluge pruža različite brzine, pri čemu veće brzine koštaju više. Prosečna nizvodna brzina za US FTTH korisnike bila je otprilike oko 20 Mb/s u 2011. godini (u poređenju sa 13 Mb/s za mreže sa kablovskim pristupom i manje od 5 Mb/s za DSL) [FTTH Council 2011b].

Preostale dve tehnologije pristupnih mreža takođe obezbeđuju pristup internetu za domaćinstva. Na lokacijama na kojima DSL, kablovski pristup i FTTH nisu raspoloživi (npr. neka ruralna područja), može se koristiti satelitski link za povezivanje domaćinstava na internet brzinom koja je veća od 1 Mb/s; StarBand i HughesNet su jedni od davaoci ovakvog satelitskog pristupa. Dial-up pristup preko tradicionalne telefonske linije bazira se na istom modelu kao i DSL – kućišni modem se preko telefonske linije povezuje na modem posrednika za internet usluge. U poređenju sa DSL-om i drugim širokopojasnim mrežnim pristupima, dial-up pristup je užasno spor sa brzinom od 56 kb/s.

Pristup kompanija (i domaćinstava): Ethernet i WiFi

U preduzećima i na univerzitetima, a sve više i u kućnom okruženju, za povezivanje krajnjeg sistema i pristupnog ruteru obično se koristi lokalna računarska mreža (Local Area Network, LAN). Postoji više vrsta LAN tehnologija, ali je tehnologija Ethernet trenutno ubedljivo najrasprostranjenija tehnologija u kompanijama, na uni-

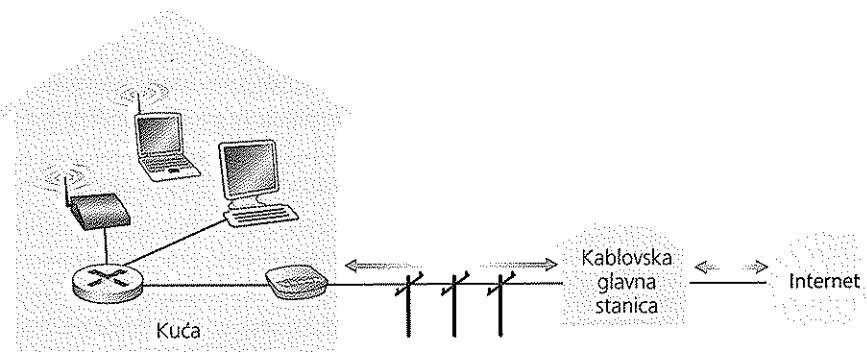
verzitetima i kućnim mrežama. Kao što je prikazano na slici 1.8, Ethernet korisnici koriste kablove sa upredenim bakarnim paricama za povezivanje sa Ethernet komutatorom, tehnologijom o kojoj ćemo detaljnije govoriti u poglavljju 5. Ethernet komutator, to jest svič, ili mreža takvih međusobno povezanih komutatora se zatim povezuje na veći internet. Uz pristup Ethernetu korisnici obično imaju pristup Ethernet komutatoru brzine 100 Mb/s, gde serveri mogu imati pristup pri brzini od 1 Gb/s ili čak 10 Gb/s.



Slika 1.8 ◆ Ethernet pristup internetu

Međutim, sve veći broj ljudi pristupa internetu bežično, putem laptopova, pametnih telefona, tableta i ostalih uređaja (videti ranije izdvojeni tekst pod naslovom *Beskraini niz uređaja*). U bežičnoj LAN postavci, bežični korisnici prenose/primaju pakete ka/od pristupne tačke koja je povezana u kompanijsku mrežu (najčešće uključuje žični Ethernet), koja je povezana na ožičeni internet. Korisnik bežične LAN tehnologije mora obično da bude udaljen do nekoliko desetina metara od pristupne tačke. Bežični LAN pristup zasnovan na IEEE 802.11 tehnologiji, kolokvijalno nazvan WiFi, nalazi se apsolutno svugde – univerziteti, kancelarije, kafići, aerodromi, domaćinstva, pa čak i avioni. U mnogim gradovima, neko ko se nalazi na raskrsnici može da bude u dometu deset ili dvadeset baznih stanica (za pretraživu mapu 802.11 baznih stanica koje su pronašli i preko kojih su se povezali sa internetom mnogi ljudi koji su uživali u tome, pogledajte [wigle.net 2012]). Najčešće korišćena tehnologija 802.11, o kojoj ćemo podrobnije govoriti u poglavljju 6, nudi deljenu bezinu prenosa od 54 Mb/s.

Iako su Ethernet i WiFi pristupne mreže prvenstveno postavljane u kompanijskom (univerziteti, kompanije) okruženju, nedavno su postale sve uobičajenije komponente kućnih mreža. Mnoga domaćinstva kombinacijom širokopojasnog kućnog pristupa (kablovskih ili DSL modema) i jeftinije bežične LAN tehnologije kreiraju moćne kućne mreže [Edwards 2011]. Slika 1.9 predstavlja šematski prikaz uobičajene kućne mreže. Ovu kućnu mrežu čine jedan prenosivi računar i jedan ožičeni PC; bazna stаницa (tačka bežičnog pristupa) koja komunicira sa bežičnim računarcem; kablovski modem koji obezbeđuje širokopojasn pristup internetu i ruter koji povezuje baznu stanicu i stacionarni računar sa kablovskim modemom. Ovakva mreža omogućava članovima domaćinstva da imaju širokopojasn pristup internetu, pri čemu jedan od njih može da se kreće od kuhinje do dvorišta i spavaćih soba.



Slika 1.9 ◆ Uobičajena kućna mreža

Bežični pristup širokog opsega: 3G i LTE

Sve više uređaja poput iPhones, BlackBerrys i android uređaja se koristi za slanje elektronske pošte, pretraživanje veba, tvitovanje i preuzimanje muzike u pokretu. Ovi uređaji koriste istu bežičnu tehnologiju koja se koristi u mobilnoj telefoniji za slanje/primanje paketa preko bazne stanice kojom upravlja mobilni operater. Za razliku od WiFi tehnologije, potrebno je da se korisnik nalazi na udaljenosti do nekoliko desetina kilometara (nasuprot nekoliko desetina metara) od bazne stanice.

Telekomunikacione kompanije izuzetno mnogo ulažu u tzv. treću generaciju (3G) mobilne telefonije, koja obezbeđuje bežični pristup internetu sa komutiranjem paketa na širem prostoru pri brzinama pristupa većim od 1 Mb/s. Već su razvijene i u upotrebi i pristupne tehnologije veće brzine – četvrta generacija (4G) bežičnih mreža širokog opsega. LTE tehnologija („Long Term Evolution”, kandidat za godišnju nagradu Loš akronim) ima svoje korene u 3G tehnologiji i može eventualno da dostigne brzine pristupa od 10 Mb/s. Nizvodne brzine komercijalnih LTE sistema u upotrebi su reda veličine nekoliko desetina Mb/s. Bavićemo se osnovnim principima bežičnih mreža i mobilnosti, kao i tehnologijama WiFi, 3G i LTE (i mnogo više!) u poglavlju 6.

1.2.2 Fizički medijumi

U prethodnom pododeljku prikazali smo neke od najvažnijih tehnologija za pristupne mreže koje se koriste na internetu. Opisujući ove tehnologije, naveli smo i fizičke medijume koji se u njima koriste. Na primer, rekli smo da se u HFC pristupnim mrežama delom koriste optički, a delom koaksijalni kablovi. Rekli smo da obični DSL pristupne mreže i Ethernets koriste kablove sa upredenim bakarnim paricama. Rekli smo i to da se u mrežama sa mobilnim pristupom koriste radio talasi. U ovom pododeljku ukratko ćemo opisati ove i druge prenosne medijume koji se često koriste u okviru interneta.

Da bismo pojasnili šta podrazumevamo pod fizičkim medijumom, zamislićemo kako izgleda kratak život jednog bita. Zamislite jedan bit koji putuje od jednog krajnjeg sistema, kroz seriju linkova i rutera, do drugog krajnjeg sistema. Taj naš jadni bit mora da luta okolo i prenosi se mnogo puta sa jednog mesta na drugo. Izvorni krajnji sistem šalje taj bit i ubrzo zatim prvi ruter u nizu prima taj bit; zatim ga taj prvi ruter šalje dalje, a ubrzo potom prima ga drugi ruter i tako redom. Tako naš bit, putujući od svog izvora do svog odredišta, prolazi kroz čitav niz parova predajnika i prijemnika. Za svaki par predajnika i prijemnika, bit se šalje prostiranjem elektromagnetnih talasa ili optičkih impulsa kroz neki **fizički medijum**. Fizički medijumi mogu da budu različitih oblika i izgleda, a ne moraju da budu isti za sve parove predajnika i prijemnika duž putanje. Primeri fizičkih medijuma su kablovi sa upredenim bakarnim paricama, koaksijalni kablovi, kablovi sa multimodnim optičkim vlaknima, zemaljski i satelitski radio talasi. Fizički medijumi dele se na dve vrste: **vođeni** i **nevođeni medijumi**. Kod vođenih fizičkih medijuma, talasi se vode kroz čvrsti medijum kao što su kablovi sa optičkim vlaknima, kablovi sa upredenim bakarnim paricama ili koaksijalni kablovi. Kod nevođenih medijuma talasi se prostiru kroz atmosferu ili kroz vlasionski prostor, kao u slučaju bežičnih lokalnih mreža (LAN) ili digitalnih satelitskih kanala.

Pre nego što predemo na karakteristike različitih tipova medijuma, recimo nekoliko reči i o njihovim cenama. Stvarna cena fizičkog linka (bakarnog ili optičkog kabla i tako redom) obično je zanemarljiva u poređenju sa ostalim troškovima umrežavanja. Na primer, troškovi radne snage vezani za instaliranje fizičkih linkova često nekoliko puta premašuju cenu samog materijala. Iz tog razloga, u mnogim novijim zgradama se u svakoj prostoriji istovremeno instaliraju kablovi sa upredenim paricama, optički i koaksijalni kablovi. Čak i ako se u početku koristi samo jedan od ovih medijuma, sva je prilika da će se u bliskoj budućnosti koristiti još neki, tako da se na ovaj način smanjuju troškovi za naknadno postavljanje kablova.

Kablovi sa upredenim bakarnim paricama

Najjeftiniji i najrasprostranjeniji usmereni prenosni medijum jesu kablovi sa upredenim bakarnim paricama. Telefonske mreže koriste ove kablove preko stotinu godina. U stvari, za više od 99 procenata žičanih linkova između telefonskog aparatnog i lokalnog telefonskog komutatora koriste se kablovi sa upredenim bakarnim paricama. Ove kablove ste sigurno već videli u svom domu ili na radnom mestu. Upredena parica sastoji se od dva ravnomerno spiralno upredena izolovana bakarna provodnika, od kojih je svaki debljine oko 1 mm. Žice su upredene da bi se smanjile elektromagnetne smetnje od sličnog para žica u blizini. Najčešće se više ovakvih parica spaja u kabl, omotavanjem parica zaštitnim omotačem. Par žica čini jednu komunikacioni link. **Kablovi sa neokloppljenim upredenim paricama (Unshielded Twisted Pairs, UTP)** obično se koriste u okviru iste zgrade, to jest, za lokalne računarske mreže (LAN). Brzina prenosa podataka za LAN mreže koje koriste upredene parice kreće se od 10 Mb/s do 10 Gb/s. Brzina prenosa koju je moguće postići zavisi od debljine provodnika i rastojanja između predajnika i prijemnika.

Kada se osamdesetih godina pojavila tehnologija optičkih vlakana, mnogi su počeli da omalovažavaju kablove sa upredenim paricama zbog njihove relativno male brzine prenosa. Neki su čak mislili da će tehnologija optičkih vlakana potpuno potisnuti kablove sa upredenim paricama. Ali upredene parice se nisu tako lako predale. Savremena tehnologija upredenih parica, kao što su kablovi kategorije 6a, omogućava brzine prenosa od 10 Gb/s na udaljenostima do nekoliko stotina metara. U svakom slučaju, upredene parice se još uvek najčešće koriste za LAN mreže velike brzine.

Kao što smo već napomenuli, kablovi sa upredenim paricama najviše se koriste za pristup domaćinstava internetu. Videli smo da tehnologija običnih modema omogućava brzine prenosa do 56 kb/s korišćenjem kablova sa upredenim paricama. Takođe, videli smo i to da je DSL (Digital Subscriber Line) tehnologija omogućila korisnicima da iz svojih kuća pristupaju internetu brzinom od nekoliko desetina Mb/s korišćenjem kablova sa upredenim paricama (ukoliko žive blizu modema posrednika za internet usluge).

Koaksijalni kablovi

Slično kablovima sa upredenim paricama i koaksijalni kablovi se sastoje od dva bakarna provodnika, s tim da su provodnici koncentrični umesto paralelni. Takođe, konstrukcijom i posebnom izolacijom i omotačem, koaksijalni kablovi omogućavaju velike brzine prenosa. Koaksijalni kablovi su uobičajeno se koriste u sistemima kablovske televizije. Kao što smo već rekli, sistemi kablovske televizije od nedavno se dopunjaju kablovskim modemima koji kućnim korisnicima omogućuju pristup internetu brzinama od nekoliko desetina Mb/s. U kablovskoj televiziji i kablovskom pristupu internetu, predajnik premešta digitalni signal u neki određeni frekventni opseg, a dobijeni analogni signal šalje se prema jednom prijemniku ili više njih. Koaksijalni kabl se koristi kao vođeni **deljeni medijum**. Drugim rečima, to znači da istim kablom može da bude povezan veći broj krajnjih sistema, pri čemu svako od njih prima sve ono što šalju svi drugi krajnji sistemi.

Optički kablovi

Optičko vlakno je tanki, savitljivi medijum koji provodi svetlosne impulse, pri čemu svaki impuls predstavlja jedan bit. Optički kabl sa jednim vlaknom podržava izuzetno velike brzine prenosa, čak do nekoliko desetina pa i stotina gigabita po sekundi. Ovi kablovi nisu podložni elektromagnetskim smetnjama, imaju neznatno slabljenje signala do razdaljine do 100 kilometara i veoma teško se prisluškuju. Zahvaljujući ovim karakteristikama, optički kablovi su najbolji vođeni prenosni medijumi za velika rastojanja, posebno za prekomorske linkove. U mnogim međugradskim telefonskim mrežama u SAD, ali i u drugim krajevima sveta, sada se koriste isključivo kablovi od optičkih vlakana. U okosnici interneta takođe preovladava ova vrsta kablova. Međutim, visoka cena optičkih uređaja – kao što su predajnici, prijemnici i komutatori smanjila je njihovu primenu u prenosu na kraćim rastojanjima, kao što su LAN mreže ili pristupne mreže u domaćinstvima. Brzina prenosa preko standar-

dnog optičkog linka (Optical Carrier, OC) kreće se od 51,8 Mb/s do 39,8 Gb/s; ove brzine obično se označavaju kao OC-n, gde je brzina prenosa $n \times 51,8$ Mb/s. Danas se koriste standardne brzine OC-1, OC-3, OC-12, OC-24, OC-48, OC-96, OC-192, OC-768. U radovima [Mukherjee 2006, Ramaswamy 2010] obuhvaćeni su razni aspekti optičkih mreža.

Zemaljski radio talasi

Radio kanali prenose signale, koristeći elektromagneti spektar. Njihova prednost je u tome što ne zahtevaju postavljanje kablova, mogu da prolaze kroz zidove, obezbeđuju povezivanje mobilnim korisnicima i signal mogu da prenesu signal na veće rastojanje. Karakteristike radio kanala u velikoj meri zavise od sredine kroz koju se prenose i rastojanja koje signali treba da pređu. Sredina kroz koju se signali prenose može na njih da utiče tako što se javlja slabljenje usled rastojanja i slabljenje u senci (jačina signala se smanjuje sa povećanjem udaljenosti i prolaskom signala oko prepreka ili kroz njih), slabljenje usled višestrukih putanja (signali se odbijaju o objekte koji im se nađu na putu) i međusobnih smetnji (koje stvaraju drugi radio kanali ili elektromagnetni signali).

Zemaljski radio kanali mogu grubo da se podele u tri grupe: one koji se koriste na kraćim rastojanjima (od jednog do dva metra); one koji se koriste u lokalnom okruženju, najčešće od deset do nekoliko stotina metara, i one koji se koriste na velikim rastojanjima do nekoliko desetina kilometara. Lični uređaji poput bežičnih slušalica, tastature, i medicinski uređaji rade na kraćim rastojanjima; tehnologija bežičnih LAN mreža opisana u odeljku 1.2.1 koristi radio talase lokalnog dometa, dok tehnologije za mobilni pristup koriste radio kanale velikog dometa. Radio kanale podrobnije razmatramo u poglavljiju 6.

Satelitski radio kanali

Komunikacioni sateliti povezuju dva ili više mikrotalasnih zemaljskih predajnika i prijemnika, poznatih pod imenom zemaljske stanice. Satelit prima signale u jednom frekventnom opsegu, zatim regeneriše primljeni signal pomoću repetitora (objašnjen u nastavku teksta) i onda šalje signal na drugoj frekvenciji. Za komunikacije se koriste dve vrste satelita: **geostacionarni sateliti i sateliti sa niskim orbitama** (low-earth orbiting, LEO).

Geostacionarni sateliti su trajno pozicionirani iznad iste tačke na Zemlji. Nepromenljivost položaja postiže se postavljanjem satelita u orbitu na visinu od 36000 kilometara iznad površine Zemlje. Zbog ogromne udaljenosti koju bi signal trebalo da pređe od zemaljske stanice do satelita i natrag do druge zemaljske stanice, javlja se značajno kašnjenje od 280 milisekundi. Međutim, satelitski linkovi, koji mogu da rade pri brzinama od nekoliko stotina Mb/s, često se koriste u oblastima gde ne postoji mogućnost za DSL ili kablovski pristup internetu.

LEO sateliti nalaze se mnogo bliže Zemlji i nisu stalno iznad iste tačke na Zemljinoj površini. Oni rotiraju oko Zemlje (slično kao i Mesec) i mogu da međusobno komuniciraju i da ostvaruju vezu sa zemaljskim stanicama. Da bi neka oblast

bila stalno pokrivena, potrebno je u orbitu poslati mnogo satelita. Trenutno ima mnogo komunikacionih sistema na manjim visinama koji su u fazi razvoja. Lojdova web stranica o konstelaciji satelita [Wood 2012] nudi i sakuplja informacije o trenutnom položaju satelitskih komunikacionih sistema. Moguće je da će se u budućnosti za pristup internetu koristiti upravo tehnologija niskih satelita (LEO).

1.3 Jezgro mreže

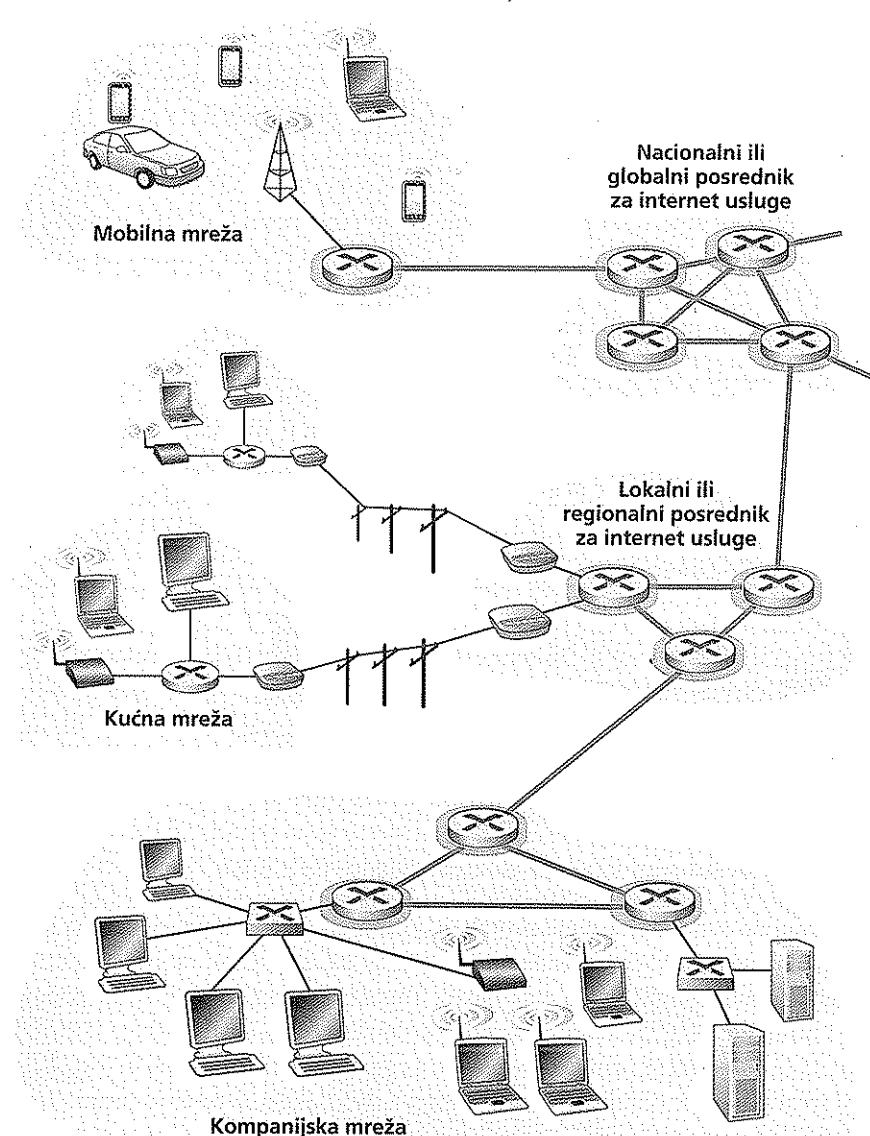
Pošto smo ispitali obod interneta, zaronimo malo dublje unutar jezgra mreže – smешu sačinjenu od komutatora paketa i linkova koji međusobno povezuju krajnje sisteme interneta. Na slici 1. 10 jezgo mreže je istaknuto podebljanim, osenčenim linijama.

1.3.1 Komutiranje paketa

U mrežnim aplikacijama, krajnji sistemi međusobno razmenjuju **poruke**. U porukama se može nalaziti sve što je programer aplikacije zamislio. Poruke mogu da vrše kontrolnu funkciju (na primer, poruka „Zdravo“ iz našeg primera o rukovanju sa slike 1.2), ili mogu da sadrže podatke, kao što su poruke e-pošte, JPEG slike, ili MP3 muzički fajl. Da bi se poslala poruka od izvornog krajnjeg sistema do određenog krajnjeg sistema, izvor dugačke poruke se razbija na manje fragmente poznate pod nazivom **paketi**. Ovi paketi, od svog izvora pa do svog odredišta, prolaze kroz komunikacione linkove i **komutatore paketa** (koji postoje u jednom od dva najzastupljenija oblika, kao **ruteri** ili kao **komutatori sloja veze**). Paketi se preko komunikacionih linkova prenose brzinom koja je jednaka *punoj* brzini prenosa određenog linka. Stoga, ako izvorni krajnji sistem ili komutator paketa šalje paket od L bitova preko linka čija je brzina prenosa R bita/s, onda je vreme prenosa paketa L/R sekundi.

Princip prenosa podataka uskladišti pa prosledi

Većina komutatora paketa prilikom slanja na neki link koristi princip prenosa podataka **uskladišti pa prosledi**. Prenos **uskladišti pa prosledi** znači da komutator mora da primi čitav paket pre nego što počne da prenosi prvi bit tog paketa na izlazni link. Da bismo detaljnije objasnili princip **uskladišti pa prosledi**, uzmimo u obzir jednostavnu mrežu koja se sastoji iz dva krajnja sistema povezana jednim ruterom, kao što je prikazano na slici 1.11. Ruter obično ima više povezanih linkova, jer je njegov zadatak da komutira dolazeći paket na odlazni link; u ovom jednostavnom primeru, ruter ima poprilično jednostavan zadatak da prenese paket od jednog (ulaznog) linka do drugog priključenog linka. U ovom primeru, izvor ima tri paketa koja šalje do odredišta, pri čemu se svaki sastoji od L bitova. U vremenskom preseku prikazanom na slici 1.11, izvor je preneo deo paketa 1, i početni deo paketa 1 je već stigao do ruteru. S obzirom da ruter koristi princip **uskladišti pa prosledi**, u



Slika 1.10 ◆ Jezgro mreže:

tom vremenskom intervalu ruter ne može da prenosi bitove koje je primio. Umesto toga on mora prvo da smesti bitove paketa u bafer, odnosno prihvatnu memoriju (tj. da ih uskladišti). Onda kada ruter primi sve bitove paketa, može da počne sa prenošenjem (tj. prosleđivanjem) paketa na izlazni link. Da biste imali neki uvid u princip prenosa **uskladišti pa prosledi**, izračunaćemo koliko vremena protekne od momenta kada izvor počne da šalje paket, do momenta kada odredište prihvati ceo ovaj paket. (Ovde ćemo ignorisati kašnjenje usled prostiranja – vreme potrebno da se bitovi pošalju duž žice, približno brzinom svetlosti – o čemu će biti reči u odeljku 1.4). Izvor počinje sa slanjem u vremenu 0; u trenutku L/R sekundi, izvor je preneo ceo paket, a ruter ga je primio i uskladišto u celosti (jer nema kašnjenja usled prostiranja). U trenutku L/R sekundi, može započeti prenošenje paketa na izlazni link prema odredištu, jer je ruter upravo primio ceo paket; u trenutku $2L/R$, ruter je preneo ceo paket, i on je na odredištu primljen u celosti. Otuda je ukupno kašnjenje $2L/R$. Ukoliko bi komutator prosledio bitove čim stignu (bez skladištenja celog paketa), onda bi ukupno kašnjenje bilo L/R , jer bitovi nisu zadržani na ruteru. Međutim, kao što smo već rekli u odeljku 1.4, ruteri bi trebalo da prime, uskladište i obrade ceo paket pre nego što ga proslede.



Slika 1.11 ◆ Komutiranje paketa po principu uskladišti pa prosledi:

Izračunajmo sada vreme koje protekne od trenutka kada izvor počne da šalje prvi paket do trenutka kada odredište primi sva tri paketa. Kao i ranije, u trenutku L/R , ruter počinje da prosleđuje prvi paket. Takođe, u trenutku L/R izvor počinje da šalje i drugi paket, jer je upravo završio sa slanjem celog prvog paketa. Stoga, u trenutku $2L/R$ odredište je primilo prvi paket, a ruter je primio drugi paket. Na sličan način, u trenutku $3L/R$ odredište je primilo prva dva paketa, a ruter je primio treći paket. Konačno, u trenutku $4L/R$, odredište je primilo sva tri paketa!

Razmotrimo sada opšti slučaj slanja jednog paketa od izvora do odredišta duž putanje koja se sastoji od N liknova brzine R (na taj način ima $N - 1$ rutera između izvora i odredišta). Primjenjujući istu, gore pomenutu logiku, vidimo da je kašnjenje s kraja na kraj:

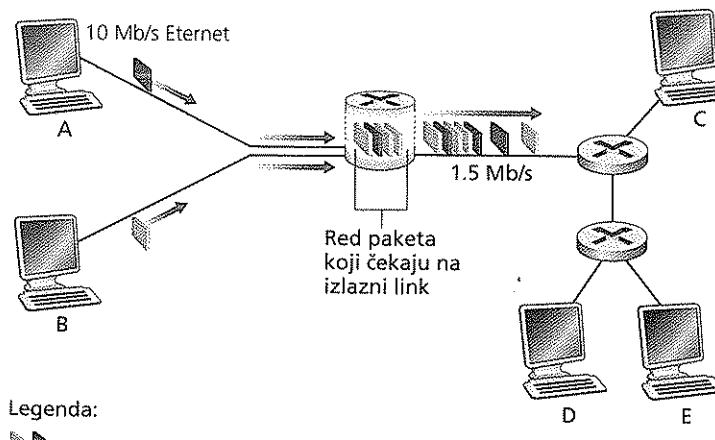
$$d_{s \text{ kraja na kraj}} = N \frac{L}{R} \quad (1.1)$$

Možda sada želite da odredite kašnjenje za P paketa poslatih preko niza od N linkova.

Kašnjenje usled čekanja u redu i gubici paketa

Svi komutatori paketa su povezani na više linkova. Za svaki priključeni link, komutator paketa ima, **izlaznu privremenu memoriju, izlazni bafer**, (engl. *output buffer*, naziva se i **izlazni red čekanja**) u kome se smeštaju paketi koje će ruter da pošalje preko izlaznog linka. Taj izlazni bafer ima ključnu ulogu u komutiranju paketa. Ukoliko je link kroz koji bi neki paket trebalo da se pošalje trenutno zauzet slanjem drugog paketa, pristigli paket mora da sačeka u izlaznom baferu. Zbog toga, osim kašnjenja usled principa uskladišti pa prosledi, paketi trpe i **kašnjenje zbog čekanja** u izlaznobaferu. Ova kašnjenja su promenljiva i zavise od nivoa zagrušenja u mreži. Pošto je prostor u baferu ograničen, pristigli paket može da stigne u trenutku kada je bafer već potpuno popunjeno drugim paketima koji čekaju u redu za prenos. U tom slučaju dolazi do **gubitka paketa** – odbacuje se, ili upravo pristigli paket, ili jedan od onih koji čekaju u redu.

Na slici 1.12 prikazana je jednostavna mreža sa komutiranjem paketa. Kao i na slici 1.11, paketi su predstavljeni trodimenzionalnim pločicama. Širina pločice predstavlja broj bitova u određenom paketu. Na ovoj slici sve pločice imaju jednaku širinu, što znači da su svi paketi jednakog dužine. Pretpostavimo da računari A i B šalju pakete računaru E. Računari A i B prvo šalju svoje pakete preko Ethernetske linkove brzine 10 Mb/s do prvog ruteru. Taj ruter ih zatim preusmerava na link čija je brzina 1,5 Mb/s. Ukoliko je tokom kratkog vremenskog intervala brzina kojom paketi pristižu na ruter (pretvorena u bite u sekundi) nadmašila brzinu od 1,5 Mb/s, doći će do zagrušenja na ruteru, pošto paketi čekaju u redu u izlaznom baferu pre nego što budu poslati na link. Na primer, ako računari A i B pošalju u isto vreme rafale od pet paketa s kraja na kraj, onda će većina ovih paketa provesti neko vreme čekajući u redu. Situacija je u potpunosti analogna mnogim svakodnevnim situacijama – na primer, možemo da čekamo u redu u banci ili ispred nekog šaltera. Kašnjenje zbog čekanja u redu ćemo podrobnije razmatrati u odeljku 1.4.



Slika 1.12 ◆ Komutiranje paketa:

Tabele prosleđivanja i protokoli za rutiranje

Rečeno je da ruter preuzima paket koji stiže jednim od komunikacionih linkova povezanih sa njim i prosleđuje taj paket drugim komunikacionim linkom koji je povezan njim. Ali, kako ruter određuje na koji link bi trebalo da prosledi taj paket? U različitim računarskim mrežama prosleđivanje paketa se obavlja na različite načine. Ovde ćemo ukratko opisati rešenje koje se koristi na internetu.

Svaki krajnji sistem na internetu ima adresu koja se zove IP adresa (IP – internet protocol). Kada izvorni krajnji sistem želi da pošalje paket do odredišnog krajnjeg sistema, izvor uključuje IP adresu odredišta u zaglavje paketa. Slično poštanskim adresama i ove adrese imaju hijerarhijsku strukturu. Kada paket stigne do nekog ruteru u mreži, taj ruter ispituje deo odredišne adrese tog paketa i prosleđuje ga susednom ruteru. Tačnije govoreći, svi ruteri imaju **tabele prosleđivanja** kojima se odredišne adrese (ili delovi odredišne adrese) pridružuju na izlazne linkove. Kada neki paket stigne u ruter, taj ruter ispituje adresu i pretražuje svoju tabelu prosleđivanja, koristeći odredišnu adresu kako bi pronašao odgovarajući izlazni link. Ruter zatim usmerava paket na odgovarajući izlazni link.

Postupak usmeravanja sa jednog kraja na drugi kraj može se porediti sa vozačem koji ne koristi auto-kartu, već više voli da pita za put. Na primer, prepostavimo da Džo putuje iz Filadelfije do ulice Lejksajd Drajk 156 u Orlandu na Floridi. Džo prvo vozi do najbliže benzinske pumpe i pita kako da stigne do ulice Lejksajd Drajk 156 u Orlandu na Floridi. Radnik na pumpi iz adrese izdvaja deo u kome se pominje Florida i kaže Džou da je potrebno da ide međudržavnim autoputem I-95 jug, na koji može da izade odmah pored benzinske pumpe. Takođe, kaže Džou da bi kad stigne na Floridu trebalo da zatraži pomoć od nekog tamo. Džo vozi putem I-95 jug sve dok ne stigne u Džeksonvil na Floridi gde od drugog radnika na pumpi zatraži pomoć. Taj radnik iz adrese izdvaja deo u kome se pominje Orlando i kaže Džou da bi trebalo da nastavi putem I-95 jug do Dejtona Biča i da se tamo raspita kod nekog drugog. Radnik na pumpi u Dejton Biču takođe izdvaja deo iz adrese u kome se pominje Orlando i kaže Džou da bi trebalo da ide putem I-4 koji vodi neposredno do Orlanda. Džo vozi ovim putem i stiže do odvajanja za Orlando. Džo svraća do još jedne pumpe, a radnik na toj pumpi ovog puta iz adrese izdvaja deo u kome se pominje ulica Lejksajd Drajk i kaže Džou kojim putem da ide da bi stigao tamo. Pošto stigne u ovu ulicu, Džo pita dečaka na biciklu kako da stigne do svog odredišta. Dečak iz adrese izdvaja deo u kome piše broj 156 i pokazuje odgovarajuću kuću. Džo konačno stiže na svoje krajnje odredište. U prethodnom poređenju, radnici na pumpi i dečak na biciklu ponašaju se kao ruteri u mreži.

Upravo ste naučili da ruter adresu odredišta paketa koristi za indeksiranje tabele prosleđivanja i određivanje odgovarajućeg izlaznog linka. Međutim ova tvrdnja zahteva odgovore na još nekoliko pitanja: Kako se popunjavaju tabele prosleđivanja? Da li se konfigurišu ručno u svakom i za svaki ruter, ili internet koristi automatizovanu proceduru? Ovim pitanjima ćemo se detaljnije baviti u poglavlju 4. Da

bismo zadovoljili vaše apetite, sada ćemo napomenuti da internet ima brojne specijalne **protokole za rutiranje** koji se koriste za automatsko popunjavanje tabele prosleđivanja. Protokoli za rutiranje mogu, na primer, da utvrde najkraću putanju od svakog ruteru do odredišta i da koriste rezultate najkraće putanje za konfigurisanje tabele prosleđivanja u ruteringu.

Da li biste zaista želeli da vidite putanju koju paketi prelaze na internet, krećući se sa jednog kraja na drugi? Pozivamo vas da to pokušate, koristeći program *Traceroute*. Jednostavno posetite <http://www.traceroute.org>, izaberite izvor u određenoj zemlji i pratite putanju od tog izvora do vašeg računara. (Priču o programu *Traceroute* može naći u odeljku 1.4.)

1.3.2 Komutiranje kola

Prilikom prenošenja podataka kroz mrežu linkova i komutatora primenjuju se dva osnovna pristupa: **komutiranje kola** i **komutiranje paketa**. Pošto smo u prethodnom pododeljku ispitali mreže sa komutiranjem paketa, sada ćemo pažnju preusmeriti na mreže sa komutiranjem kola.

U mrežama sa komutiranjem kola, potrebeni resursi duž putanje (baferi, brzina prenosa linka) za komunikaciju između dva krajnja sistema su *rezervisani* za vreme trajanja komunikacione sesije između krajnjih sistema. U mrežama sa komutiranjem paketa, ovi resursi *nisu* rezervisani i poruke koje pripadaju sesiji koriste resurse na zahtev, pa zato ponekad moraju da čekaju (stanu u red) na pristup komunikacionom linku. Kao jednostavno poređenje, zamislite dva restorana: jedan u kome su rezervacije neophodne i drugi u kome se one niti traže, niti prihvataju. Za mesto u restoranu u kome su rezervacije neophodne pre polaska moramo pozvati telefonom i rezervisati. Ali kada stignemo u restoran, praktično odmah možemo da pozovemo konobara i poručimo jelo. Za restoran koji ne prihvata rezervacije ne moramo da brinemo o rezervaciji stola. Ali kada stignemo u restoran, možda ćemo prvo morati da sačekamo na red za sto pa ćemo tek onda moći da pozovemo konobara.

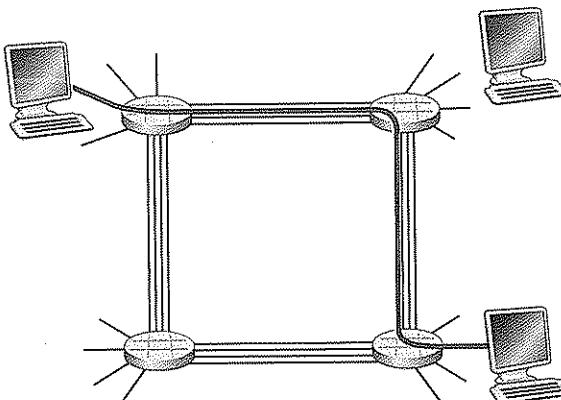
Tradicionalne telefonske mreže predstavljaju primere mreža sa komutiranjem kola. Razmotrimo šta se događa kada jedna osoba telefonskom mrežom želi da pošalje informacije (glas ili faks) drugoj osobi. Da bi pošiljalac mogao da pošalje svoje informacije, telefonska mreža najpre mora da uspostavi vezu između pošiljaoca i primaoca. Ovo je *bona fide* veza u kojoj komutatori na putanji između pošiljaoca i primaoca održavaju stanje veze za datu vezu. U žargonu telekomunikacija ovakva veza se naziva **kolo**. Uspostavljanjem kola, mreža takođe rezerviše nepromenljivu brzinu prenosa na linkovima mreže (koja predstavlja deo kapaciteta prenosa svakog linka) tokom trajanja te veze. Pošto je data brzina prenosa rezervisana za ovu vezu između pošiljaoca i primaoca, pošiljalac može primaocu da prenosi podatke *garantovanom* konstantnom brzinom.

Na slici 1.13 prikazana je mreža sa komutiranjem kola. U ovoj mreži četiri komutatora kola su međusobno povezana preko četiri linka. Svaki od ovih linkova ima 4 kola (kanala), što znači da svaki link može da podrži 4 istovremene veze. Svi računari (na primer, PC računari i radne stанице) neposredno su povezani sa jednim od komutatora. Kada dva računara žele da komuniciraju, mreža između njih uspostavlja posvećenu vezu od jednog do drugog kraja. Prema tome, da bi računar A komunicirao sa računarom B, mreža najpre mora da zauzme po jedno kolo na oba linka. U ovom primeru, posvećena veza od jednog do drugog kraja koristi drugo kolo na prvom linku i četvrtu kolo na drugom linku. Pošto svaki link ima 4 kola, za svaki link koji se koristi u vezi od jednog do drugog kraja, veza dobija jednu četvrtinu ukupnog kapaciteta linka za vreme trajanja veze. Stoga, na primer, ako svaki link između susednih komutatora ima brzinu prenosa od 1 Mb/s, tada svaka veza sa komutiranjem kola od jednog do drugog kraja dobija po 250 kb/s posvećene brzine prenosa.

I obrnuto, pogledajmo šta se dešava kada jedan računar želi da pošalje paket drugom računaru putem mreže sa komutiranjem paketa, kao što je internet. Kao i kod komutiranja kola, paket se prenosi preko niza komunikacionih linkova. Ali, za razliku od komutiranja kola, paket se šalje u mrežu bez rezervisanja bilo kakvih resursa linka. Ako je neki od linkova zagušen zato što bi preko tog linka u isto vreme trebalo da se prenesu drugi paketi, onda će paket morati da sačeka u baferu na prednjoj strani linka što će izazvati kašnjenje. Internet će preduzimati najefikasnije načine da blagovremeno isporuči pakete, ali ne daje nikakve garancije.

Multipleksiranje u mrežama sa komutiranjem kola

Kola u linku se realizuju multipleksiranjem dodeljenih frekvencijskih kanala (Frequency-Division Multiplexing, FDM) ili multipleksiranjem dodeljenog vremena (Time-Division Multiplexing, TDM). Kod FDM mreža, frekventni spektar se deli između veza koje su uspostavljene duž linka.



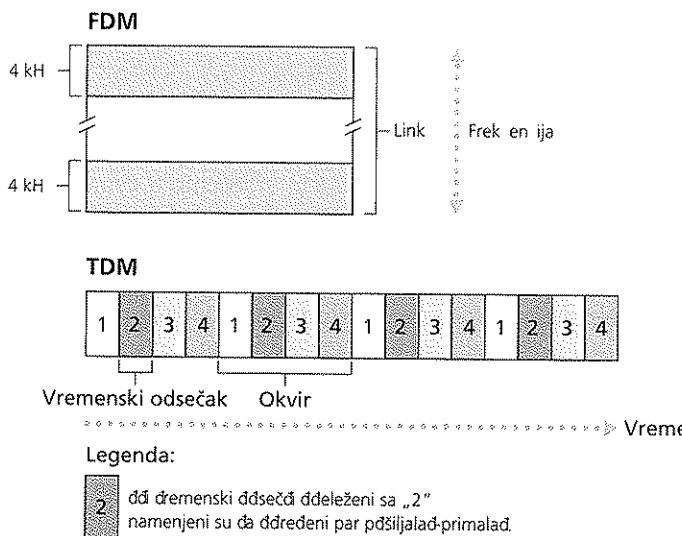
Slika 1.13 ◆ Jednostavna mreža sa komutiranjem kola koju sačinjavaju četiri komutatora i četiri linka

Drugim rečima, link dodeljuje određeni frekventni opseg svakoj vezi tokom čitavog njenog trajanja. U telefonskim mrežama ovaj frekventni opseg obično ima širinu od 4 kHz (4000 herca ili 4000 ciklusa u sekundi). Širina ovog opsega se naziva **propusni opseg**. FM radio stanice takođe koriste tehnologiju FDM za deljenje frekventnog spektra između 88 MHz i 108 MHz, pri čemu se svakoj stanici dodeljuje određeni frekventni opseg.

Na TDM linkovima, vreme se deli na okvire fiksne dužine, pri čemu je svaki okvir podeljen na isti broj vremenskih odsečaka. Kada mreža uspostavi vezu duž određenog linka, toj vezi se dodeljuje po jedan vremenski odsečak u svakom okviru. Ovi vremenski odsečci namenjeni su samo za tu vezu, pri čemu se jedan vremenski odsečak može koristiti (u svakom okviru) za prenošenje podataka koji pripadaju toj vezi.

Na slici 1.14 je prikazana realizacija FDM i TDM rešenja za određeni mrežni link koji podržava do četiri kola. Kod FDM pristupa, frekventni opseg podeljen je na četiri podopsega od kojih svaki ima širinu od 4 kHz. Kod TDM pristupa, vremenski opseg podeljen je na okvire sa po četiri vremenska odsečaka u svakom okviru; svakom kolu dodeljen je isti vremenski odsečak u TDM okvirima koji se ponavljaju. U TDM slučaju, brzina prenosa kola jednak je broju okvira u sekundi koji se množi brojem bitova u odsečku. Na primer, ukoliko link prenosi 8000 okvira u sekundi, a svaki vremenski odsečak obuhvata osam bitova, onda je brzina prenosa jednog kola 64 kb/s.

Zagovornici komutiranja paketa su oduvek tvrdili da komutiranje kola predstavlja raspodelu resursa, pošto su posvećena kola besposlena tokom **perioda tišine**.



Slika 1.14 ◆ Sa FDM linkovima svako kolo neprekidno dobija deo propusnog opsega. Sa TDM linkovima svako kolo periodično dobija čitav propusni opseg tokom kraćih intervala (to jest, tokom vremenskih odsečaka)

Na primer: kada jedna osoba u telefonskom razgovoru prestane da priča, neuposlenemrežne resurse (frekventne opsege ili vremenske odsečke u linkovima duž putanje veze) nije moguće koristiti za drugu aktivnu vezu. Drugi primer nedovoljne iskorišćenosti tih resursa bio bi, recimo, slučaj radiologa koji koristi mrežu sa komutiranjem kola za daljinsko pristupanje nizu rendgenskih snimaka. Radiolog uspostavlja vezu, zahteva snimak, proučava ga i zatim zahteva novi snimak. Mrežni resursi su dodeljeni toj vezi, ali se ne koriste (tj. protračeni su) dok radiolog proučava snimke. Sa neskrivenim zadovoljstvom zagovornici komutiranja paketa takođe ističu da su uspostavljanje kola i rezervisanje propusnog opsega od jednog do drugog kraja isuviše složeni i da je za njih neophodan složen softver za signalizaciju koji bi trebalo da uskladi rad komutatora duž putanje od jednog do drugog kraja.

Pre nego što završimo razmatranje komutiranja kola, navešćemo i jedan brojčani primer koji će dodatno pojasniti ono o čemu pričamo. Dakle, pogledajmo koliko je vremena potrebno za slanje datoteke od 640 000 bitova od računara A do računara B kroz mrežu sa komutiranjem kola. Pretpostavimo da svi linkovi u mreži koriste TDM sa 24 vremenska odsečka i da imaju brzinu od 1.536 Mb/s. Takođe ćemo pretpostaviti da je za uspostavljanje kola od jednog do drugog kraja potrebno 500 ms, nakon čega računar A počinje prenos datoteke. Koliko je vremena potrebno za prenos te datoteke? Svako kolo ima brzinu prenosa od $(1.536 \text{ Mb/s})/24 = 64 \text{ kb/s}$, što znači da je za prenos datoteke potrebno $(640000 \text{ bitova})/(64 \text{ kb/s}) = 10 \text{ sekundi}$. Kada ovome dodamo i vreme potrebno za uspostavljanje kola, dobijamo 10,5 sekundi. Pažnja! Vreme prenosa ne zavisi od broja linkova: prenos traje 10 sekundi bez obzira da li kolo od jednog do drugog kraja prolazi kroz jedan link ili sto linkova. (Stvarno kašnjenje od jednog do drugog kraja takođe obuhvata i kašnjenje usled prostiranja; pročitajte odeljak 1.4).

Poređenje komutiranja paketa i komutiranja kola

Pošto smo opisali komutiranje kolai komutiranje paketa, videćemo u čemu se razlikuju. Protivnici komutiranja paketa obično tvrde da komutiranje paketa nije pogodno za usluge u realnom vremenu (na primer, za telefonske pozive i video konferencije) zbog promenljivog i nepredvidivog kašnjenja između krajnjih tačaka (prvenstveno usled promenljivog i nepredvidivog kašnjenja zbog čekanja u redu). Zagovornici komutiranja paketa tvrde da: (1) komutiranje paketa obezbeđuje bolju deobu kapaciteta prenosa; (2) da je komutiranje paketa jednostavnije, efikasnije i jeftinije za implementaciju u odnosu na komutiranje kola. Veoma zanimljivo poređenje komutiranja paketa i komutiranja kola možete pronaći u [Molinero-Fernandez 2002]. Uopšteno govoreći, ljudi koji ne vole da se opterećuju rezervacijama u restoranu prednost daju komutiranju paketa u odnosu na komutiranje kola.

Zašto je komutiranje paketa efikasnije? Evo jednostavnog primera. Pretpostavimo da korisnici zajednički koriste link od 1 Mb/s i da svaki korisnik ima periode kada je aktivan i proizvodi podatke konstantnom brzinom od 100 kb/s i periode mirovanja u kojima ne proizvodi nikakve podatke. Pretpostavimo, dalje, da je svaki korisnik aktivan samo 10 procenata vremena (i da besposleno pijucka kafu tokom preostalih 90 procenata vremena). Kod komutiranja kola 100 kb/s za svakog korisnika mora

biti rezervisan jednak vremenski isečak. Ukoliko bi, primera radi, kod TDM komutiranih kola okvir od 1 sekunde bio podeljen na 10 vremenskih odsečaka od po 100 ms, svakom korisniku bi tada bio dodeljen jedan vremenski odsečak po okviru.

To znači da taj link sa komutiranjem kola istovremeno može da podržava samo 10 ($= 1 \text{ Mb/s} / 100 \text{ kb/s}$) korisnika. Kod komutiranja paketa verovatnoća da je određeni korisnik aktivan iznosi 0,1 (ili 10 procenata). Kada bi u mreži bilo 35 korisnika, verovatnoća da je njih 11 ili više njih istovremeno aktivno iznosi 0,0004. (U domaćem zadatku P8 videćete kako smo dobili ovaj rezultat.) Kada je 10 ili manje korisnika istovremeno aktivno (što se događa sa verovatnoćom od 0,9996), zbirna brzina pristizanja podataka manja je ili jednaka 1 Mb/s, što je jednak izlaznoj brzini linka. Prema tome, kada je u mreži aktivno 10 ili manje korisnika, njihovi paketi se kroz link kreću praktično bez ikakvog kašnjenja, kao i u slučaju komutiranja kola. U slučaju kada je istovremeno aktivno više od 10 korisnika, zbirna brzina pristizanja paketa prevazilazi izlazni kapacitet linka i red na izlazu počinje da raste. (On raste sve dok zbirna ulazna brzina ne padne ispod 1 Mb/s, kada red počinje da se smanjuje.) Imajući u vidu da je verovatnoća da više od 10 korisnika bude istovremeno aktivno izuzetno mala, komutiranje paketa obezbeđuje praktično jednak performanse kao i komutiranje kola, ali za više od tri puta veći broj korisnika.

Predimo sada na drugi, jednostavan primer. Pretpostavimo da imamo 10 korisnika i da jedan od njih iznenada generiše hiljadu paketa od po 1000 bitova, a da ostali korisnici miruju i ne generišu pakete. U mrežama sa TDM komutiranjem kola sa 10 vremenskih odsečaka po okviru (pri čemu svaki odsečak obuhvata 1000 bitova), aktivni korisnik za prenos podataka može da koristi samo svoj jedan vremenski odsečak u okviru, dok preostalih devet vremenskih odsečaka u svakom okviru ostaje neiskorišćeno. Proći će 10 sekundi pre nego što se prenese svih milion bitova podataka aktivnog korisnika. U slučaju komutiranja paketa, aktivni korisnik može bez prekida da šalje svoje podatke kroz link, koristeći njegovu punu brzinu od 1 Mb/s, s obzirom na to da nijedan drugi korisnik ne šalje pakete koje bi trebalo multipleksirati sa paketima aktivnog korisnika. U ovom slučaju svi podaci aktivnog korisnika biće preneti za jednu sekundu.

Prethodni primjeri prikazuju dva slučaja u kojima performanse komutiranja paketa mogu da budu superiornije u odnosu na performanse komutiranja kola. Takođe, ovi primjeri ukazuju i na najznačajniju razliku između ova dva načina deljenja brzine prenosa linka između višestrukih tokova podataka. U slučaju sa komutiranjem kola, korišćenje prenosnog linka se unapred raspodeljuje, bez obzira na zahteve, pri čemu je raspoređeni deo vremena linka neiskorišćen ukoliko nema podataka za slanje. Nasuprot tome, u slučaju sa komutiranjem paketa, link se koristi *na zahtev*. Prenosni kapacitet nekog linka deli se između paketa samo onih korisnika koji imaju pakete koje bi trebalo preneti preko tog linka.

Mada se u današnjim telekomunikacionim mrežama podjednako koriste komutiranje kolai komutiranje paketa, teži se tome da se sve više koristi komutiranje paketa. Mnoge telefonske mreže sa komutiranjem kola lagano prelaze na komutiranje paketa. Naročito, telefonske mreže koriste komutiranje paketa za delove poziva koji se prenose preko skupih prekoceanskih linkova.

1.3.3 Mreža svih mreža

Rečeno je da se krajnji sistemi (PC računari, pametni telefoni, veb serveri, serveri za elektronsku poštu itd.) povezuju na internet preko pristupnog posrednika za internet usluge. Pristupni posrednik za internet usluge može da omogući ožičenu ili bežičnu povezanost, korišćenjem niza prisupnih tehnologija kao što su: DSL, kablovski sistem, FTTH, WiFi i mobilna mreža. Setite se da pristupni posrednik za internet usluge ne mora da bude telekomunikaciona ili kablovskva kompanija, to može da bude i univerzitet (koji pruža pristup internetu studentima, zaposlenima i nastavnom osoblju), ili kompanija (koja obezbeđuje pristup za svoje zaposlene). Međutim, povezivanje krajnjih korisnika i onih koji nude razne sadržaje za mrežu pristupnog posrednika za internet usluge, samo je mali deo za rešavanje zagonetke povezivanja milijardi krajnjih sistema koji čine internet. Da bismo rešili ovu zagonetku, pristupni posrednici za internet usluge moraju da budu međusobno povezani. Ovo se postiže kreiranjem *mreže svih mrežâ* – razumevanje ove fraze je ključ za razumevanje interneta.

Mreža svih mreža koja čini internet se tokom godina razvila u veoma složenu strukturu. Na ovaj razvoj su u mnogome uticali ekonomija i nacionalna politika, a mnogo manje karakteristike mreže. Da bismo bolje razumeli današnju strukturu internet mreže, postepeno ćemo graditi serije mrežnih struktura, od kojih je svaka nova struktura bolja aproksimacija složenog interneta kakav je danas. Setite se da je najopštiji cilj međusobno povezivanje pristupnih posrednika za internet usluge, tako da sví krajnji sistemi međusobno mogu slati pakete. Jedan jednostavan pristup bio bi da se svaki pristupni posrednik za internet usluge *direktno* povezuje sa svim ostalim pristupnim posrednicima za internet usluge. Ovako umrežen dizajn bi bio veoma skup za pristupne posrednike za internet usluge, jer bi u tom slučaju bilo potrebno da svaki pristupni posrednik za internet usluge ima zaseban komunikacioni link sa svakom od stotine hiljada drugih pristupnih posrednika za internet usluge širom sveta.

Naša prva mrežna struktura, *Mrežna Struktura 1*, povezuje sve pristupne posrednike za internet usluge pomoću *jednog globalnog tranzitnog posrednika za internet usluge* (ISP – posrednik za internet usluge). Naš (zamišljeni) globalni tranzitni ISP prestavlja mrežu rutera i komunikacionih linkova koji se ne protežu samo duž zemaljske kugle, već imaju barem jedan ruter u blizini svakog od stotinu hiljada pristupnih posrednika za internet usluge. Naravno, izgradnja ovako rasprostranjene mreže bila bi veoma skupa za globalnog posrednika za internet usluge. Da bi bio profitabilan, ovaj posrednik mora da naplaćuje uslugu povezivanja svakom pristupnom posredniku za internet usluge, pri čemu cena zavisi (ali ne direktno proporcionalno) od količine saobraćaja koji je pristupni ISP razmenio sa globalnim ISP-om. Pošto pristupni ISP plaća globalnom tranzitnom posredniku za internet usluge, pristupni ISP bi u ovom slučaju bio **korisnik**, a globalni tranzitni ISP **posrednik**.

Ukoliko neka kompanija izgradi i koristi globalni tranzitni ISP koji je profitabilan, prirodno je da će i druge kompanije poželeti da izgrade sopstvene globalne tranzitne posrednike za internet usluge i da se takmiče sa originalnim globalnim tranzitnim ISP-om. Ovo vodi do *Mrežne Strukture 2*, koja se sastoji iz stotinu hiljada pristupnih ISP-ova i više globalnih tranzitnih posrednika za internet usluge. Pristupnim posrednicima za internet usluge više odgovara *Mrežna Struktura 2* od *Mrežne Strukture 1*, jer oni sada

mogu da biraju između konkurenčnih globalnih tranzitnih posrednika u zavisnosti od njihove cene i usluge. Primetite, međutim, da globalni tranzitni posrednici za internet usluge moraju da budu međusobno povezani: u suprotnom, pristupni posrednici za internet usluge koji su povezani sa jednim globalnim tranzitnim posrednikom neće moći da komuniciraju sa pristupnim posrednicima za internet usluge koji su povezani sa drugim tranzitnim posrednikom.

Mrežna Struktura 2, koju smo upravo opisali, predstavlja hijerarhiju sa dva nivoa, pri čemu se globalni tranzitni posrednici nalaze na gornjem, a pristupni posrednici za internet usluge na nižem nivou. Ovo pretpostavlja da je mogućnost povezivanja globalnih tranzitnih posrednika za internet usluge između sebe i sa svakim pristupnim ISP-om, i ekonomski poželjna. Iako u stvarnosti neki posrednici za internet usluge imaju impresivnu globalnu pokrivenost i direktno se povezuju sa mnogim pristupnim posrednicima za internet usluge, nijedan ISP ne može da bude prisutan baš u svakoj zemlji i u svakom gradu na svetu. Umesto toga, u svakom datom regionu, može postojati **regionalni ISP** sa kojim se pristupni posrednici za internet usluge u tom regionu povezuju. Svaki regionalni ISP se tada povezuje sa **posrednikom za internet usluge prvog reda**. Posrednici prvog reda su slični našem (zamišljenom) globalnom tranzitnom posredniku za internet usluge, ali oni stvarno postoje, samo što nisu prisutni u svakom gradu na svetu. Otprilike postoji desetina posrednika prvog reda, uključujući i kompanije kao što su *Level 3 Communications, AT&T, Sprint i NTT*. Zanimljivo je da ne postoji zvanično udruženje posrednika prvog reda; u skladu sa stavom – ukoliko se pitate da li ste član grupe, onda to verovatno niste.

Vratimo se ovoj mreži svih mreža. Ne samo da postoji više konkurenčnih posrednika za internet usluge prvog reda, već u regionu može biti i više konkurenčnih regionalnih posrednika za internet usluge. U takvoj hijerarhiji, svaki pristupni ISP plaća regionalnom ISP sa kojim se povezuje, a svaki regionalni ISP plaća posredniku za internet usluge prvog reda sa kojim se povezuje. (Jedan pristupni ISP može takođe direktno da se poveže sa posrednikom prvog reda, pri čemu plaća ovom posredniku). Prema tome, na svakom nivou hijerarhije postoji odnos korisnik-posrednik. Primećujete da posrednici prvog reda ne plaćaju nikome, jer se nalaze na vrhu hijerahije. Da bismo stvari još više zakomplikovali, u nekim regionima, može postojati jedan veći regionalni ISP (verovatno obuhvata celu državu) sa kojim se povezuje više manjih regionalnih posrednika za internet usluge u tom regionu; veći regionalni ISP se tada povezuje sa posrednikom prvog reda. U Kini, na primer, ovi pristupni posrednici za internet usluge postoje u svakom gradu i povezuju se sa posrednikom za internet usluge te provincije, koji se dalje povezuje s nacionalnim posrednicima za internet usluge i oni se konačno povezuju sa posrednicima prvog reda [Tian 2012]. Ovu hijerahiju sa više nivoa koja i dalje predstavlja grubu aproksimaciju današnjeg interneta nazvaćemo *Mrežna Struktura 3*.

Da bi se izgradila mreža koja više podseća na današnji internet, moramo u hijerarhijsku *Mrežnu strukturu 3* dodati pristupne tačke (engl. *points of presence* – PoP), višedomnu mrežu, uparivanje ravnopravnih (engl. *peering*) i internet tačke razmene (engl. *Internet exchange points* – IXP). Pristupne tačke postoje na svim hijerarhijskim nivoima, osim na najnižem nivou (pristupni ISP). **PoP** je grupa od jednog ili više rutera (na istoj lokaciji) u mreži posrednika preko koje posrednici za internet usluge koji su

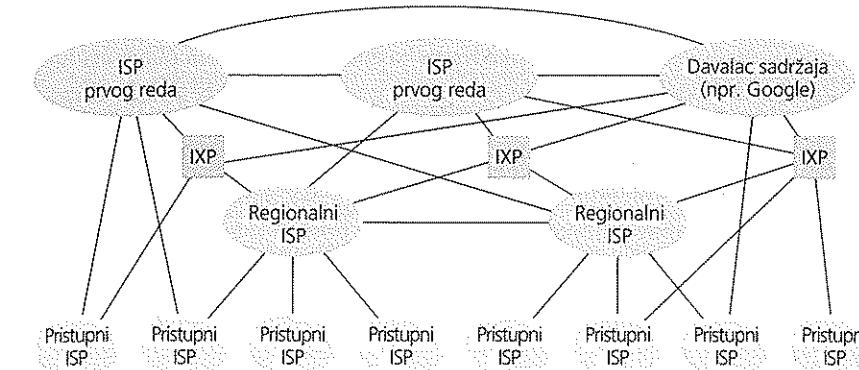
korisnici mogu da se povežu sa ISP-om u ulozi posrednika. Da bi se korisnička mreža povezala sa pristupnom tačkom posrednika, korisnik može da iznajmi link velike brzine od treće strane, tj. telekomunikacionog posrednika i da se direktno poveže jedan od svojih rutera sa ruterom pristupne tačke. Svaki ISP (osim posrednik prvog reda) može da bude višedomni, što označava povezivanje sa dva ili više ISP-a u ulozi posrednika. Na primer, pristupni ISP može da izabere višedomno povezivanje sa dva regionalna ISP-a, a može da se poveže višedomno i sa dva regionalna posrednika za internet usluge, kao i sa posrednikom prvog reda. Slično, regionalni ISP može da se poveže višedomno sa više posrednika za internet usluge prvog reda. Kada se ISP povezuje višedomno, on i dalje šalje i prima pakete na internet, čak i ako jedan od njegovih posrednika otkaze.

Kao što smo upravo naučili, posrednik za internet usluge u ulozi korisnika plaća svom ISP posredniku da obezbedi globalnu internet povezanost. Suma koju ISP korisnik plaća ISP posredniku odražava količinu saobraćaja koju razmeni sa posrednikom. Da bi se ovi troškovi smanjili, dva susedna posrednika za internet usluge istog hijerarhijskog nivoa mogu da se **upare** (engl. peer), što znači, da mogu direktno da povežu svoje mreže tako da se celokupan saobraćaj između njih prosleduje putem direktne veze, umesto preko posrednika višeg nivoa. Dva posrednika se obično upare bez naknade, odnosno nijedan ISP ne plaća ovom drugom. Kao što smo ranije napomenuli, posrednici prvog reda se takođe povezuju uparivanjem, bez plaćanja naknade. Ako želite da vidite zanimljivo izlaganje o uparivanju ravnopravnih i odnosima korisnik-posrednik pogledajte [Van der berg 2008]. Pored toga, kompanija koja predstavlja treću stranu može da kreira **internet tačku razmene** (IXP – engl. Internet Exchange Point), najčešćeu nezavisnoj zgradi sa sopstvenim komutatorima, koja predstavlja tačku susreta u kojoj više posrednika može da se upari. Danas na internetu postoji okvirno oko 300 IXP-a [Augustin 2009]. Ovo okruženje koje se sastoji od pristupnih posrednika, regionalnih posrednika, posrednika prvog reda, pristupnih tačaka, više domnih mreža, uparivanja i IXP tačaka posmatramo kao *Mrežnu Strukturu 4*.

Konačno smo došli do *Mrežne Strukture 5*, koja opisuje internet iz 2012. godine. *Mrežna struktura 5* opisana na slici 1.15 dobija se od *Mrežne Strukture 4* dodavanjem **mreža davalaca sadržaja** (engl. content provider networks). Google je trenutno jedan od najvećih primera za ovakvu mrežu davalaca sadržaja. Tokom pisanja ove knjige, Google je imao oko 30 do 50 centara podataka koji su raspoređeni širom Severne Amerike, Evrope, Azije, Južne Amerike i Australije. Neki od ovih centara podataka sadrže preko sto hiljada servera, dok su ostali centri podataka manji i u njima se nalazi samo po stotinu servera. Svi Google-ovi centri podataka su međusobno povezani putem Google-ove privatne TCP/IP mreže, koja se prostire duž cele zemaljske kugle, ali je ipak odvojena od javnog interneta.

Ono što je važno, Google-ova privatna mreža samo prenosi saobraćaj do/od Google-ovih servera. Kao što je prikazano na slici 1.15 Google-ova privatna mreža pokušava da „premosti“ gornje nivoe interneta uparivanjem (bez naknade) sa posrednicima nižeg reda, bilo direktnim povezivanjem sa njima, ili povezivanjem sa njima u internet tačkama razmene [Labovitz 2010]. Međutim, s obzirom da se do mnogih pristupnih posrednika za internet usluge i dalje može doći samo prolaskom kroz mreže prvog reda, Google mreža se takođe povezuje sa posrednicima za internet usluge prvog nivoa i plaća tim posrednicima za saobraćaj koji razmenjuje sa njima. Kreiranjem sopstvene mreže, davalac sadržaja,

ne samo da smanjuje plaćanja posrednicima višeg reda, već pored toga ima veću kontrolu nad načinom na koji se njegove usluge u krajnjoj liniji isporučuju krajnjim korisnicima. Google-ova mrežna infrastruktura je detaljnije opisana u odeliku 7.2.4.



Slika 1.15 ◆ Međusobna povezanost posrednika za internet usluge:

Ukratko, današnji internet – mreža svih mreža – je složen i sastoji se od oko desetaka posrednika prvog reda i stotina hiljada posrednika nižeg reda. Ovi posrednici se između sebe razlikuju prema veličini oblasti koju pokrivaju, pri čemu se neki prostiru na više kontinenata i okeana, dok su drugi ograničeni na male geografske regije. Posrednici nižeg reda povezani su sa posrednicima višeg reda, pri čemu su ti posrednici višeg reda međusobno povezani. Korisnici i davaoci sadržaja su korisnici posrednika nižeg reda, a posrednici nižeg reda su korisnici posrednika višeg reda. Poslednjih godina većina davalaca sadržaja je takođe kreirala sopstvene mreže i gde god je bilo moguće direktno se povezala sa posrednicima nižeg reda.

1.4 Kašnjenje, gubici i propusna moć u mrežama sa komutiranjem paketa

Sećate se da smo u odeliku 1.1 rekli da se internet može posmatrati i kao infrastruktura koja pruža usluge distribuiranim aplikacijama koje se izvršavaju na krajnjim sistemima. U idealnom slučaju, voleli bismo da internet između dva krajnja sistema može da prenese onoliko podataka koliko trenutno želimo bez ikakvih gubitaka podataka. Avaj, to je uzvišen cilj, jedan od onih koji su nedostizni u stvarnosti. I zaista, računarske mreže su ograničene propusnom moći (količinom podataka po sekundi koju mogu da prenesu) između krajnjih sistema, unose kašnjenje između krajnjih sistema, a mogu i da izgube pakete podataka. S jedne strane, nesreća je što realni fizički zakoni dovode do kašnjenja i gubitka podataka, kao i ograničene propusne moći. S druge strane, s obzirom da računarske mreže imaju te probleme, to implicira mnogo zadivljujućih izazova za pronađenje rešenja tih problema – više nego dovoljno izazova da se tome posveti čitav kurs o umrežavanju računara i da se dâ podsticaj za hiljadu doktorskih disertacija! U ovom odeliku, ispitujemo i određujemo kašnjenje, gubitke i propusnu moć u računarskim mrežama.

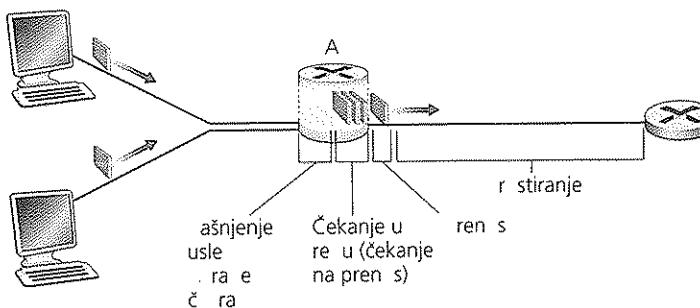
1.4.1 Uvid u kašnjenje u mrežama sa komutiranjem paketa

Sećate se da paket nastaje u (izvornom) računaru, prolazi kroz čitav niz ruteru i da svoje putovanje završava u drugom (odredišnom) računaru.

Putujući od jednog čvora (računar ili ruter) do susednog čvora (računar ili ruter) na putanji, paket može da zadesi nekoliko vrsta kašnjenja na *svakom* čvoru na njegovoj putanji. Među ovim kašnjenjima najznačajnija su: **kašnjenje usled obrade čvora;**, **kašnjenje usled čekanja u redu;** **kašnjenje usled prenosa** i **kašnjenje usled prostiranja**. Sabiranjem svih ovih kašnjenja dobija se **ukupno kašnjenje čvora**. Karakteristike mnogih internet aplikacija, kao što su: pretraga, pretraživanje veba, elektronska pošta, mape, trenutno razmenjivanje poruka i razgovor pomoću IP, u mnogome zavise od kašnjenja mreža. Da biste bolje razumeli komutiranje paketa i računarske mreže, morate da shvatite prirodu i značaj pomenutih kašnjenja.

Vrste kašnjenja

Razmotrimo pomenuta kašnjenja pomoću slike 1.16. U delu svoje putanje od jednog do drugog kraja između izvora i odredišta, paket se iz uzvodnog čvora kroz ruter A šalje do ruteru B. Cilj nam je da ustanovimo kašnjenje čvora ruteru A. Ruter A ima izlazni link koji vodi ka ruteru B. Tom linku prethodi red za čekanje (takođe poznat i kao privremena memorija, bafer). Kada paket iz uzvodnog čvora stigne do ruteru A, ruter A ispituje zaglavje paketa kako bi ustanovio odgovarajući izlazni link za taj paket i zatim ga usmerava prema tom linku. U ovom primeru to je link koji vodi ka ruteru B. Prenos paketa linkom moguć je samo ako se tim linkom trenutno ne prenosi nijedan drugi paket i ako u redu za čekanje nema drugih paketa; ukoliko je link trenutno zauzet, ili ukoliko postoje paketi koji već čekaju u redu za taj link, novoprstigli paket se pridodaje redu za čekanje.



Slika 1.16 ♦ Kašnjenje čvora ruteru A:

Kašnjenje usled obrade

Vreme koje je potrebno za ispitivanje zaglavja paketa i određivanje gde bi ga trebalo usmeriti, predstavlja deo **kašnjenja usled obrade**. **Kašnjenje usled obrade** obuhvata i druge činioce, kao što je vreme potrebno za proveru grešaka na nivou bitova u paketima, do kojih dolazi prilikom prenosa od uzvodnog čvora do ruteru A. **Kašnjenja**

usled obrade u veoma brzim ruterima su obično reda veličine mikrosekunde ili manje. Nakon ove obrade čvora, ruter usmerava paket u red za čekanje koji prethodi linku ka ruteru B. (U poglavljiju 4, podrobnije ćemo proučiti način rada ruteru.)

Kašnjenje usled čekanja u redu

U redu za čekanje paket mora da sačeka da bude poslat na link i zato nastaje **kašnjenje usled čekanja u redu**. Dužina ovog kašnjenja zavisi od broja paketa koji su pristigli pre određenog paketa koji stoe u redu, čekajući na prenos duž određenog linka. Ukoliko je red za čekanje prazan i nijedan drugi paket se trenutno ne prenosi, kašnjenje usled čekanja u redu našeg paketa jednak je nuli. S druge strane, ukoliko je saobraćaj velikog inteziteta i mnogo drugih paketa takođe čeka na prenos, kašnjenje usled čekanja u redu biće duže. Uskoro ćemo videti da broj paketa koje novoprstigli paket može očekivati da zatekne u redu zavisi od inteziteta i prirode saobraćaja koji pristiže u red za čekanje. U praksi, ovo kašnjenje reda je veličine od nekoliko mikrosekundi do nekoliko milisekundi.

Kašnjenje usled prenosa

Pretpostavljajući da se paketi prenose tako što onaj koji pristigne biva prvi i uslužen, što je uobičajeno u mrežama sa komutiranjem paketa, naš paket može da bude prenet tek pošto svi paketi koji su stigli pre njega budu preneti. Označimo dužinu paketa u bitovima sa L , a brzinu prenosa linka od ruteru A do ruteru B sa R bitova u sekundi. Na primer, za Eternet link od 10 Mb/s brzina je $R = 10$ Mb/s; za Eternet link od 100 Mb/s brzina je $R = 100$ Mb/s. **Kašnjenje usled prenosa** jednako je L/R . To je vreme koje je potrebno da se svi bitovi određenog paketa propuste (tj. prenesu) na link. U praksi je ovo kašnjenje reda veličine od nekoliko mikrosekundi do nekoliko milisekundi.

Kašnjenje usled prostiranja

Pošto se neki bit prenese na link, neophodno je da stigne do ruteru B. Vreme potrebno za prelazak jednog bita od početka linka do ruteru B naziva se **kašnjenje usled prostiranja**. Bitovi putuju brzinom prostiranja linka koja zavisi od fizičkog medijuma linka (tj. optičkih kablova, kablova sa upredenim bakarnim paricama itd.) i kreće se u opsegu od:

$$2 \cdot 10^8 \text{ metara u sekundi} \text{ do } 3 \cdot 10^8 \text{ metara u sekundi}$$

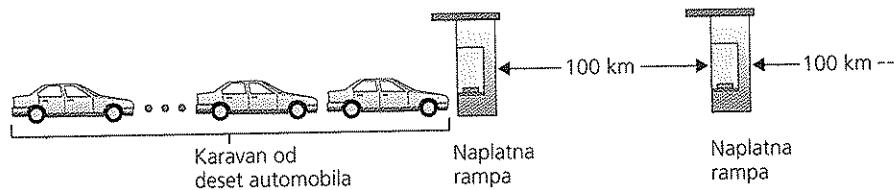
što je jednako, ili nešto manje od, brzine svetlosti. **Kašnjenje usled prostiranja** izračunava se tako što se rastojanje između dva ruteru podeli sa brzinom prostiranja. Drugim rečima, kašnjenje usled prostiranja je d/s , pri čemu je d rastojanje ruteru A i B, a s je brzina prostiranja linka. Pošto poslednji bit paketa stigne do čvora B, on i svi ostali prethodno pristigli bitovi određenog paketa se uskladiše u ruteru B. Zatim

se ceo postupak ponavlja u ruteru B, koji sada prenosi paket. U regionalnim računarskim mrežama **kašnjenje usled prostiranja** je reda veličine od nekoliko milisekundi.

Poređenje kašnjenja usled prenosa i kašnjenja usled prostiranja

Novajlige u oblasti umrežavanja ponekad ne uviđaju razliku između kašnjenja usled prenosa i kašnjenja usled prostiranja. Ova razlika je teško uočljiva, ali veoma značajna. Kašnjenje usled prenosa predstavlja vreme koje je ruteru potrebno da prenese paket; ono zavisi od dužine paketa i brzine prenosa linka, ali ne zavisi od rastojanja između dva rutera. Kašnjenje usled prostiranja, s druge strane, predstavlja vreme potrebno za prenošenje bita od jednog do drugog ruteru; ono zavisi od rastojanja između dva rutera, ali ne zavisi od dužine paketa ili brzine prenosa linka.

Analogija može da pomogne u razlikovanju kašnjenja usled prenosa i kašnjenja usled prostiranja. Zamislite autoput koji na svakih 100 kilometara ima naplatnu rampu, kao što je prikazano na slici 1.17. Delove autoputa između naplatnih rampi možete da poistovetite sa linkovima, a naplatne rampe sa ruterima. Pretpostavimo da automobili putuju (odnosno prostiru se) ovim autoputem brzinom od 100 km/h (to jest, da čim napuste naplatnu rampu, trenutno dostignu brzinu od 100 km/h i održavaju tu brzinu između naplatnih rampi). Pretpostavimo dalje da 10 vozila putuje zajedno kao karavan, pri čemu sva vozila idu jedno iza drugog, ne menjajući redosled. Pojedinačne automobile možete poistoveti sa bitovima, a ceo karavan sa paketom. Takođe, pretpostavimo da je naplatnim rampama potrebno 12 sekundi da opsluže (odnosno prenesu) jedan automobil, a pošto je duboka noć, ovi automobili su jedini na autoputu. Konačno, pretpostavimo i to da automobil koji prvi stigne do naplatne rampe, mora na ulazu sačekati dolazak svih 9 preostalih automobila. (Drugim rečima, čitav karavan najpre mora da se okupi na naplatnoj rampi pa da produži daleje.) Vreme potrebno da naplatna rampa propusti čitav karavan na autoput iznosi: $(10 \text{ automobila}) / (5 \text{ automobila/min}) = 2 \text{ minuta}$. Ovo vreme odgovara kašnjenju usled prenosa na ruterima. Za prelazak puta između dve naplatne rampe automobilima je potrebno: $100 \text{ km} / (100 \text{ km/h}) = 1 \text{ sat}$. Ovo vreme odgovara kašnjenju usled prostiranja. Prema tome, vreme od trenutka kada se karavan okupi ispred naplatne rampe do trenutka kada se okupi ispred sledeće naplatne rampe predstavlja zbir kašnjenja usled prenosa i kašnjenja usled prostiranja – u ovom primeru to je 62 minuta.



Slika 1.17 ◆ Analogija sa karavanom automobila:

Zadržimo se još malo na ovom poređenju. Šta bi se dogodilo kada bi opsluživanje karavana na naplatnoj rampi trajalo duže od putovanja automobila između dve

rampe? Na primer, pretpostavimo da se automobili kreću brzinom od 1000 km/h, a da naplatna rampa opslužuje jedan automobil u minuti. Putovanje automobila trajalo bi 6 minuta, a opsluživanje čitavog karavana 10 minuta. U tom slučaju nekoliko prvih automobila stiglo bi do druge naplatne rampe pre nego što poslednji automobil iz karavana napusti prvu rampu. Ovo se dešava u mrežama sa komutiranjem paketa – prvi bitovi nekog paketa mogu da stignu do drugog ruteru dok većina preostalih bitova iz tog paketa još uvek čeka na prenos u prethodnom ruteru.

Ako slika vredi hiljadu reči, onda animacija mora da vredi milion reči. Veb stranica pridružena ovoj knjizi nudi interaktivni Java aplet koji sjajno ilustruje i poredi kašnjenje usled prenosa i kašnjenje usled prostiranja. Najtoplijie preporučujemo da pogledate ovaj aplet [Smith 2009] koji takođe pruža veoma zanimljivo izlaganje o kašnjenjima usled postiranja, čekanja u redu i usled prenosa.

Ukoliko sa: d_{obrada} , d_{red} , d_{prenos} , d_{pros} označimo kašnjenja usled obrade, čekanja u redu, prenosa i prostiranja, onda se ukupno kašnjenje čvora izračunava na sledeći način:

$$d_{\text{čvor}} = d_{\text{obrada}} + d_{\text{red}} + d_{\text{prenos}} + d_{\text{pros}}$$

Učešće svakog sabirka u ukupnom kašnjenju na čvoru prilično je neujednačeno. Na primer, sabirak d_{pros} može da bude zanemarljiv (na primer, nekoliko mikrosekundi) za link koji povezuje dva rutera u okviru univerzitetskog kampusa; međutim, ovo kašnjenje može da iznosi stotine milisekundi za dva rutera koji su povezani geostacionarnim satelitskim linkom i može da bude najvažniji sabirak u ukupnom zbiru $d_{\text{čvor}}$. Slično tome, i sabirak d_{prenos} može da bude sasvim zanemarljiv, ali i značajno veliki. Njegovo učešće obično je beznačajno pri brzinama prenosa od 10 Mb/s i većim (na primer, u lokalnim računarskim mrežama); međutim, za velike internet pakete koji se šalju sporim telefonskim modemskim linkovima može da bude i nekoliko stotina milisekundi. Kašnjenje usled obrade, d_{obrada} , obično je zanemarljivo; međutim, značajno utiče na maksimalnu propusnu moć rutera, odnosno maksimalnu brzinu kojom ruter može da prenosi pakete.

1.4.2 Kašnjenje usled čekanja u redu i gubici paketa

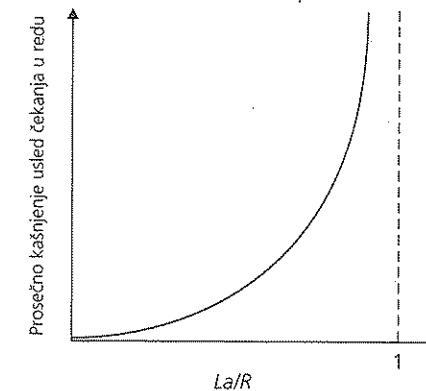
Najsloženija i najzanimljivija komponenta ukupnog kašnjenja na čvoru jeste kašnjenje usled čekanja u redu, d_{red} . U stvari, ovo kašnjenje toliko je važno i zanimljivo za umrežavanje računara da su o njemu napisane hiljade članaka i brojne knjige [Bertsekas 1991; Daigle 1991; Kleinrock 1975, 1976; Ross 1995]. U ovoj knjizi dajemo samo najopštije, zdravorazumno razmatranje kašnjenja usled čekanja u redu; radoznaliji čitaoci mogu da prelistaju neku od navedenih knjiga (ili čak napišu i doktorsku disertaciju na ovu temu!). Nasuprot ostala tri kašnjenja (tačnije, d_{obrada} , d_{prenos} i d_{pros}), kašnjenje usled čekanja u redu se menja od paketa do paketa. Na primer, ako 10 paketa istovremeno stigne u prazan red, prvi preneti paket neće imati kašnjenje, dok će poslednji preneti paket imati relativno veliko kašnjenje (pošto on čeka prenošenje prethodnih devet paketa). Prema tome, kada se govori o kašnjenju usled čekanja u redu, obično se koriste statistički pokazatelji, kao što su srednja

vrednost ovog kašnjenja, varijansa i verovatnoća da kašnjenje usled čekanja u redu premašuje neku naznačenu vrednost.

Kada je kašnjenje usled čekanja u redu značajno, a kada zanemarljivo? Odgovor na ovo pitanje zavisi od intenziteta saobraćaja koji stiže u red za čekanje, brzine prenosa linka i prirode pristiglog saobraćaja, to jest, da li je ravnomeran, ili je u nalen-tima. Da bismo bolje razumeli o čemu se radi, sa a ćemo označiti prosečnu brzinu kojom paketi stižu u red za čekanje (meri se brojem paketa u sekundi). Kao i ranije, R je brzina prenosa, odnosno brzina (u bitovima u sekundi) kojom se bitovi prenose iz reda za čekanje. Takođe, zbog jednostavnosti, pretpostavićemo da se svi paketi sastoje od L bitova. U tom slučaju, prosečna brzina kojom bitovi stižu u red iznosi La bitova u sekundi. Konačno, pretpostavićemo i to da je red za čekanje veoma dugačak, tako da u njemu može da se nalazi beskonačan broj paketa. Odnos La/R , koji se naziva i **intenzitet saobraćaja**, često igra veoma važnu ulogu u proceni kašnjenja usled čekanja u redu. Ukoliko je $La/R > 1$, onda prosečna brzina kojom bitovi dospevaju u red za čekanje premašuje brzinu kojom oni mogu da se prenesu iz tog reda. U takvim, nepoželjnim okolnostima, red za čekanje bi se bezgranično produžavao, a kašnjenje usled čekanja u redu približilo bi se beskonačnosti! Dakle, jedno od zlatnih pravila pri projektovanju saobraćaja u mreži glasi: *planirajte svoj sistem tako da intenzitet saobraćaja nikada ne bude veći od 1.*

Sada razmotrimo slučaj u kome je $La/R \leq 1$. U ovom slučaju, na kašnjenje usled čekanja u redu utiče priroda pristižućeg saobraćaja. Na primer, ukoliko paketi stižu ravnomerno – odnosno, jedan na svakih L/R sekundi – svaki paket će zateći prazan red za čekanje i nikakvog čekanja neće biti. Sa druge strane, ukoliko paketi stižu u povremenim naletima, prosečno kašnjenje usled čekanja u redu može biti značajno. Pretpostavimo, na primer, da N paketa stiže istovremeno svakih (L/R) N sekundi. Tada se prvi paket prenosi bez kašnjenja, drugi sa kašnjanjem od L/R sekundi, a n -ti paket sa kašnjanjem od $(n - 1)L/R$ sekundi. Ostavićemo vam da u okviru vežbanja izračunate prosečno kašnjenje usled čekanja u redu za ovaj primer.

Ova dva opisana primera o povremenom pristizanju paketa su pomalo akadem-ski. Obično, paketi u red stižu *slučajno*, bez ikakvog pravila i u vremenskim razmacima koji su slučajnog trajanja. U ovakovom, mnogo realnijem slučaju, vrednost La/R obično nije dovoljna da bi se u potpunosti statistički opisalo kašnjenje usled čekanja u redu. Ipak, ova vrednost može da bude korisna da bi se stekao osećaj o značaju kašnjenja usled čekanja u redu. Tačnije, ako je intenzitet saobraćaja blizak nuli, to znači da paketi stižu retko i sa dugim pauzama između njih i da je mala verovatnoća da će pristigli paket u redu za čekanje zateći neki drugi paket. Zbog toga će prosečno kašnjenje usled čekanja u redu biti blisko nuli. Nasuprot tome, kada je intenzitet saobraćaja blizak 1, u pojedinim trenucima će brzina kojom paketi pristižu prevazići mogućnost prenosa (zbog promenljive brzine kojom paketi pristižu) i tokom tih vremenskih perioda će se napraviti red za čekanje; kada je brzina pristizanja manja od kapaciteta prenosa, dužina reda za čekanje će se smanjivati. Slično tome, kada se intenzitet saobraćaja približava 1, prosečna dužina reda postaje sve veća. Na slici 1.18 prikazana je kvalitativna zavisnost prosečnog kašnjenja usled čekanja u redu u odnosu na intenzitet saobraćaja.



Slika 1.18 ♦ Zavisnost prosečnog kašnjenja usled čekanja u redu u odnosu na intenzitet saobraćaja:

Ono što je veoma važno uočiti na slici 1.18 je činjenica da približavanje intenziteta saobraćaja vrednosti 1, prouzrokuje da prosečno kašnjenje usled čekanja u redu veoma brzo raste. U ovom slučaju, malo povećanje intenziteta saobraćaja dovodi do nesrazmerno mnogo većeg porasta kašnjenja. Verovatno imate iskustva sa ovakvom pojmom na autoputu. Ukoliko vozite putem koji je uobičajno zagušen. Činjenica da je put uobičajno zagušen znači da je intenzitet saobraćaja blizu 1. Ukoliko neki događaj prouzrokuje makar i neznatno povećanje saobraćaja, kašnjenja koja iz toga proističu mogu biti ogromna.

Da biste stekli pravi osećaj o značaju kašnjenja usled čekanja u redu, ponovo vas ohrabrujemo da posetite veb stranicu posvećenu ovoj knjizi na kojoj se nalazi interaktivni Java aplet za čekanje u redu. Ukoliko postavite dovoljno veliku brzinu pristizanja paketa, tako da intenzitet saobraćaja premaši vrednost 1, videćete kako red za čekanje polako raste tokom vremena.

Gubici paketa

U prethodnom razmatranju pretpostavili smo da se u redu za čekanje može naći beskonačno mnogo paketa. U stvarnosti red za čekanje koji prethodi nekom linku ima ograničen kapacitet, pri čemu taj kapacitet značajno zavisi od izrade i cene rutera. Pošto je kapacitet reda za čekanje konačan, kašnjenje paketa se u stvari nikad ne približava beskonačnosti, iako se intenzitet saobraćaja približava vrednosti 1. Umesto toga, pristigli paket može zateći popunjeno red za čekanje. Ukoliko nema mesta da se takav paket uskladišti, ruter **odbacuje** taj paket; drugim rečima, paket se **gubi**. Ovo prepunjavanje reda za čekanje može da se vidi u malopre pomenutom Java apletu kada je intenzitet saobraćaja veći od 1.

Sa stanovišta krajnjeg sistema, gubitak paketa izgleda kao da je paket poslat u jezgro mreže, ali se nikad nije pojavio na svom odredištu. Udeo izgubljenih paketa povećava se sa povećanjem intenziteta saobraćaja. Prema tome, performanse određenog čvora mere se, ne samo kašnjenjem, već i verovatnoćom gubitka paketa. Kao što ćete videti u narednim poglavljima, izgubljeni paket može da se ponovo prenese

sa jednog kraja na drugi kraj, da bi se obezbedilo da svi podaci budu preneti od izvora do odredišta.

1.4.3 Kašnjenje od jednog do drugog kraja

Sve do sada govorili smo samo o kašnjenju na nivou čvora, odnosno na jednom ruteru. Sada ćemo našu priču usmeriti na ukupno kašnjenje od izvora do odredišta. Da biste bolje razumeli o čemu se tu radi, prepostavitićemo da između izvornog i odredišnog računara postoji $N-1$ ruter. Takođe, prepostavitićemo na trenutak da u mreži nema zagušenja (tako da su kašnjenja usled čekanja u redu zanemarljiva), da je kašnjenje usled obrade na svakom ruteru i na izvornom računaru jednakoj d_{obrada} , da brzina kojom svi ruteri i izvorni računar prenose informacije iznosi R bitova u sekundi i da je kašnjenje usled prostiranja na svakom linku d_{pros} . Kašnjenja na nivou čvora se sabiraju i daju ukupno kašnjenje od jednog do drugog kraja,

$$d_{\text{kraj-kraj}} = N(d_{\text{obrada}} + d_{\text{prenos}} + d_{\text{pros}}) \quad (1.2)$$

gde je, i u ovom slučaju $d_{\text{prenos}} = L/R$, pri čemu je L veličina paketa. Primećujete da je jednačina 1.2 generalizacija jednačine 1.1, koja nije uzimala u obzir obradu i kašnjenje usled prostiranja. Ostavljamo vam da generalizujete jednačinu 1.2 za slučaj različitih kašnjenja svakog čvora i uzimajući u obzir i prosečno kašnjenje usled čekanja u redu na svakom čvoru.

Program Traceroute

Vi e nap mera: rišenje pr grama ra er ute a tkri anje putanje kr mrežu i merenja kašnjenja kr mrežu



Za sticanje boljeg osećaja o kašnjenju od jednog do drugog kraja u računarskoj mreži, možemo iskoristiti program *Traceroute*. To je jednostavan program koji se može pokrenuti na bilo kom računaru povezanom na internet. Kada korisnik navede ime odredišnog računara, program na izvornom računaru ka njemu šalje više posebno pripremljenih paketa. Putujući ka svom odredištu, ovi paketi prolaze kroz čitav niz ruta. Kada određeni ruter primi neki od ovih posebnih paketa, on odmah šalje kratku poruku izvornom računaru u kojoj su navedeni njegov naziv i adresa.

Tačnije, prepostavimo da između izvornog i odredišnog računara postoji $N-1$ ruter. Izvorni računar u mrežu šalje N posebnih paketa od kojih je svaki adresiran na konačno odredište. Ovi paketi obeleženi su brojevima od 1 do N , pri čemu prvi paket nosi broj 1, a poslednji N . Kada n -ti ruter primi n -ti paket označen sa n , taj ruter ne prosleđuje taj paket ka njegovom odredištu, već šalje poruku izvornom računaru. Kada odredišni računar primi N -ti paket i on šalje poruku izvornom računaru. Izvorni računar beleži vreme koje je proteklo od trenutka kada je poslao neki paket do trenutka kada primi odgovarajuću povratnu poruku; takođe, beleži naziv i adresu ruteru (ili odredišnog računara) koji vraća poruku. Na ovaj način, izvorni računar može da rekonstruiše putanju kojom paketi putuju od izvora do odredišta i može da odredi kašnjenja na putu do svih ruta koji učestvuju u prenosu i nazad (povratna kašnjenja). Program *Traceroute* ponavlja opisani eksperiment tri puta, tako da izvorni računar ka odredišnom, u stvari, šalje $3 \cdot N$ paketa. Program *Traceroute* detaljno je opisan u dokumentu RFC 1393.

Evo jednog primera rezultata dobijenih upotrebom programa *Traceroute* u kome je praćena putanja između izvornog računara `gaia.cs.umass.edu` (na Univerzitetu Masačusets) i odredišnog računara `cis.poly.edu` (na Politehničkom univerzitetu u Bruklinu). Podaci su razvrstani u šest kolona: prvu kolonu čini vrednost n koju smo upravo opisali i koja predstavlja broj određenog ruta duž ove putanje; u drugoj koloni naveden je naziv odgovarajućeg ruteru; u trećoj njegova adresa (u obliku `xxx.xxx.xxx.xxx`); poslednje tri kolone predstavljaju povratna kašnjenja za tri eksperimenta. Ukoliko izvorni računar primi manje od tri poruke od bilo kog ruteru na putanji (usled gubitkapaketa u mreži), program *Traceroute* postavlja zvezdicu odmah iza broja ruta i za taj ruter prijavljuje manje od tri povratna kašnjenja.

```
1 cs-gw (128.119.240.254) 1.009 ms 0.899 ms 0.993 ms
2 128.119.3.154 (128.119.3.154) 0.931 ms 0.441 ms 0.651 ms
3 border4-rt-gi-1-3.gw.umass.edu (128.119.2.194) 1.032 ms 0.484 ms 0.451 ms
4 acrl-ge-2-1-0.Boston.cw.net (208.172.51.129) 10.006 ms 8.150 ms 8.460 ms
5 agr4-loopback.NewYork.cw.net (206.24.194.104) 12.272 ms 14.344 ms 13.267 ms
6 acr2-loopback.NewYork.cw.net (206.24.194.62) 13.225 ms 12.292 ms 12.148 ms
7 pos10-2.core2.NewYork1.Level3.net (209.244.160.133) 12.218 ms 11.823 ms 11.793 ms
8 gige9-1-52.hsipaccess1.NewYork1.Level3.net (64.159.17.39) 13.081 ms 11.556 ms 13.297 ms
9 p0-0.polyu.bbnplanet.net (4.25.109.122) 12.716 ms 13.052 ms 12.786 ms
10 cis.poly.edu (128.238.32.126) 14.080 ms 13.035 ms 12.802 ms
```

U navedenim rezultatima postoji devet ruta između izvora i odredišta. Većina ovih ruta ima naziv, a svi imaju adrese. Na primer, naziv ruteru 3 je `border4-rt-gi-1-3.gw.umass.edu`, a njegova adresa je `128.119.2.194`. Posmatrajući podatke koje je ovaj ruter obezbedio, uviđamo da je u prvom od tri pokušaja povratno kašnjenje bilo 1,03 milisekunde. Povratna kašnjenja za sledeća dva pokušaja bila su 0,48 i 0,45 milisekunde. Ova povratna kašnjenja obuhvataju sva već pomenuta kašnjenja, uključujući kašnjenje usled prenosa, kašnjenje usled prostiranja, kašnjenje usled obrade u ruteru i kašnjenje usled čekanja u redu. Pošto se kašnjenje usled čekanja u redu tokom vremena menja, povratno kašnjenje paketa n koji je poslat ruteru n može da bude duže od povratnog kašnjenja za paket $n+1$ poslat ruteru $n+1$. I zaista, ovu pojavu vidimo u prethodnom primeru: kašnjenja do ruteru 6 su veća od kašnjenja do ruteru 7!

Želite sami da isprobate program *Traceroute*? Toplo preporučujemo da posetite adresu <http://www.traceroute.org> koja obezbeđuje web interfejs na kome ćete pronaći obiman spisak izvora koji vam mogu poslužiti za praćenje ruta. Izaberite neki izvor i upišete naziv nekog odredišnog računara, a program *Traceroute* će obaviti ostalo. Postoji više besplatnih programa koji programu *Traceroute* obezbeđuju grafički interfejs; nama omiljeni je *PingPlotter* [PingPlotter 2012].

Kašnjenja krajnjih sistema i aplikacija kao i ostale vrste kašnjenja

Pored kašnjenja usled obrade, prenosa i prostiranja, značajno dodatno kašnjenje može da nastane i u krajnjim sistemima. Na primer, krajnji sistem koji čeka na prenos paketa na deljeni medijum (npr. kao što je u slučaju Wi-Fi ili kablovskih mreža)

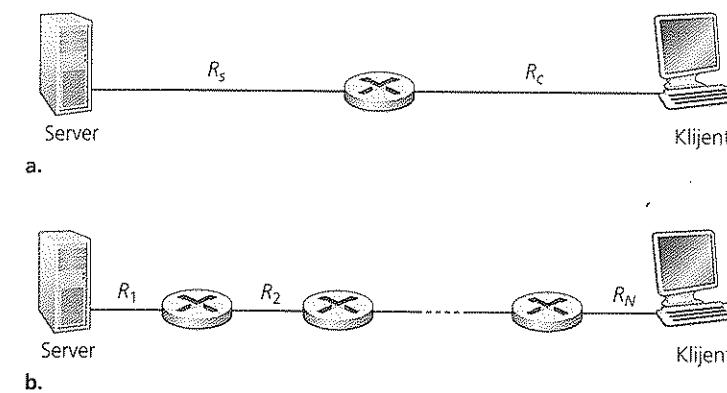
može *namerno* da odloži slanje tog paketa kao rezultat rada protokola za deljenje medijuma sa drugim krajnjim sistemima; takve protokole obrađujemo u poglavlju 5. Još jedno značajno kašnjenje je kašnjenje nastalo kao posledica pravljenja paketa podataka, koje postoji u VoIP aplikacijama (engl. Voice-over-IP odnosno telefonski razgovor preko interneta). U VoIP aplikacijama, pošiljalac prvo mora da popuni paket digitalizovanim kodovanim glasom pa tek onda da pošalje taj paket na internet. Vreme potrebno za popunjavanje paketa – nazvano kašnjenje paketizacije – može da bude značajno i da utiče na utisak koji korisnik ima o kvalitetu telefonskog razgovora preko interneta. Ovo pitanje biće podrobниje istraženo u okviru problema za samostalan rad na kraju ovog poglavlja.

1.4. 4 Propusna moć računarskih mreža

Pored kašnjenja i gubitaka paketa, veoma važan pokazatelj performansi računarskih mreža je propusna moć od jednog do drugog kraja. Da bismo definisali propusnu moć, razmotrićemo prenos velike datoteke sa računara A do računara B preko računarske mreže. Na primer, to može da bude prenos velikog video zapisa između dva ravноправна računara u okviru P2P sistema za deljenje datoteka. **Trenutna propusna moć** u bilo kom trenutku je brzina (u bitima u sekundi) pri kojoj računar B prima određenu datoteku. (Mnoge aplikacije, među njima i većina onih koje se koriste u P2P sistemima za deljenje datoteka, prikazuju trenutnu propusnu moć tokom preuzimanja datoteke u korisničkom interfejsu – možda ste to već primetili!) Ukoliko se datoteka sastoji od F bitova i računaru B je potrebno T sekundi da primi sve te bitove, tada je **prosečna propusna moć** pri prenosu tog fajla F/T bita u sekundi. Za neke aplikacije, kao što su one za internet telefoniranje, poželjno je da kašnjenje bude malo i da trenutna propusna moć stalno bude iznad nekog nivoa (na primer, preko 24 kb/s za neke aplikacije za internet telefoniranje i preko 256 kb/s za neke video aplikacije u realnom vremenu). Za neke druge aplikacije, među njima i one koje se koriste za prenos datoteka, kašnjenje nije kritično, već je poželjno imati što je veću moguću propusnu moć.

Da bismo stekli još bolji uvid u značaj propusne moći, razmotrimo još nekoliko primera. Na slici 1.19(a) prikazana su dva krajnja sistema, server i klijent, povezana sa dva komunikaciona linka i ruterom. Posmatramo propusnu moć za prenošenje datoteke od servera do klijenta. Neka R_s označava brzinu linka između servera i ruteru, a R_c brzinu linka između ruteru i klijenta. Pretpostavimo da se u čitavoj mreži prenose samo oni bitovi koje ovaj server šalje ovom klijentu. Pitanje je, u ovom idealnom slučaju, kolika je propusna moć između servera i klijenta? Da bismo odgovorili na ovo pitanje, bitove možemo da zamislimo kao *tečnost*, a komunikacione linkove kao *cevi*. Jasno je da server ne može da izbacuje bitove kroz link brzinom većom od R_s bita u sekundi, a ruter ne može da prosleđuje bitove brže od R_c bita u sekundi. Ukoliko je $R_s < R_c$, onda će bitovi koje server izbacuje „teći“ pravo kroz ruter i stizati do klijenta brzinom R_s bita u sekundi, što znači da je propusna moć R_s bita u sekundi. Ukoliko je, sa druge strane, $R_c < R_s$, onda ruter neće moći da prosleđuje bitove onom brzinom kojom ih prima. U ovom slučaju, bitovi će moći da napušta-

ju ruter brzinom R_c , što znači da je propusna moć od jednog do drugog kraja R_c . (Pažnja! Ukoliko bitovi nastave da pristižu na ruter brzinom R_s i nastave da napuštaju ruter brzinom R_c , gomilanje bitova u ruteru koji čekaju na prenos do klijenta će se nastaviti – što je najnepoželjnija situacija!) Prema tome, za ovu jednostavnu mrežu sa dva linka, propusna moć je min $\{R_s, R_c\}$, to jest, jednak je brzini prenosa linka koji predstavlja usko grlo. Pošto smo odredili propusnu moć, možemo približno da odredimo vreme potrebno za prenošenje velike datoteke od F bitova od servera kao $F/\min \{R_s, R_c\}$. Pretpostavimo, kao primer, da preuzimate neku MP3 datoteku od $F = 32$ miliona bitova, da server ima brzinu prenosa od $R_s = 2$ Mb/s, a da imate pristupni link brzine $R_c = 1$ Mb/s. Vreme potrebno za prenos ove datoteke je u tom slučaju 32 sekunde. Naravno, ovi izrazi za propusnu moć i vreme prenosa samo su približni, pošto se ne uzimaju u obzir mehanizmi principa prenosa podataka uskladišti pa prosledi i kašnjenje usled obrade, kao i efekti primene protokola.

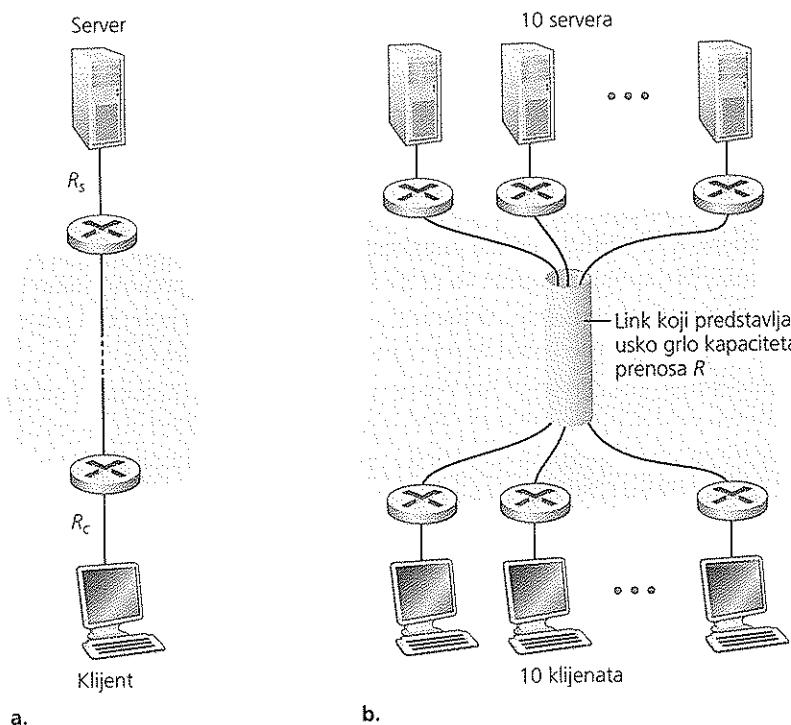


Slika 1.19 ◆ Propusna moć za prenos datoteke od servera do klijenta:

Na slici 1.19(b) prikazana je mreža sa N linkova između servera i klijenta, pri čemu su brzine prenosa N linkova R_1, R_2, \dots, R_N . Primenom iste analize kao i za mrežu od dva linka, pronalazimo da je propusna moć za prenos neke datoteke od servera do klijenta jednak $\min \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$, odnosno da je i ovog puta jednak brzini prenosa linka koji predstavlja usko grlo duž putanje između servera i klijenta.

Sada ćemo razmotriti još jedan primer na koji nas navodi savremeni internet. Na slici 1.20(a) prikazana su dva krajnja sistema, server i klijent, povezani sa računarskom mrežom. Razmatramo propusnu moć za prenos datoteke od servera do klijenta. Server je sa mrežom povezan pristupnim linkom brzine R_s , a klijent je sa mrežom povezan pristupnim linkom brzine R_c . Pretpostavimo sada da svi linkovi u jezgru komunikacione mreže imaju veoma velike brzine prenosa, mnogo veće od R_s i R_c . I zaista, danas je jezgro interneta predimenzionirano linkovima velikih brzina u kojima retko dolazi do zagušenja. Takođe, pretpostavimo da se u čitavoj mreži prenose samo oni bitovi koje ovaj server šalje ovom klijentu. Pošto je u ovom primeru jezgro računarske mreže slično širokoj cevi, brzina pri kojoj bitovi mogu da teku od izvora do odredišta je i ovog puta manja vrednost od R_s i R_c , odnosno propusna

moć = $\min\{R_s, R_c\}$. Prema tome, ograničavajući faktor za propusnu moć današnjeg interneta najčešće je pristupna mreža.



Slika 1.20 ◆ Propusna moć od jednog do drugog kraja: (a) klijent preuzima datoteku sa servera, (b) 10 klijenta preuzima sa 10 servera:

Kao poslednji primer, pogledajte sliku 1.20(b) na kojoj je prikazano 10 servera i 10 klijenata povezanih sa jezgrom računarske mreže. U ovom primeru imamo 10 istovremenih preuzimanja u čemu učestvuje 10 parova server-klijent. Pretpostavimo da je tih 10 preuzimanja jedini saobraćaj u mreži u ovom trenutku. Kao što je prikazano na slici, u mreži postoji link kroz koji prolaze svih 10 preuzimanja. Označimo sa R brzinu prenosa linka R . Pretpostavimo da pristupni linkovi svih servera imaju istu brzinu R_s , da pristupni linkovi svih klijenata imaju istu brzinu R_c i da je brzina prenosa svih linkova u jezgru – osim onog zajedničkog linka brzine R – mnogo veća od R_s , R_c i R . Sada se pitamo, kolike su propusne moći za preuzimanje fajlova? Jasno, ukoliko je brzina zajedničkog linka, R , velika – recimo stotinu puta veća od R_s i R_c – tada će propusna moć za svako preuzimanje i ovoga puta biti $\min\{R_s, R_c\}$. Ali, šta ako je brzina zajedničkog linka približno ista kao R_s i R_c ? Kolika je propusna moć u tom slučaju? Pogledajmo određen primer. Pretpostavimo da je $R_s = 2 \text{ Mb/s}$, $R_c = 1 \text{ Mb/s}$, $R = 5 \text{ Mb/s}$ i da zajednički link deli svoju brzinu prenosa podjednako na svih 10 preuzimanja. Tada usko grlo za svako preuzimanje nije više pristupna mreža, već je to deljeni link u jezgru koji svim preuzimanjima nudi propusnu moć

od samo 500 kb/s. Stoga propusna moć od jednog do drugog kraja mreže za sva preuzimanja u ovom slučaju je ograničena na 500 kb/s.

Primeri na slici 1.19 i slici 1.20(a) pokazuju da propusna moć zavisi od brzine prenosa linka preko koga teku podaci. Videli smo da se propusna moć, kada nema uticaja drugog saobraćaja, može se jednostavno približno predstaviti kao najmanja brzina prenosa duž putanje između izvora i odredišta. Primer na slici 1.20 (b) pokazuje da propusna moć u opštijem slučaju ne zavisi samo od brzine prenosa linkova duž putanje, već i od ostalog saobraćaja. U određenim slučajevima link sa najvećom brzinom prenosa može i te kako da bude usko grlo za prenos datoteka ukoliko se tim linkom istovremeno prenosi još puno drugih podataka. Propusnu moć računarskih mreža podrobниje ćemo razmotriti u okviru problema za samostalno rešavanje i narednim poglavljima.

1.5 Slojevitost protokola i njihovi modeli usluga

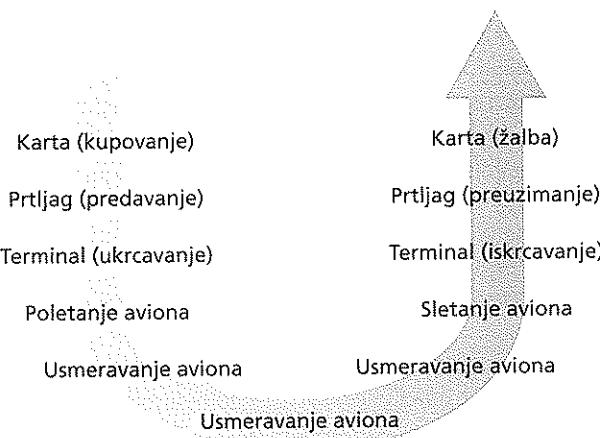
Iz dosadašnjeg izlaganja očigledno je da je internet *izuzetno* složen sistem. Videli smo da se internet sastoji iz mnoštva sastavnih delova: brojnih aplikacija i protokola, raznih tipova krajnjih sistema, komutatora paketa, kao i različitih vrsta medijuma koji se koriste za linkove. Imajući u vidu ovu izuzetnu složenost, postavlja se pitanje da li je uopšte moguće organizovati njegovu mrežnu arhitekturu i da li je moguće napraviti bar pregled te arhitekture u ovoj knjizi. Srećom, odgovor na oba ova pitanja je potvrđan.

1.5.1 Slojevita arhitektura

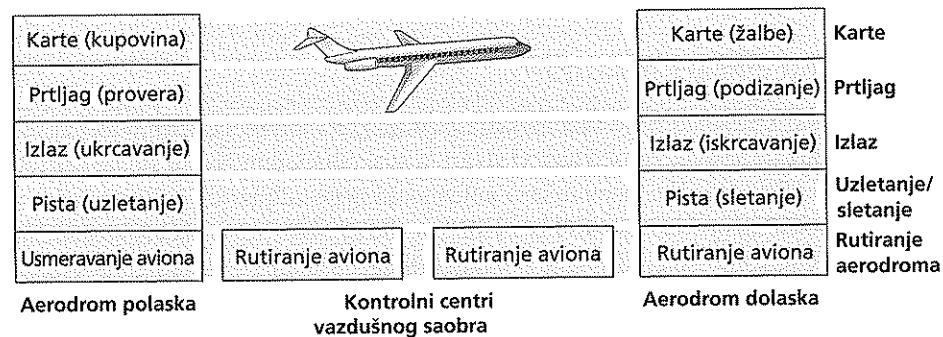
Pre nego što iznesemo naša razmišljanja o arhitekturi interneta, napravićemo još jedno poređenje sa svetom oko nas. U stvari, u svakodnevnom životu stalno imamo posla sa veoma složenim sistemima. Zamislite da neko zatraži da opišete, recimo, sistem avionskog prevoza. Kako biste jednostavno opisali ovaj izuzetno složeni sistem, koji obuhvata: prodaju karata, proveru prtljaga, osoblje na terminalima, pilote, avione, kontrolu leta i svetski sistem za usmeravanje aviona? Jedan od načina za opisivanje ovog sistema bio bi da pokušate da opišete sve što bi trebalo da učinite (ili što bi drugi trebalo da učine za vas) prilikom putovanja avionom. Dakle, najpre kupujete kartu, predajete prtljag, odlazite na određeni terminal i konačno se ukravivate u avion. Avion uzleće i zatim se usmerava ka svom odredištu. Kada sleti, iskrvacavate se, prolazite kroz terminal i preuzimate svoj prtljag. Ukoliko je let bio nepriyatno, žaščite se agenciji od koje ste kupili kartu (što je uzaludan trud). Ovakav razvoj događaja je prikazan na slici 1.21.

Već ste uočili neke sličnosti sa umrežavanjem računara: avion vas prevozi od mesta iz koga polazite do željene destinacije – paket se prenosi od izvornog do odredišnog računara na internetu. Ali, to nije ona sličnost koju tražimo. Tražimo određenu *strukturu* na slici 1.21. Posmatrajući sliku 1.21, uočavamo da na oba kraja postoji deo za prodaju karata; pored toga postoji i služba za preuzimanje prtljaga putnika koji su kupili karte, kao i aktivnosti putnika na određenom izlazu sa kupljenom

kartom i predatim prtljagom. Za putnike koji su prošli određeni izlaz (odnosno, za putnike koji su već kupili kartu, predali prtljag i prošli kroz izlaz) preostalo je uzletanje i sletanje aviona, a tokom trajanja leta služba kontrole letenja vrši usmeravanje aviona. To nas navodi da aktivnosti sa slike 1.21 posmatramo u smislu *horizontalne povezanosti*, kao što je to i prikazano na slici 1.22.



Slika 1.21 ◆ Postupci za putovanje avionom:



Slika 1.22 ◆ Horizontalna slojevitost aktivnosti koje se obavljaju u avionskom prevozu:

Aktivnosti koje se obavljaju na slici 1.22 podelili smo na slojeve i na taj način dobili okvir unutar kojeg možemo razgovarati o avionskom prevozu. Obratite pažnju, u svakom sloju se, u kombinaciji sa slojevima koji se nalaze ispod njega, vrši neka aktivnost, odnosno pruža neka *usluga*. Na sloju prodaje karata i na nižim slojevima, obavlja se prevoz putnika od aerodroma do aerodroma. Na sloju prtljaga i na nižim slojevima, odvija se prevoz putnika i njihovog prtljaga, od predavanja do preuzimanja prtljaga. Zapažate i da sloj zadužen za prtljag svoje usluge pruža samo putnicima koji su već kupili kartu. Na sloju izlaza, obavlja se prevoz putnika i njihovog prtljaga, od odlaznog izlaza do dolaznog izlaza. Na sloju uzletanja i sletanja obavlja se prevoz putnika i njihovog prtljaga od jedne piste do druge. Svaki sloj obezbeđuje svoje usluge: (1) izvršavanjem određenih aktivnosti u okviru tog sloja (na primer, na sloju izlaza vrši se ukrcavanje ljudi u avion i iskrcavanje iz njega) i (2) korišćenjem usluga koje se nalaze na sloju neposredno ispod njega (na primer, na sloju izlaza koristi se usluga prevoza putnika od piste do piste, koje pripadaju sloju uzletanja i sletanja).

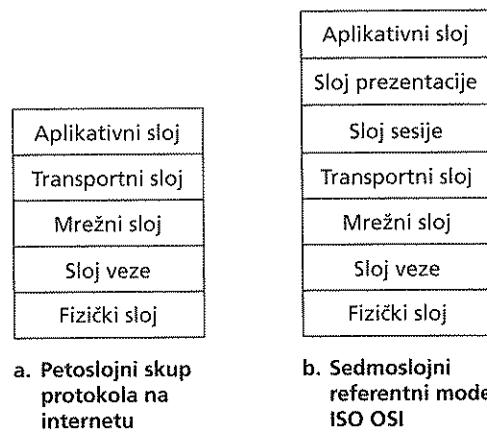
Slojevita arhitektura omogućava izdvajanje pojedinih dobro definisanih, zasebnih delova iz velikog i složenog sistema. Ovo pojednostavljenje je značajno, ako ni po čemu drugom, po tome što se time postiže modularnost, tako da je mnogo lakše izmeniti način na koji se primenjuje neka usluga koju određeni sloj obezbeđuje. Sve dok neki sloj obezbeđuje iste usluge sloju iznad njega i koristi iste usluge sloja koji je ispod njega, ostatak sistema ostaje nepromenjen, ukoliko se promeni implementacija sloja. (Vodite računa o tome da se izmena načina na koji se primenjuje neka usluga značajno razlikuje od izmene same usluge.) Ukoliko, na primer, izmenimo način rada izlaza (recimo, tako da se ljudi ukrcavaju i iskrcavaju po visini), to se neće odraziti na ostatak sistema avionskog prevoza, pošto se na sloju izlaza i dalje obavlja ista radnja (ukrcavanje i iskrcavanje putnika); samo je promenjen način na koji se to obavlja. U velikim i složenim sistemima koji se neprekidno nadograđuju, mogućnost da se promeni način na koji se implementira neka usluga bez posledica na ostale delove sistema, predstavlja još jednu veliku prednost razdvajanja sistema na slojeve.

Slojevitost protokola

Završavamo sa avionima i našu pažnju usmeravamo na mrežne protokole. Da bi obezbedili strukturu za projektovanje mrežnih protokola, projektanti mreža, organizuju protokole – ali i mrežni hardver i softver koji primenjuju te protokole – po **slojevima**. Svaki protokol pripada jednom sloju, isto kao i svaka aktivnost koja se obavlja u avionskom prevozu prikazanom na slici 1.22 pripada nekom sloju. I u ovom slučaju zanimaju nas *usluge* koje određeni sloj pruža sloju koji se nalazi iznad njega – takozvani **model usluga** sloja. Baš kao i u primeru sa avionskim prevozom, svaki sloj pruža svoje usluge: (1) izvršavanjem određenih aktivnosti unutar tog sloja i (2) korišćenjem usluga sloja koji se nalazi neposredno ispod njega. Na primer, usluga koju obezbeđuje sloj *n* može da obuhvati pouzdanu isporuku poruka sa jednog kraja mreže na drugi kraj. Ovo bi moglo da se obavi tako što bi se iskoristila nepouzdana usluga sloja *n-1* za dostavu poruka sa jednog kraja na drugi, dok bi se sloju *n* dodala funkcionalnost za otkrivanje i ponovno slanje izgubljenih poruka.

Protokol u nekom sloju može da se realizuje softveru, hardveru ili kombinacijom hardverske i softverske realizacije. Protokoli aplikativnog sloja – kao što su, HTTP i SMTP – skoro uvek se realizuju u softveru krajnjih sistema; isti je slučaj i sa protokolima transportnog sloja. Pošto su fizički sloj i sloj veze podataka odgovorni za komunikaciju preko određenog linka, protokoli na njima obično se realizuju na mrežnoj kartici (na primer, mrežnim karticama Ethernets ili Wi-Fi) koja je povezana

sa datim linkom. Protokoli na mrežnom sloju obično se realizuju kombinovano – i hardverski i softverski. Obratite pažnju da je, kao što su aktivnosti u slojevitoj arhitekturi avionskog prevoza raspodeljene (distribuirane) između raznih aerodroma i centara za kontrolu leta od kojih se sastoji ceo ovaj sistem, i protokol u sloju n takođe *distribuiran* između krajnjih sistema, komutatora paketa i ostalih komponenti od kojih se sastoji mreža. Drugim rečima, po neki deo protokola iz sloja n često se nalazi u svakoj od ovih mrežnih komponenti.



Slika 1.23 ◆ Skup protokola na internetu (a) i OSI referentni model (b)

Prednosti organizovanja protokola po slojevima su konceptualne i strukturalne [RFC 3439]. Kao što smo već videli, slojevitost protokola omogućava objašnjenje strukture komponenti sistema. Modularnost olakšava ažuriranje delova sistema. Spomenuli smo, takođe, da su neki istraživači i projektanti mreža žestoki protivnici organizovanja po slojevima [Wakeman, 1992]. Jedna od mogućih manjkavosti organizovanja po slojevima je ponavljanje funkcionalnosti koje se obavljaju nanižim slojevima na nekom višem sloju. Na primer, mnogi skupovi protokola nude oporavak od greške na nivou pojedinačnog linka, ali i na nivou mreže s kraja na kraj. Drugi mogući nedostatak je u tome što funkcionalnosti koje se obavljaju u jednom sloju mogu biti neophodne informacije (na primer, podatak o vremenu nekog dođađaja) koje se nalaze na drugom sloju, čime se narušava ideja o razdvajaju na slojeve.

Svi zajedno, protokoli na raznim slojevima se nazivaju **skup protokola**. Skup protokola na internetu se sastoji od pet slojeva: fizički sloj, sloj veze, mrežni sloj, transportni sloj i aplikativni sloj, kao što je prikazano na slici 1.23(a). Ukoliko pogledate sadržaj ove knjige, videćete da smo je podelili na poglavlja koja odgovaraju skupu protokola na internetu. Koristili smo **pristup od vrha ka dnu**, obrađujući prvo aplikativni sloj, a zatim produžavamo nadole.

Aplikativni sloj

Na aplikativnom sloju se nalaze mrežne aplikacije i njihovi protokoli iz aplikativnog sloja. Aplikativni sloj interneta obuhvata veliki broj protokola, kao što su: HTTP protokol (obezbeđuje zahtevanje i slanje veb dokumenata), SMTP (obezbeđuje prenos elektronske pošte) i FTP (obezbeđuje prenos datoteka između dva krajnja sistema). Takođe, videćemo i da se pojedine mrežne funkcije kao što je, na primer, prevođenje ljudima razumljivih naziva krajnjih sistema na internetu, poput www.ietf.org u 32-bitne mrežne adrese, izvršava se takođe pomoću protokola aplikativnog sloja, u ovom slučaju protokola DNS (Domain Name System – sistem imenovanja domena). U poglavlju 2 videćete da je veoma lako napraviti i pustiti u rad sopstvene, nove protokole aplikativnog sloja.

Protokoli aplikativnog sloja istovremeno se nalaze na više krajnjih sistema, to jest distribuirani su, pri čemu aplikacija na jednom krajnjem sistemu koristi taj protokol za razmenu paketa informacija sa aplikacijom na drugom krajnjem sistemu. Ovaj paket informacija aplikativnog sloja naziva se **poruka**.

Transportni sloj

Transportni sloj na internetu prenosi poruke aplikativnog sloja između krajnjih tačaka aplikacije. Na internetu postoje dva transportna protokola, TCP i UDP, pri čemu se za prenošenje poruka aplikativnog sloja koristi jedan od njih. Protokol TCP aplikacijama, koje ga koriste, nudi uslugu sa uspostavljanjem veze. Ova usluga podrazumeva garantovanu isporuku poruka aplikativnog sloja do odredišta i kontrolu toka (recimo, usaglašavanje brzina pošiljaoca i primaoca). Pored toga, protokol TCP deli duže poruke na kraće segmente i obezbeđuje mehanizam za kontrolu zagušenja, tako što izvor smanjuje brzinu prenosa ukoliko dođe do zagušenja mreže. Protokol UDP aplikacijama, koje ga koriste, nudi uslugu bez uspostavljanja veze. Ova usluga je uprošćena do krajnjih granica, bez obezbeđenja pouzdanosti prenosa, bez kontrole toka i bez kontrole zagušenja. U ovoj knjizi pakete transportnog sloja nazivamo **segmentima**.

Mrežni sloj

Mrežni sloj na internetu je odgovoran za prenošenje paketa mrežnog sloja (poznatih kao **datagrami**) od jednog računara do drugog. Protokol transportnog sloja na internetu (TCP ili UDP) na izvornom računaru prosleđuje segment transportnog sloja i odredišnu adresu mrežnom sloju, slično kao što poštanskoj službi predajemo pismo sa napisanom odredišnom adresom. Mrežni sloj je taj koji obezbeđuje uslugu isporuke segmenta do transportnog sloja naodredišnom računaru.

Čuveni IP protokol se nalazi na mrežnom sloju interneta. Ovaj protokol definiše polja u datagramu kao i način na koji krajnji sistemi i ruteri postupaju po tim poljima. Postoji samo jedan jedini IP protokol i sve komponente interneta koje imaju mrežni sloj moraju da ga koriste. Mrežni sloj na internetu takođe obuhvata protokole za rutiranje (usmeravanje) koji određuju putanje kojima se datogrami kre-

ču od izvora do odredišta. Na internetu ima mnogo protokola za rutiranje. Kao što rekosmo u odeljku 1.3, internet predstavlja mrežu svih mreža, pa u okviru neke mreže njen administrator može da koristi bilo koji protokol za rutiranje po sopstvenoj želji. Iako se na mrežnom sloju nalaze i protokol IP i brojni protokoli za rutiranje, za njega se često kaže samo IP sloj, što potvrđuje činjenicu da IP protokol označava čitav internet na okupu.

Sloj veze

Mrežni sloj na internetu usmerava datagrame kroz niz rutera između izvora i odredišta. Za prenošenje paketa od jednog čvora (računara ili rutera) do sledećeg, mrežni sloj se oslanja na usluge sloja veze. Tačnije rečeno, na svakom čvoru mrežni sloj prenosi datagram na niže ka sloju veze, koji ga isporučuje sledećem čvoru na putanji. Na sledećem čvoru, sloj veze prenosi datagram naviše ka mrežnom sloju.

Usluge koje obezbeđuje sloj veze zavise od određenog protokola sloja veze koji se primenjuje na tom linku. Na primer, neki protokoli obezbeđuju pouzdanu isporuku od predajnog čvora, preko odgovarajućeg linka, do prijemnog čvora. Skrećemo vam pažnju na to da se ova usluga pouzdane isporuke razlikuje od usluge pouzdane isporuke TCP protokola, koji obezbeđuje pouzdanu isporuku od jednog krajnjeg sistema do drugog. U primere protokola sloja veze spadaju Ethernets, Wi-Fi i kablovski pristup sa upotrebom DOCSIS protokola. Pošto datagrami na svom putu od izvornog do odredišnog računara moraju da produ preko nekoliko linkova, može se desiti da ih obrađuju drugačiji protokoli sloja veze na različitim linkovima duž putanje. Na primer, datagram se na jednom linku prenosi korišćenjem Etherneta, a već u sledećem korišćenjem protokola PPP. Mrežni sloj dobijaće različite usluge od različitih protokola sloja veze. U ovoj knjizi pakete sloja veze podataka nazivamo **okvirima**.

Fizički sloj

Dok je sloj veze zadužen za prenošenje celih okvira od jednog elementa mreže do susednog elementa mreže, zadatak fizičkog sloja jeste prenošenje *pojedinačnih bitova* unutar istog okvira između susednih čvorova. Protokoli na ovom sloju zavise od vrste linka, ali i od samog prenosnog medijuma od koga je link (da li su to kablovi sa upredenim bakarnim paricama, monomodna optička vlakna i slično). Na primer, postoji više Ethernets protokola za fizički sloj: jedan za kablove sa upredenim bakarnim paricama, drugi za koaksijalne kablove, treći za optičke kablove itd. Za svaki od njih, bitovi se na različit način prenose kroz link.

OSI model

Pošto smo podrobno razmotrili skup protokola na internetu, trebalo bi da kažemo i da to nije jedini postojeći skup protokola. Tačnije, krajem sedamdesetih, Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) je predložila organizaciju računarskih mreža u

sedam slojeva, koja je dobila naziv OSI (Open System Interconnection – otvoreni sistem za međusobno povezivanje) model [ISO 2012]. OSI model je oblikovan u vreme kada su protokoli koji su postali internet protokoli tek bili u začetku i kada su bili tek jednu od brojnih grupa protokola koji su razvijani; u stvari, dok su tvorci stvarali prvobitne OSI modele, verovatno nisu ni pomisljali na internet. I pred tog, od kraja sedamdesetih, većina predavanja se i na univerzitetima zasnivala se na ovakoj ISO postavci i bila je organizovana na ovom sedmoslojnem modelu. Zbog tog svog ranog uticaja na obrazovanje o računarskim mrežama, sedmoslojni model se još uvek provlači kroz poneke udžbenike i predavanja o umrežavanju.

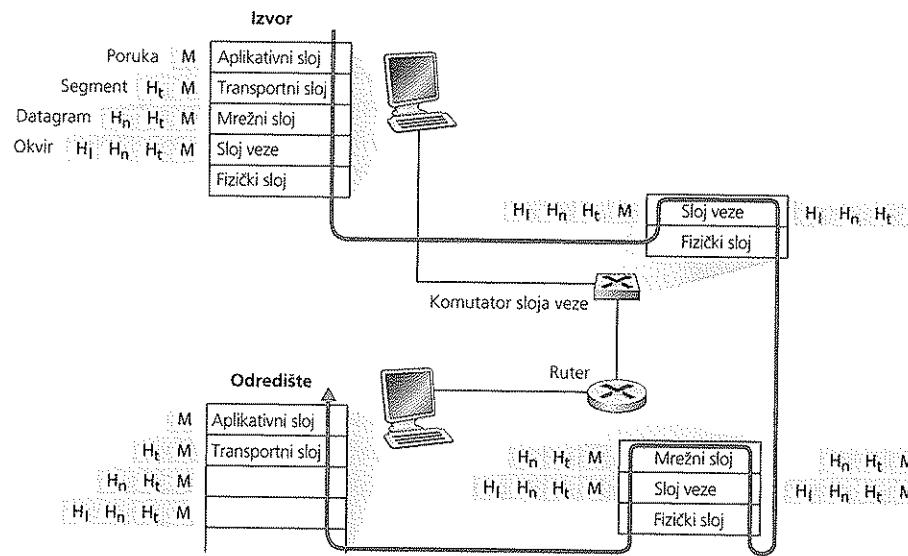
Sedam slojeva OSI referentnog modela, prikazanog na slici 1.23(b) su: aplikativni sloj, sloj prezentacije, sloj sesije, transportni sloj, mrežni sloj, sloj veze podataka i fizički sloj. Način rada pet od ovih sedam slojeva približno je istovetan načinu rada njihovih slično nazvanih internet slojeva. Zato ćemo razmotriti dva dodatna sloja koja postoje u OSI referentnom modelu – sloj prezentacije i sloj sesije. Uloga sloja prezentacije je da obezbedi usluge koje aplikacijama, koje međusobno razmenjuju podatke, omogućavaju da tumače značenje razmenjenih podataka. Ove usluge obuhvataju komprimovanje podataka i šifrovanje podataka (jasno je o čemu se tu radi), kao i opisivanje podatka (koje, kao što ćemo videti u poglavljju 9, aplikacije oslobođa brige o internim formatima u kojima se podaci čuvaju, ili se prikazuju – formatima koji se mogu razlikovati između pojedinih računara). Sloj sesije obezbeđuje razgraničavanje i sinhronizovanje razmene podataka, uključujući i način za stvaranje tačke za oporavak u slučaju greške i šeme za oporavak podataka.

Cinjenica da internet nema dva sloja koji postoje u OSI referentnom modelu stvara odredenu nedoumicu: da li su usluge koje ti slojevi nude nebitne? Šta se događa ukoliko nekoj aplikaciji *zatreba* neka od tih usluga? Odgovor interneta na oba pitanja je istovetan – to zavisi od programera određene aplikacije. Programer aplikacije odlučuje o tome da li je neka usluga važna i, ukoliko određena usluga jeste važna, obaveza programera aplikacije jeste da u tu aplikaciju ugradi sve što je potrebno da bi se ta usluga izvršila.

1.5.2 Enkapsulacija

Na slici 1.24 prikazana je fizička putanja kojom se podaci kreću nadole kroz skup protokola predajnog krajnjeg sistema, naviše i naniže kroz skupove protokola komutatora sloja veze i rutera koji se nalaze između krajnjih sistema, a zatim naviše, kroz skup protokola prijemnog krajnjeg sistema. Kao što ćete videti u nastavku knjige, i ruteri i komutatori sloja veze su u stvari komutatori paketa. Kao i kod krajnjih sistema, i njihov mrežni hardver i softver organizovan je slojevito. Međutim, ruteri i komutatori sloja veze nemaju implementirane *sve* slojeve iz skupa protokola, već samo donje slojeve. Kao što je prikazano na slici 1.24, komutatori sloja veze imaju implementirane slojeve 1 i 2, a ruteri slojeve od 1 do 3. To, na primer, znači da ruteri

na internetu mogu da izvršavaju protokol IP (protokol trećeg sloja), a da komutatori sloja veze to ne mogu. Nešto kasnije videćete da, iako ne prepoznaju IP adrese, komutatori sloja veze mogu da prepoznaju adrese drugog sloja kao što su, recimo, Ethernet adrese. Imajte na umu da krajnji sistemi imaju implementaciju svih pet slojeva, što je u skladu sa stanovištem internet arhitekture – da se većina složenosti premesti na obode mreže.



Slika 1.24 ◆ Računari, ruteri i komutatori sloja veze – svako od njih obuhvata različite skupove slojeva, čime se potvrđuje njihova različita namena:

Na slici 1.24 takođe je prikazan i veoma važan koncept **enkapsulacije**. Na prednjom računaru **poruka aplikativnog sloja** (M na slici 1.24) se prosleđuje transportnom sloju. U najjednostavnijem slučaju, transportni sloj preuzima tu poruku i dodaje joj dopunske informacije (tzv. informacije zaglavja transportnog sloja; H_t na slici 1.24) koje će koristiti prijemna strana transportnog sloja. Poruka aplikativnog sloja i informacije zaglavja transportnog sloja zajedno čine **segment transportnog sloja**. Na taj način, segment transportnog sloja enkapsulira poruku aplikativnog sloja. Dopunske informacije sastoje se od: podataka na osnovu kojih prijemna strana transportnog sloja isporučuje ovu poruku odgovarajućoj aplikaciji i bitova za otkrivanje grešaka koji prijemnoj strani omogućavaju da ustanozi da li su bitovi poruke izmenjeni duž putanje. Transportni sloj zatim prosleđuje taj segment mrežnom sloju, koji mu dodaje informacije zaglavja mrežnog sloja (H_n na slici 1.24) sa podacima kao što su, na primer, adrese izvornog i odredišnog krajnjeg sistema, stvarajući na taj način **datagram mrežnog sloja**. Ovaj datagram se zatim prosleđuje sloju veze koji će (naravno) dodati svoje informacije zaglavja sloja veze i napraviti **okvir**.

sloja veze. Dakle, vidimo da na svakom sloju paketi imaju dve vrste polja: polje zaglavja i polje podataka. Polje podataka je obično paket sloja koji se nalazi iznad.

U ovom slučaju može nam pomoći poređenje sa slanjem internog dopisa, koji se šalje javnom poštanskom službom, od jedne do druge filijale kompanije. Pretpostavimo da Alisa, koja radi u jednom predstavništvu neke firme, želi da posalje dopis Bobu, koji se nalazi u drugom predstavništvu iste firme. *Dopis* se može uporediti sa *porukom aplikativnog sloja*. Alisa stavlja dopis u interni koverat firme na čijoj prednjoj strani ispisuje Bobovo ime i službu u kojoj radi. *Interni koverat firme* se može uporediti sa *segmentom transportnog sloja* – na njemu se nalaze informacije zaglavja (Bobovo ime i oznaka službe) i on enkapsulira poruku aplikativnog sloja (dopis). Kada kurirska služba predstavništva iz koga se poruka šalje dobije interni koverat firme, ona taj koverat stavlja u drugi koverat koji se koristi za slanje pisama javnom poštanskom službom. Kurirska služba na tom kovertu ispisuje poštansku adresu predstavništva iz koga se poruka šalje i predstavništva kome je poruka namenjena. U ovom slučaju *poštanski koverat* se može uporediti sa *datagramom* – on enkapsulira segment transportnog sloja (interni koverat firme) koji enkapsulira izvornu poruku (dopis). Javna poštanska služba isporučuje poštanski koverat kurirskoj službi predstavništva kome je poruka namenjena. Tamo počinje postupak dekapsulacije. Kurirska služba izvlači interni dopis kompanije i dostavlja ga Bobu. Na kraju, Bob otvara taj koverat i uzima dopis.

Postupak enkapsulacije može biti mnogo složeniji od ovog koji smo upravo opisali. Na primer, neka velika poruka može da se podeli na više segmenata transportnog sloja (koji dalje mogu da se podele na više datograma mrežnog sloja). Na prijemnoj strani, takav segment bi onda morao da se obnovi od datograma koji ga sačinjavaju.

1.6 Napadi na mrežu

Internet je danas suštinski važan za mnoge institucije, velike i male firme, univerzitete i vladine službe. Mnogo pojedinaca oslanja se na internet za svoje profesionalne, društvene i lične potrebe. Ali, pored svih tih koristi i zadovoljstava, postoji i tama strana, strane na kojoj „loši momci“ pokušavaju da nam zagorčaju svakodnevni život, praveći štetu našim računarima povezanim sa internetom, ugrožavajući našu privatnost i onesposobljavajući internet usluge od kojih zavisimo.

Oblast sigurnosti mreža bavi se ispitivanjem načina na koji loši momci mogu da napadnu računarske mreže i time kako mi, uskoro stručnjaci za umrežavanje računara, možemo da odbranimo mreže od tih napada ili, što je još bolje, da projektujemo nove arhitekture koje su pre svega imune na takve napade. Zahvaljujući sve većem broju i raznovrsnosti postojećih napada, kao i pretnjama od novih i mnogo

opasnijih napada koji nas tek čekaju, sigurnost mreža postala je poslednjih godina središnja tema u oblasti računarskih mreža. U ovom udžbeniku velika pažnja je posvećena pitanju bezbednosti mreža.

Pošto još uvek nismo stručnjaci za računarske mreže i internet protokole, počemo sa prikazom nekih od preovladujućih bezbednosnih problema. Time ćemo se zainteresovati za mnogo ozbiljnije teme u poglavljima koji slede. Stoga, počinjemo jednostavnim pitanjem: šta sve može da bude loše? Zašto su računarske mreže ranjive? Koje su neke od najčešćih vrsta napada u savremenim mrežama?

Loši momci mogu da ubace zlonamerni softver u vaš računar preko interneta

Uređaje povezujemo sa internetom zato što želimo da preuzmemos podatke sa interneta, ili da pošaljemo podatke na internet. Pod ovim podrazumevamo sve one dobre stvari, kao što su: veb stranice, poruke e-pošte, MP3 muzika, telefonski pozivi, živi video snimci, rezultati pretraživača i tako dalje. Ali, nažalost, zajedno sa tim dobrim stvarima stižu i one loše – poznate pod zajedničkim nazivom **zlonamerni softver** – koji može da uđe u naše uređaje i zarazi ih. Pošto zlonamerni softver zarazi uređaj, može da izvede razne podmuklosti, među njima su brisanje datoteka i instaliranje špijunskog softvera koji prikuplja naše privatne informacije kao što su: brojevi osiguranja, lozinke i unosi sa tastature, a zatim te podatke dostavlja (preko interneta, naravno) lošim momcima. Napadnut računar može, takođe, da bude uvučen u mrežu, sačinjenu od hiljada slično napadnutihračunara, poznatih pod zajedničkim nazivom **mreža pod opsadom** (eng. botnet), kojima upravljaju loši momci i koje zloupotrebljavaju za slanje neželjenih e-poruka (spam poruka), ili za distribuirani napad odbijanja usluge (uskoro pričamo o tome) na ciljane računare.

Većina zlonamernog softvera koji danas postoji se **razmnožava samostalno**: pošto zarazi jedan računar, sa tog računara preko interneta traži prilaz do drugih računara, a sa novozaraženih računara pokušava da uđe u još više računara. Na taj način, samorazmnožavajući zlonamerni softver može da se raširi neverovatno brzo. Zlonamerni softver može da se širi u obliku virusa ili crva. **Virus** je vrsta zlonamernog softvera koji podrazumeva da korisnik uradi nešto, kako bi zarazio uređaj tog korisnika. Klasičan primer je prilog e-poruke koji sadrži zlonamerni izvršni kôd. Kada korisnik primi i otvoriti takav prilog, on nesvesno pokreće zlonamerni softver na svom uređaju. Obično se takvi virusi iz e-poruka razmnožavaju samostalno: kada se pokrene, virus može da pošalje poruku sa istovetnim zlonamernim prilogom svim primaocima iz e-adresara na određenom računaru. **Crvi** su zlonamerni softver koji u uređaj može da prodre bez izričitog učešća korisnika. Na primer, korisnik može da izvršava ranjivu mrežnu aplikaciju kojoj napadač može da pošalje zlonamerni softver. U nekim slučajevima, bez ikakvog učešća korisnika, ta aplikacija može da primi zlonamerni softver sa interneta i da ga pokrene, praveći na taj način crva. Taj crv u novozaraženom računaru zatim pretražuje internet, tražeći druge računare koji koriste istu ranjivu mrežnu aplikaciju. Kada ih pronađe, šalje svoju kopiju tim računarima. Savremeni zlonamerni softver je veoma opasan i nanosi veliku štetu.

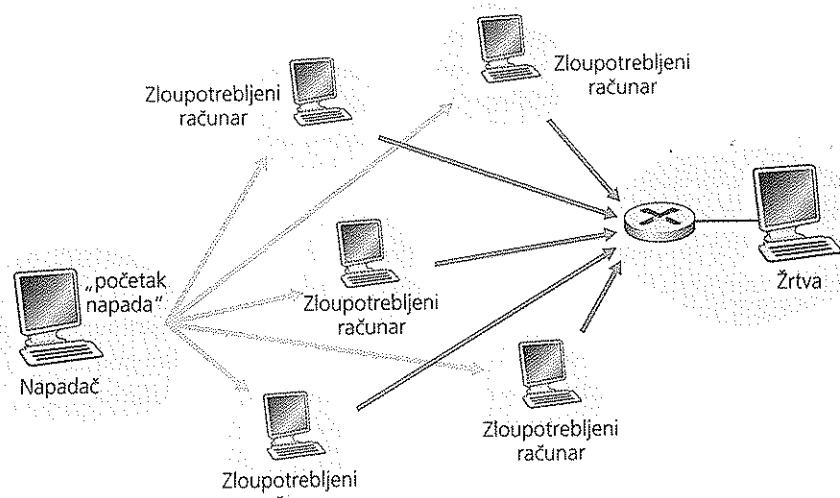
Dok obradujete teme iz ove knjige, podstičemo vas da stalno razmišljate o sledećem pitanju: šta to projektanti računarskih mreža mogu da urade kako bi uređaje povezane sa internetom odbranili od zlonamernih napada?

Loši momci mogu da napadnu servere i mrežnu infrastrukturu

Najveći broj bezbednosnih pretnji spada u tzv. **napad odbijanja usluge** (denial-of-service, DoS). Kao što sam naziv kaže, DoS napad onesposobljava mrežu, računar ili neki drugi deo infrastrukture tako da ih obični korisnici ne mogu koristiti. Mete DoS napada mogu da budu: veb serveri, serveri za e-poštu, DNS serveri (o kojima ćemo govoriti u poglavlju 2) i mreže određenih ustanova. DoS napadi na internetu su izuzetno česti, pri čemu se na hiljadu DoS napada dešava svake godine [Moor 2001; Mirković 2005]. Većina DoS napada na internetu spada u jednu od sledeće tri vrste:

- Napad na ranjive delove mreže. Ovo obuhvata slanje nekoliko dobro sročenih poruka na ranjive aplikacije ili operativne sisteme, koji se izvršavaju na računaru koji je meta napada. Ukoliko se napadnutoj aplikaciji ili operativnom sistemu pošalje pravi niz paketa podataka, odgovarajuća usluga može da prestane sa radom ili, što je još gore, računar može u potpunosti da otkaže.
- Zakrčenje propusnog opsega. Napadač preplavljuje paketima računar koji je meta napada – tolikim brojem paketa da pristupni link napadnutog računara postane zagrušen, čime se sprečava dospeće pravih paketa na odgovarajući server.
- Plavljenje vezama. Napadač uspostavlja veliki broj poluotvorenih ili potpuno otvorenih TCP vezama (o TCP vezama ćemo govoriti u poglavlju 3) ka računaru koji je meta napada. Taj računar postaje prezauzet tim, lažnim vezama, do te mere da prestaje da prihvata ispravne veze.

Sada ćemo malo podrobnije razmotriti napad zakrčenjem propusnog opsega. Prisećajući se naše analize o kašnjenju i gubicima paketa u odeljku 1.4.2, očigledno je da, ukoliko neki server ima pristupnu brzinu R bita u sekundi, onda je potrebno da napadač uspostavi saobraćaj sa tim serverom brzinom približnom brzini R , kako bi napravio štetu. Ukoliko je brzina R veoma velika, napad sa jednog mesta možda neće biti dovoljan da ugrozi određeni server. Štaviše, ukoliko sav saobraćaj potiče iz samo jednog izvora, uzvodni ruter možda uspe da otkrije napad i blokira sav saobraćaj iz tog izvora, pre nego što taj saobraćaj stigne blizu servera. U **distribuiranom DoS napadu (DDoS)**, prikazanom na slici 1.25, napadač kontroliše više izvora, pri čemu iz svakog od njih usmerava saobraćaj prema meti napada. Na ovaj način, neophodno je da zbirna brzina saobraćaja svih izvora koje napadač kontroliše bude približno jednak brzini R , kako bi ugrozila odgovarajući server. DDoS napadi za koje se koriste botnet mreže sa hiljadama zloupotrebljenih računara su danas uobičajena pojava [Mirković 2005]. DDoS napade je mnogo teže otkriti i odbraniti se od njih, nego DoS napade iz samo jednog izvora.



Slika 1.25 ◆ Distribuirani napad odbijanja usluge

Dok obrađujete teme iz ove knjige, podstičemo vas da stalno razmišljate o sledećem pitanju: šta to projektanti računarskih mrež mogu da urade za odbranu od DoS napada? Videćemo da su za svaku od tri vrste DoS napada neophodne drugačije vrste odbrane.

Loši momci mogu da prislушkuju pakete

Danas mnogo korisnika pristupa internetu preko bežičnih uređaja, kao što su laptop računari sa Wi-Fi vezama, ili uređaji sa pristupom internetu preko mreže mobilne telefonije (obrađujemo ih u poglavlju 6). Mada svuda dostupni pristup internetu ima izuzetne pogodnosti i mobilnim korisnicima nudi čudesne nove aplikacije, on je istovremeno izuzetno bezbednosno ranjiv – postavljanjem pasivnog prijemnika u blizini bežičnog predajnika, koji može da dobije kopiju svih paketa koji se prenose! Ti paketi mogu da sadrže razne vrste osetljivih informacija, uključujući: lozinke, brojeve računa, poslovne tajne i privatne lične poruke. Pasivni prijemnik koji pravi kopije svih paketa koji prolaze pored njega se naziva **prisluskivač paketa**.

Prisluskivači mogu da se koriste i u ožičenom okruženju. U ožičenom okruženju u kome se koristi difuzno slanje signala, kao što je u većini Ethernets lokalnih računarskih mreža, prisluskivač paketa može da prikupi kopije svih paketa koji se šalju difuzno unutar lokalne računarske mreže. Kao što je opisano u poglavlju 1.2, kablovski pristup takođe koristi difuzno slanje paketa, pa je stoga podložan prisluskivanju. Štaviše, loši momci mogu da obezbede pristup pristupnom ruteru neke organizacije ili pristupnom linku, na koji mogu da postave prisluskivač koji kopira sve pakete, koji putuju do mreže te organizacije ili od nje. Prisluskivani paketi mogu zatim da se analiziraju bez neposredne povezanosti na internet, kako bi se iz njih izvukle osetljive informacije.

Softver za prisluskivanje paketa je moguće besplatno preuzeti sa brojnih veb stranica, a mogu se nabaviti i komercijalne verzije. Profesori koji drže predavanja o

umrežavanju računara svojim studentima često daju zadatak da napišu program koji se koristi kao prisluskivač paketa i program za obnavljanje podataka na aplikativnom sloju. U suštini, za laboratorijske vežbe sa programom *Wireshark* [Wireshark 2012] koje su sastavni deo ove knjige (pogledajte uvodni deo o *Wireshark* laboratorijskim vežbama pri kraju ovog poglavlja) koristi se upravo takav prisluskivač paketa!

Pošto su prisluskivači paketa pasivni – drugim rečima, oni ne šalju pakete na prenosni kanal – teško ih je otkriti. Stoga, kada šaljemo pakete bežičnim kanalom, moramo se pomiriti sa tim da neki loši momci možda snimaju kopije naših paketa. Kao što možda i sami nagađate, najbolja odbrana od prisluskivača paketa podrazumeva šifrovanje. Šifrovanje koje se koristi za bezbednost mreža razmatraćemo u poglavlju 8.

Loši momci mogu da se maskiraju u nekoga kome verujete

Neverovatno je lako (*znaćete* to ubrzano, nakon što pročitate ovaj tekst!) da kreirate paket koji ima proizvoljnu izvorišnu adresu, sadržaja paketa i odredišnu adresu i zatim da ovaj, ručno napravljeni paket, pošljete na internet, koji će na taj način pravilno proslediti ovakav paket do svog odredišta. Zamislite prijemnik koji nije sumnjičav (na primer internet ruter) koji prima ovakav paket, preuzima (lažnu) izvorišnu adresu jer je poverljiv i zatim izvršava neke komande, ugrađene u sadržaj paketa (na primer modifikuje tabelu prosleđivanja). Sposobnost ubacivanja paketa na internet sa lažnom izvorišnom adresom poznata je pod nazivom **lažiranje IP adresa** (eng. **IP spoofing**), i jedan je od brojnih načina na koji neki korisnik može da se maskira kao neko drugi.

Da bi se ovaj problem rešio, biće potrebna *provera autentičnosti na krajnjim tačkama*, koja predstavlja mehanizam koji omogućava da sa sigurnošću utvrdite da li poruka potiče sa mesta sa kog vi mislite. Još jednom, želimo da vas ohrabrimo da, dok prelazite kroz poglavlja ove knjige, mislite kako ovo može da se uradi u slučaju mrežnih aplikacija i protokola. U poglavlju 8 ispitaćemo mehanizme za proveru autentičnosti na krajnjim tačkama.

Završavajući ovaj odeljak, vredi se još jednom podsetiti kako je internet uopšte i postao takvo, nebezbedno mesto. Odgovor je, u suštini, u tome što je internet prevenstveno zamišljen da takav i bude, pošto se zasnovao na modelu „grupe korisnika koji veruju jedan drugome i koji su svi povezani u mrežu, tako da imaju uvid u ono što drugi rade“ [Blumentahl 2001] – model u kome (po definiciji) nema potrebe brinuti o bezbednosti. Mnogo toga u prvoj arhitekturi interneta oslikava ovo zapažanje o uzajamnom poverenju. Na primer, podrazumeva se da jedan korisnik može da šalje pakete drugom korisniku, umesto da se za to zatraži i dobije dozvola, a identitet korisnika je ostavljen njemu na volju, umesto da postoji obavezna provera autentičnosti.

Izvesno je da savremeni internet ne koriste samo „korisnici koji međusobno veruju jedan drugom“. Štaviše, današnjim korisnicima neophodno je da razmenjuju podatke i sa korisnicima u koje nemaju uvek poverenje, ponekad žele da komuniciraju i anonimno, mogu da komuniciraju posredno preko nezavisnih posrednika (npr. veb keš servera, koje proučavamo u poglavlju 2, ili mobilnih agenata koji pomažu korisnicima u pokretu, o čemu govorimo u poglavlju 6) i mogu da izgube poverenje

u hardver, softver, pa čak i u vazduh koji koriste za komunikaciju. Upoznali smo se sa većinom izazova koji se tiču bezbednosti mreža i kako budemo napredovali kroz ovu knjigu, pozabavicemo se odbranom od prisluškivanja, lažnog predstavljanja, napada čovek u sredini, DDoS napada, zlonamernog softvera i još mnogo toga. Potrebno je da stalno imamo na umu da je komunikacija između korisnika koji jedan drugom veruju pre izuzetak nego pravilo. Dobro došli u svet savremenih računarskih mreža!

1.7 Istorija umrežavanja računara i interneta

U odeljcima od 1.1 do 1.6 napravili smo prikaz tehnologija računarskih mreža i interneta. Trebalо bi da već znate dovoljno i zadivite porodicu i prijatelje! Međutim, ukoliko zaista želite da budete u centru pažnje na nekoj žurci, potrebno je da svoje vidike proširite pikanterijama iz fascinantne istorije interneta [Segaller 1998].

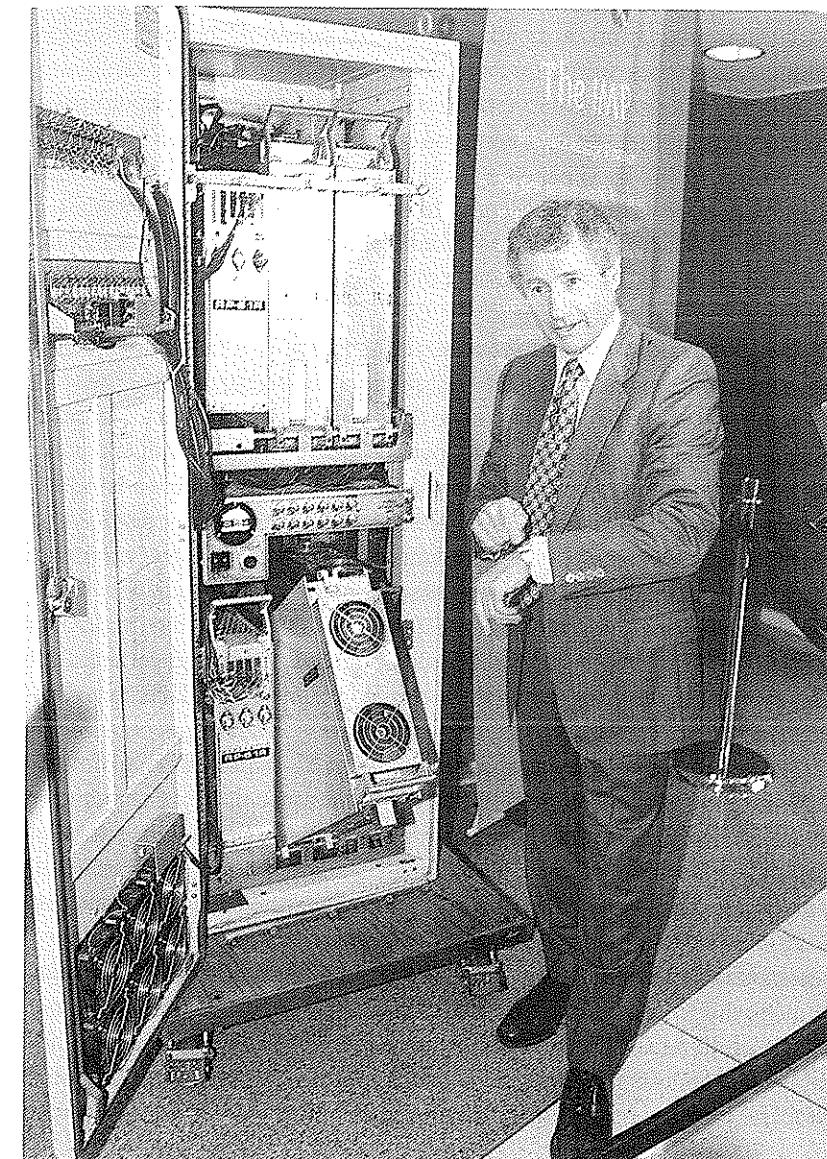
1.7.1 Razvoj komutiranja paketa: 1961–1972

Začeci računarskih mreža i savremenog interneta datiraju iz ranih šezdesetih, kada su telefonske mreže preovladavale u svetu komunikacionih tehnologija. Sećate se iz odeljka 1.3 da telefonske mreže za prenos informacija od pošiljaoca do primaoca koriste komutiranje kola – odgovarajući izbor, zato što se glas između pošiljaoca i primaoca prenosi konstantnom brzinom. Imajući u vidu sve veći značaj računara u to vreme, kao i pojavu računara sa deljenjem vremena, bilo je sasvim očekivano razmišljati o načinima njihovog povezivanja, kako bi mogli da ih upotrebljavaju korisnici koji su međusobno geografski udaljeni. Saobraćaj koji bi stvarali takvi korisnici verovatno bi bio u *naletima* – periodima aktivnosti, kao što je slanje komande udaljenom računaru, praćeni periodima neaktivnosti – u čekanju na odgovor, ili razmatranju primljenog odgovora.

Tri istraživačke grupe u različitim delovima sveta, nezavisno jedna od druge [Leiner 1998], izumele su komutiranje paketa kao efikasnu i pouzdanu zamenu za komutiranje kola. Prvi objavljen rad o tehnikama komutiranja paketa bio je rad Leonarda Klajnroka [Kleinrock 1961; Kleinrock 1964], u to vreme postdiplomca na MIT-u. Koristeći teoriju redova, Klajnrok je u svom radu elegantno demonstrirao efikasnost rešenja sa komutiranjem paketa za slučaj saobraćaja u naletima. Tokom 1964. godine Pol Baran [Baran 1964] iz Instituta „Rand“ je započeo istraživanje o korišćenju komutiranja paketa za bezbedan prenos glasa u vojnim mrežama, a Donald Dejvis i Rodžer Skantberi iz Nacionalne fizičke laboratorije u Engleskoj su takođe razvijali vlastite ideje o komutiranju paketa.

Na osnovu istraživačkog rada ove tri grupe postavljeni su temelji savremenog interneta. Ali, internet ima i dugu istoriju praktičnog pristupa koji takođe seže u rane '60-te godine. J. C. R. Liklider [DEC 1990] i Lorens Roberts, inače obojica Klajnrokove kolege sa MIT-a, pokrenuli su program iz računarskih nauka u okviru Agencije za napredne istraživačke projekte (Advanced Research Project Agency, ARPA) u Sjedinjenim Državama. Roberts je objavio opšti plan za ARPAnet [Roberts

1967], prvu računarsku mrežu sa komutiranjem paketa i direktnog pretka savremenog, svima dostupnog interneta. Praznik rada 1969. Godine, bio je dan kada je instaliran prvi komutator paketa na Univerzitetu UCLA, pod nadzorom Leonarda Klajnroka, a nedugo zatim instalirana su još tri komutatora paketa u Istraživačkom institutu Stanford (Stanford Research Institute, SRI), na Univerzitetu Santa Barbara i na Univerzitetu Juta (slika 1.26). Ovaj rani predak interneta je tako, krajem 1969. godine, imao ukupno četiri čvora. Klajnrok se priseća da je pri prvom pokretanju mreže, kako bi se sa Univerziteta UCLA daljinski prijavili za rad na računaru na Institutu SRI, došlo do pada sistema [Kleinrock 2004].



Slika 1.26 ◆ Jedan od prvih komutatora paketa

Do 1972. godine mreža ARPAnet proširila se na približno 15 čvorova i imala prvu javnu demonstraciju koju je izveo Robert Kan. Tada je završen prvi protokol za komunikaciju između računara koji su koristili krajnji sistemi ARPAneta [RFC 001], poznat pod nazivom NCP (Network Control Protocol). Pojavom protokola za povezivanje krajnjih sistema, moglo se otpočeti sa pisanjem aplikacija. Rej Tomlinson je 1972. godine napisao prvi program za elektronsku poštu.

1.7.2 Privatne mreže i međusobno povezivanje mreža: 1972–1980

Prvobitni ARPAnet je predstavljao zaokruženu i zatvorenu mrežu. Da bi stupio u vezu sa ARPAnet računarom, korisnik je u suštini morao da bude povezan sa drugim IMP komutatorom ove mreže. Početkom i sredinom sedamdesetih godina pored ARPAneta pojavile su se i druge samostalne mreže sa komutiranjem paketa: ALOHAnet, mikrotalasna mreža koja je povezivala univerzitete na Havajskim ostrvima [Abramson 1970], kao i paketne satelitske [RFC 829] i paketne radio mreže [Kahn 1978] agencije DARPA; Telenet, komercijalna mreža sa komutiranjem paketa kompanije BBN zasnovana na ARPAnet tehnologiji; Cyclades, francuska mreža sa komutiranjem paketa koju je osmislio Luj Puzan [Think 2002]; mreže sa deljenjem vremena kao što su mreže Tymnet i GE Information Services kasnih šezdesetih i ranih sedamdesetih godina [Schwartz 1977]; IBM-ova mreža SNA (1969 – 1974), takođe urađena po uzoru na ARPAnet [Schwartz 1977].

Broj mreža je rastao. Sve je ukazivalo na to da je upravo sazreo trenutak za nastanak sveobuhvatne arhitekture za međusobno povezivanje ovih mreža. Pionirski posao međusobnog povezivanja mreža, pod sponzorstvom Agencije za napredna istraživanja ministarstva odbrane (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA), u suštini *stvaranje mreže svih mreža*, obavili su Vinton Cerf i Robert Kan [Cerf 1974]; tada je i skovan izraz *internetting*, kako bi se opisalo ono što se time radi.

Ovi arhitektonski principi su bili ugrađeni u protokol TCP. Međutim, te prvobitne verzije protokola TCP bitno su se razlikovale od njegove današnje verzije. Prve verzije protokola TCP u sebi su sjedinjavale pouzdanu isporuku podataka po redosledu slanja sa ponovnim slanjem na krajnjim sistemima (još uvek je deo današnjeg protokola TCP) zajedno sa funkcijama prosleđivanja (što danas obavlja protokol IP). Prvi eksperimenti sa protokolom TCP, kao i uviđanje značaja koji za aplikacije, kao što su pakovanje glasa, ima usluga nepouzdanog prenosa, bez kontrole toka, sa jednog kraja na drugi kraj mreže, doveli su do izdvajanja protokola IP iz protokola TCP, kao i do pojave protokola UDP. Suština tri ključna protokola savremenog interneta – TCP, UDP i IP – smišljena je krajem sedamdesetih godina.

Uporedo sa istraživanjima u oblasti interneta koje je sprovodila DARPA, odvijale su se i mnoge druge važne aktivnosti u vezi sa mrežama. Na Havajima, Norman Abramson razvijao je ALOHAnet – radio-mrežu, zasnovanu na paketima, koja je omogućavala međusobnu komunikaciju udaljenih lokacija na Havajskim ostrvima. Protokol ALOHA [Abramson 1970] bio je prvi protokol za višestruki pristup koji

je korisnicima sa različitih mesta omogućavao da zajednički koriste isti medijum za difuznu komunikaciju (radio-frekvenciju). Abramsonov rad na protokolu za višestruki pristup nastavili su Metkalf i Bogs, i razvili protokol Ethernec [Metcalfe 1976] namenjen ozičenim mrežama sa difuznim slanjem signala. Zanimljivo je to da je stvaranje ovog protokola bilo motivisano potrebotom povezivanja većeg broja računara, štampača i zajedničkih diskova [Perkins 1994]. Pre više od 25 godina, znatno pre revolucije personalnih računara i eksplozije mreža, Metkalf i Bigs su postavili temelje današnjih lokalnih računarskih mreža.

1.7.3 Širenje mreža: 1980–1990

Do kraja sedamdesetih godina sa ARPAnetom je bilo povezano oko dvesta računara. Krajem osamdesetih godina, broj računara povezanih sa javnim internetom, savezom mreža u kojoj se nazirao današnji internet, dostigao je sto hiljada. Osmadesete su bile godine naglog rasta.

Dobar deo tog rasta bio je posledica nekoliko nezavisnih nastojanja da se stvore računarske mreže koje bi zajedno povezivale više univerziteta. Mreža BITNET omogućavala je razmenu elektronske pošte i prenos datoteka između univerziteta u severoistočnom delu SAD. Mreža CSNET (Computer Science Network) nastala je sa ciljem povezivanja univerzitetskih istraživača koji nisu imali pristup ARPAnetu. Godine 1986. napravljena je mreža NSFNET koja je omogućavala pristup superračunarskim centrima pod sponzorstvom udruženja NSF. Okosnica ove mreže, čija je brzina na početku iznosila 56 kb/s, a krajem te decenije već 1,5 Mb/s, poslužila je kao osnovna okosnica za povezivanje većeg broja regionalnih mreža.

Istovremeno, u ARPAnet zajednici mnogi krajnji elementi arhitekture današnjeg interneta lagano su zauzimali svoje mesto. Prvog januara 1983. godine zvanično je pušten u rad protokol TCP/IP kao standardni protokol ove mreže (zamenivši protokol NCP). Prelazak [RFC 801] sa protokola NCP na protokol TCP/IP predstavljao je pristup dana D – tog dana svi računari ove mreže morali su da se prebace na protokol TCP/IP. Krajem osamdesetih su napravljena proširenja ovog protokola kojima su omogućeni mehanizmi kontrole zagruženja na strani krajnjih sistema [Jacobson 1988]. Takođe, razvijen je i sistem imenovanja domena (Domain Name System, DNS) koji se koristi za preslikavanje ljudima razumljivih internet naziva (na primer: gaia.cs.umass.edu) u odgovarajuće 32-bitne IP adrese [RFC 1034].

Uporedo sa razvojem ARPAneta (koji je većim delom bio rezultat truda naučnika iz SAD), početkom osamdesetih u Francuskoj je predstavljen projekat Minitel, veoma ambiciozni plan uvođenja mreža u sve domove. Sistem Minitel, koji je sponsorisala francuska vlada, sastojao se od javne mreže sa komutiranjem paketa (zасноване na skupu protokola X.25), Minitel servera i jeftinih terminala sa ugrađenim modemima male brzine. Mreža Minitel je zabeležila veliki uspeh 1984. godine, kada je francuska vlada besplatno delila Minitel terminale svim porodicama koje su izrazile želju da ih poseduju. U ovoj mreži postojale su besplatni sajtovi – kao što je

onaj sa telefonskim imenikom – kao i privatni sajтови čije se korišćenje naplaćivalo. Sredinom devedesetih, na vrhu svoje popularnosti, mreža Minitel je nudila više od 20 000 različitih usluga – od kućnog bankarstva, pa do specijalizovanih istraživačkih baza podataka. Moglo bi se reći da se Minitel našao u mnogim francuskim domovima 10 godina pre nego što je većina Amerikanaca uopšte i čula za internet.

1.7.4 Eksplozija interneta: devedesete godine

Ulazak u devedesete godine prošlog veka je obeležen nizom događaja koji su simbolizovali kontinuiranu evoluciju i sve prisutniju komercijalizaciju interneta. Mreža ARPAnet, predak interneta, prestala je da postoji. Godine 1991. prestala su da važe ograničenja koja su se ticala komercijalnog korišćenja mreže NSFNET. Godine 1995. ova mreža je prešla u ruke komercijalnih posrednika za internet usluge, koji su tada počeli da upravljaju saobraćajem kroz ovu internetsku okosnicu.

Ipak, glavni događaj devedesetih predstavljala je pojava World Wide Web aplikacija koje su donele internet u domove i firme miliona ljudi širom sveta. Veb je poslužio i kao platforma koja je omogućila puštanje u rad stotina novih aplikacija koje svakodnevno koristimo, kao što su pretraživanje (npr. Google i Bing), internet trgovina (npr. Amazon i eBay) i društvene mreže (npr. Facebook).

Veb je između 1989. i 1991. godine u istraživačkom centru CERN izumeo Tim Berners-Li [Berners-Lee 1989] na osnovu ideja proisteklih iz prethodnih radova o hipertekstu Vanevara Buša iz četrdesetih [Bush 1945] i Teda Nelsona iz 1960-ih [Xanadu 2012]. Berners-Li i njegovi saradnici su razvili prve verzije HTML-a, HTTP-a, veb servera i pretraživača – četiri ključne komponente veba. Krajem 1993. godine već je radilo oko 200 veb servera i to je bio samo vrh ledenog brega onoga što se tek spremalo. Nekako u to vreme veliki broj istraživača već je razvijao pretraživače sa GUI interfejsima, među njima i Mark Andrisen, koji je sa Džimom Klarkom osnovao kompaniju „Mosaic Communications”, iz koje je kasnije nastala kompanija „Netscape Communications Corporation” [Cusumano 1998; Quittner 1998]. Već 1995. godine studenti su koristili Netscape pretraživače za svakodnevno krstarenje internetom. Nekako u to vreme kompanije – velike i male – počele su da koriste veb servere i obavljaju poslove preko veba. Godine 1996. Microsoft je počeo da pravi svoje pretraživače, čime je započeo rat pretraživača između Netscapea i Microsofta koji je Microsoft dobio nekoliko godina kasnije [Cusumano 1998].

Druga polovina 1990-ih je bilo doba izuzetnog rasta interneta, kao i mnogo-brojnih inovacija za koje su zaslužne velike korporacije, ali i hiljade novonastalih malih kompanija, koje su privile proizvode i usluge za internet. Krajem milenijuma, internet je podržavao stotine popularnih aplikacija, među kojima i četiri ubistvene aplikacije za:

- e-poštu, uključujući priloge i pristupanje e-porukama preko veba;
- veb, uključujući pretraživanje veba i trgovinu putem internet;

- trenutnu razmenu poruka, sa kontakt listarima;
- razmenu MP3 fajlova između ravnopravnih korišnika, predvođenu programom Napster.

Zanimljivo je i to da su prve dve ubistvene aplikacije razvili istraživački timovi, dok su druge dve delo nekolicine mladih entuzijasta.

Doba između 1995. i 2001. bilo je puno uspona i padova interneta u finansijskom smislu. Pre nego što su uopšte i počele da donose zaradu, stotine novoosnovanih preduzeća na internetu ponudilo je svoje akcije na prodaju i počelo da sa njima trguje na berzi. Vrednost mnogih kompanija je procenjena na milijarde dolara, bez ikakvih očiglednih izvora prihoda. Tokom 2000. i 2001. godine mnoge novoosnovane kompanije su ugašene. Ipak, brojne kompanije kao što su: Microsoft, Cisco, Yahoo, e-Bay, Google i Amazon isplivale su kao pobednici u ratu za prostor na internetu.

1.7.5 Novi milenijum

Inovacije u oblasti umrežavanja računara nastavljaju se velikom brzinom. Napredak se postiže na svim poljima, uključujući razmeštanje bržih ruteru i brzina prenosa u pristupnim mrežama i u okosnicama mreže. Ipak, sledeći razvoj zaslužuje posebnu pažnju.

- Još od početka novog milenijuma videli smo agresivan razvoj širokopojasnog pristupa internetu iz domova – ne samo putem kablovskega modema i DSL-a, već i putem optičkog vlakna do domaćinstava, o čemu smo govorili u odeljku 1.2. Ovaj pristup internetu velike brzine pripremio je teren za nove video aplikacije, kao što su sudjelovanje video zapisa korisnika (npr. YouTube), reprodukovanje filmova na zahtev i televizijskih emisija (npr. Netflix), kao i video konferencije sa više osoba (npr. Skype).
- Sve veća prisutnost veoma brzih (54 Mb/s i brže) javnih Wi-Fi mreža i pristupanje internetu srednjim brzinama (nekoliko Mb/s) preko 3G i 4G mreža mobilne telefonije, ne samo da omogućavaju neprekidnu povezanost sa internetom uz mobilnost, već i čitav niz novih zanimljivih usluga u zavisnosti od trenutne lokacije korisnika. Broj uređaja koji su bežičnim putem povezani na internet nadmašio je ožičene uređaje iz 2011. godine. Bežični pristup velike brzine omogućio je brzu pojavu računara koji se drže u ruci (iPhones, android uređaji, iPads i slično), i koji omogućavaju stalan i neograničen pristup internetu.
- Onlajn društvene mreže poput Facebook-a i Twitter-a kreirale su ogromne mreže ljudi preko interneta. Mnogi internet korisnici danas „žive” prvenstveno na Facebook-u. Kroz svoje interfejsne za programiranje aplikacija onlajn društvene mreže kreiraju platforme za nove mrežne aplikacije i distribuirane igre.
- Kao što smo objasnili u odeljku 1.3.3 onlajn davaoci usluga kao što su Google i Microsoft su rasporedili sopstvene ekstenzivne privatne mreže koje, ne samo da povezuju njihove globalno raspoređene centre podataka, već se koriste za

zaobilješenje interneta, što je moguće više direktnim povezivanjem sa mrežama posrednika za internet usluge nižeg reda. Kao rezultat ovoga, Google pruža gotovo odmah rezultate pretraživanja kao i pristup e-pošti, kao da se njegovi centri podataka nalaze unutar svakog računara.

- Mnoge kompanije koje trguju na internetu sada svoje aplikacije izvršavaju u „oblaku” – kao što je Amazon-ov EC2, Google-ov Application Engine, ili Microsoft-ov Azure. Mnoge kompanije i univerziteti su takođe svoje internet aplikacije preselili u oblak (npr. e-pošta i hostovanje veba). Kompanije koje rade sa oblakom omogućuju aplikacijama, ne samo da menjaju veličinu u odnosu na računarsko okruženje i veličinu skladišta, već im pružaju implicitni pristup svojim privatnim mrežama visokih performansi.

1.8 Rezime

U ovom poglavlju obuhvatili smo raznovrsne teme. Najpre smo naveli različite hardverske i softverske delove koji sačinjavaju internet i računarske mreže u celini. Pošli smo od oboda mreže, prikazujući krajnje sisteme i aplikacije, kao i uslugu prenosa koja je potrebna aplikacijama koje se izvršavaju na krajnjim sistemima. Takođe, razmotrili smo tehnologije sloja veze i fizičke medijume koji se najčešće koriste u pristupnim mrežama. Zatim smo dublje zaronili u mrežu, u jezgro mreže, i utvrdili da su komutiranje paketa i komutiranje kola dva osnovna pristupa za prenos podataka kroz telekomunikacione mreže i prikazali prednosti i mane oba pristupa. Pored toga, istražili smo strukturu globalnog interneta, saznavši da je internet mreža svih mreža. Videli smo da je hijerarhijska struktura interneta, koju sačinjavaju posrednici za internet usluge višeg i nižeg nivoa, omogućila da se internet toliko proširi da može obuhvati više hiljada mreža.

U drugom delu ovog uvodnog poglavlja istražili smo nekoliko tema koje se mogu smatrati centralnim temama umrežavanja računara. Najpre smo ispitali uzroke kašnjenja, propusnu moć i gubitke paketa u mrežama sa komutiranjem paketa. Razvili smo jednostavne kvantitativne modele kašnjenja pri prenosu, prostiranju i zbog čekanja u redu, kao i za propusnu moć, u domaćim zadacima koje ćemo vam postavljati u čitavoj knjizi, koristićemo ove modele u značajnoj meri. Zatim smo istražili slojeve protokola i modele usluga, ključne strukturalne pojmove umrežavanja na koje ćemo se stalno pozivati. Bavili smo se takođe i najčešćim napadima na bezbednost interneta. Ovaj uvod u umrežavanje završili smo kratkim istorijskim prikazom računarskih mreža. Već prvo poglavlje, samo po sebi, predstavlja skraćeni kurs o umrežavanju računara.

Kao što vidite, u prvom poglavlju obuhvatili smo dosta toga! Ukoliko ste poma-lo zbumjeni, ništa ne brinite. U narednim poglavljima vratićemo se na sve ove teme i istražiti ih mnogo podrobnije (ovo je obećanje, ne pretnja!). U ovom trenutku važno je da ste stekli osnovna znanja o elementima računarskih mreža, da ste ovladali

osnovnim izrazima koji se koriste u umrežavanju (nemojte se stideti da ono što vam ne bude jasno ponovo potražite u ovom poglavlju) i da ste voljni da o umrežavanju saznate još više. To je ono što se od nas očekuje u nastavku ove knjige.

Mapa knjige

Pre nego što krenete na put, nije loše da pre toga bacite pogled na mapu, kako biste se upoznali sa glavnim putevima i raskrsnicama koje vas očekuju. Konačni cilj našeg puta na koji se spremamo jeste dublje razumevanje čemu računarske mreže služe, kako rade i zašto to rade. Naša mapa su poglavlja ove knjige:

1. Računarske mreže i internet
2. Aplikativni sloj
3. Transportni sloj
4. Mrežni sloj
5. Sloj veze i lokalne računarske mreže
6. Bežične i mobilne mreže
7. Multimedijalno umrežavanje
8. Bezbednost u računarskim mrežama
9. Upravljanje mrežama

Poglavlja od 2 do 5 su četiri ključna poglavlja knjige. Verovatno primećujete da ova poglavlja opisuju četiri gornja sloja skupa internet protokola koji čini pet slojeva, po jedno poglavlje za svaki sloj. Zatim primećujete da naše putovanje počinje od vrha, od skupa internet protokola, tačnije, od aplikativnog sloja i da se produžava naniže. Ovakav pristup, od vrha ka dну, premenjuje se zbog toga što tek nakon što upoznamo aplikacije, možemo razumeti mrežne usluge neophodne za podršku tim aplikacijama. Potom možemo istražiti različite načine na kojese te usluge mogu realizovati mrežnom arhitekturom. Zbog toga, obrađivanje aplikacija na početku je povod za ostatak teksta.

Druga polovina knjige – poglavlja od 6 do 9 – usredsređena je na četiri veoma važne (i pomalo nezavisne) teme savremenih računarskih mreža. U poglavlju 6, ispitujemo bežične i mobilne mreže, uključujući bežične lokalne računarske mreže (uključujući Wi-Fi i Bluetooth), mreže mobilne telefonije (uključujući GSM, 3G i 4G) i mobilnost (i u IP i u GSM mrežama). U poglavlju 7 (Multimedijalno umrežavanje) istražujemo audio i video aplikacije, kao što su internet telefonija, video konferencije i protok uskladištenih medija u realnom vremenu. Takođe razmatramo kako se mreže sa komutiranjem paketa mogu projektovati da mogu obezbediti stalni kvalitet usluga audio i video aplikacijama. U poglavlju 8 (Bezbednost u računarskim mrežama), najpre se bavimo osnovama šifrovanja i mrežne bezbednosti, a zatim istražujemo kako se te osnovne teoretske postavke mogu primeniti u brojnim različitim okolnostima na internetu. U poslednjem poglavlju (Upravljanje mrežama) istražujemo ključna pitanja upravljanja mrežama, kao i osnovne internet protokole koji se za to koriste.



Domaći zadaci: problemi i pitanja

Poglavlje 1 Kontrolna pitanja

ODELJAK 1.1

- R1. U čemu je razlika između računara host-a i krajnjeg sistema? Navedite vrste krajnjih sistema. Da li je veb server krajnji sistem?
- R2. Reč *protokol* često se koristi za opisivanje diplomatskih odnosa. Navedite jedan primer diplomatskog protokola koji opisuje *Wikipedia*.
- R3. Zašto su standardi važni za protokole?

ODELJAK 1.2

- R4. Navedite šest pristupnih tehnologija. Klasifikujte ih na: pristup za domaćinstva, preduzeća, ili kao bežični pristup širokog opsega.
- R5. Da li se brzina prenosa HFC pristupnih mreža dodeljuje samo jednom korisniku, ili se deli između više njih? Da li u nizvodnom HFC kanalu može da dođe do kolizija podataka? Ako može, zašto?
- R6. Navedite koji načini za pristup internetu za domaćinstva (rezidencijalne korisnike) postoje u vašem mestu. Za sve njih navedite koju brzinu preuzimanja i slanja podataka nude i mesečnu cenu.
- R7. Koja je brzina prenosa Eternet lokalnih računarskih mreža?
- R8. Koji se fizički medijumi koriste u Eternet mrežama?
- R9. Za pristupanje domaćinstava koriste se dial-up, HFC, DSL i FTTH modemi. Za sve ove načine pristupanja navedite opseg njihovih brzina prenosa i objasnite kada se ova brzina prenosa deli između korisnika, a kada se ne deli.
- R10. Opišite najpopularnije savremene bežične tehnologije za pristup internetu. Uporedite njihove prednosti i mane.

ODELJAK 1.3

- R11. Prepostavimo da se između izvornog i odredišnog računara nalazi tačno jedan komutator paketa. Brzine prenosa između izvornog računara i komutatora i između komutatora i odredišnog računara su i_1 i i_2 , respectivno. Ukoliko prepostavimo da je reč o komutatoru koji radi po principu prenosa podataka uskladišti pa prosledi, koliko iznosi ukupno kašnjenje paketa dužine L od jednog do drugog kraja njegovog puta? (Zanemariti kašnjenja usled čekanja u redu, prostiranja i obrade.)
- R12. Koje su prednosti mreža sa komutiranjem kolau odnosu na mreže sa komutiranjem paketa? U čemu je prednost TDM tehnologije u odnosu na FDM tehnologiju u mrežama sa komutiranjem kola?
- R13. Prepostavimo da korisnici dele link brzine 2 Mb/s. Takođe, prepostavimo da je korisnicima potrebno 1 Mb/s prilikom prenosa, ali da korisnici prenose samo 20% vremena. (Pogledajte objašnjenje statističkog multipleksiranja u odeljku 1.3.)

- Koliko korisnika može da koristi ovaj link kada se koristi komutiranje kola?
- Za dalje rešavanje ovog problema, prepostavimo da se koristi komutiranje paketa. Zašto u tom slučaju praktično nema kašnjenja usled čekanja u redu pre linka, ukoliko dva ili manje korisnika istovremeno prenose podatke? Zašto nastaje kašnjenje usled čekanja u redu, ukoliko tri korisnika istovremeno prenose podatke?
- Pronadite verovatnoću da dati korisnik u određenom trenutku prenosi podatke.
- Prepostavimo da imamo tri korisnika. Pronadite verovatnoću da u bilo kom trenutku sva tri korisnika istovremeno prenose podatke. Pronadite ideo vremena kada red za čekanje raste.

R14. Zašto se dva posrednika za internet usluge istog nivoa često povezuju ravнопravno, to jest uparuju se? Kako internet tačke razmene (engl. Internet exchange points – IXP) zarađuju?

R15. Neki davaoci sadržaja su kreirali sopstvene mreže. Opišite Google-ovu mrežu. Šta motiviše davaoce sadržaja da prave ovakve mreže?

ODELJAK 1.4

- R16. Zamislite slanje više paketa od izvornog do odredišnog računara nepromenljivom putanjom. Navedite od čega se sve sastoji ukupno kašnjenje paketa od jednog do drugog kraja. Koja su kašnjenja uvek ista, a koja promenljiva?
- R17. Posetite aplet Transmission Versus Propagation Delay na veb stranici posvećenoj ovoj knjizi. Pronadite kombinaciju postojećih brzina, kašnjenja usled prostiranja i veličina paketa za koju pošiljalac završi prenos pre nego što prvi bit paketa stigne do primaoca. Pronadite još jednu kombinaciju za koju prvi bit paketa stigne do primaoca pre nego što pošiljalac završi prenos podataka.
- R18. Koliko je vremena potrebno paketu dužine 1000 bajtova da se prenesepreko linka dužine 2500 km, brzinom prostiranja $2,5 \cdot 10^8$ m/s i brzinom prenosa 2 Mb/s? U opštem slučaju, koliko je potrebno paketu dužine L da se prenese preko linka dužine d brzinom prostiranja s i brzinom prenosa Rb/s ? Da li ovakvo kašnjenje paketa zavisi od njegove dužine? Da li kašnjenje zavisi od brzine prenosa?
- R19. Prepostavimo da računar A želi da pošalje veliku datoteku do računara B. Putanja između računara A i računara B ima tri linka, brzina $R_1 = 500$ kb/s, $R_2 = 2$ Mb/s i $R_3 = 1$ Mb/s.
 - Prepostavljajući da u mreži nema drugog saobraćaja, koja je propusna moć za prenos ove datoteke?
 - Prepostavimo da datoteka ima 4 miliona bajtova. Koliko će, približno, trajati prenos te datoteke do računara B?
 - Ponovite (a) i (b), ali sada sa brzinom R_2 smanjenom na 100 kb/s.
- R20. Prepostavimo da krajnji sistem A želi da pošalje veliku datoteku do krajnjeg sistema B. Opišite, veoma uopšteno, kako krajnji sistem A pravi pakete od tedioteke. Kada neki od tih paketa stigne do komutatora paketa, koja

informacija iz paketa omogućava komutatoru da odredi kojim linkom bi trebalo da se prosledi taj paket? Zašto je komutiranje paketa slično vožnji od jednog grada do drugog i usputnim raspitivanjem za put?

- R21. Posetite aplet Queuing and Loss na veb stranici posvećenoj ovoj knjizi. Kolika je najveća brzina emitovanja podataka, a kolika je najmanja brzina prenosa? Sa tim brzinama, koliki je intenzitet saobraćaja? Pokrenite aplet sa tim brzinama i odredite koliko je vremena potrebno da se desi gubitak paketa. Zatim ponovite eksperiment još jednom i odredite ponovo koliko je potrebno da se desi gubitak paketa. Da li se ove vrednosti razlikuju? Ako se razlikuju, zašto?

ODELJAK 1.5

- R22. Navedite pet zadataka koje jedan sloj može da obavlja. Da li je moguće da jedan od tih zadataka (ili više njih) obavljaju dva sloja (ili više njih)?
- R23. Kojih su pet slojeva u skupu internet protokola? Šta su osnovna zaduženja svakog od tih slojeva?
- R24. Šta je to poruka aplikativnog sloja? Segment transportnog sloja? Datagram mrežnog sloja? Okvir sloja veze?
- R25. Koji slojevi u skupu internet protokola obavljaju postupak rutiranja? Koji slojevi obavljaju postupak komutiranja sloja veze? U kojim slojevima su smešteni aplikativni procesi?

ODELJAK 1.6

- R26. U čemu je razlika između virusa i crva?
- R27. Opišite kako se pravi mreža pod opsadom i kako se koristi za DDoS napad?
- R28. Pretpostavimo da Alisa i Bob šalju pakete jedno drugom preko računarske mreže. Pretpostavimo da se Trudi postavi na mrežu tako da može da prihvati sve pakete koje Alisa šalje i da Bobu šalje samo one pakete koje ona želi; takođe, može da prihvati sve pakete koje šalje Bob i da Alisi pošalje samo one pakete koje želi. Navedite šta sve zlonamerno može da uradi Trudi sa tog mesta.



Problemi

- P1. Projektujte i opišite protokol aplikativnog sloja koji će se koristiti između automatskog bankomata i centralnog računara banke. Vaš protokol bi trebalo da omogući proveru korisnikove kartice i lozinke, zatim proveru njegovog računa (koji se čuva na centralnom računaru), kao i povlačenje određenog novčanog iznosa sa datog računa (odnosno, isplatu novca korisniku). Elementi vašeg protokola bi trebalo da budu u stanju da izađu na kraj sa veoma čestom pojmom da je traženi iznos veći od onog koji je na računu.

Protokol uboličite navodenjem poruka koje će biti razmenjene kao i akcije koje bi bankomat i centralni računar trebalo da preduzmu, kada dobiju ove poruke. Skicirajte rad svog protokola za slučaj jednostavnog povlačenja bez grešaka i nacrtajte dijagram koji je sličan onome sa slike 1.2. Izričito navedite prepostavke koje vaš protokol pravi u vezi sa transportnom uslugom nižeg sloja, na kojoj se zasniva, od jednog do drugog kraja.

- P2. Jednačina 1.1 prikazuje formulu za kašnjenje s jednog na drugi kraj prilikom slanja jednog paketa dužine L pomoću N linkova brzine prenosa R . Uopštite ovu formulu za slanje P ovakvih paketa pomoću N linkova.
- P3. Zamislite aplikaciju koja svoje podatke prenosi ustaljenom brzinom (na primer, pošiljalac stvara N bitova svakih k vremenskih jedinica, gde je k kratak i nepromenljiv vremenski period). Takođe, pošto se pokrene, ova aplikacija nastavlja da radi relativno duži vremenski period. Odgovorite na sledeća pitanja i ukraško obrazložite svoje odgovore:
- Da li bi za ovu aplikaciju bila podesnija mreža sa komutiranjem paketa, ili mreža sa komutiranjem kola? Zašto?
 - Pretpostavimo da se koristi mreža sa komutiranjem paketa i da sav saobraćaj u njoj potiče od više opisanih aplikacija. Pored toga, pretpostavimo da je suma brzina podataka aplikacija manja od kapaciteta svakog i svih linkova. Da li je u mreži potreban neki mehanizam za kontrolu zagušenja? Zašto?
- P4. Vratimo se za trenutak na mrežu sa komutiranjem kola sa slike 1.13. Podsećamo vas da u njoj svaki link ima 4 kanala. U smeru kazaljke na satu označite četiri komutatora slovima: A, B, C i D.
- Koliko se najviše istovremenih veza može ostvariti u bilo kom trenutku u ovoj mreži?
 - Pretpostavimo da su sve veze uspostavljene između komutatora A i C. Koliko se najviše istovremenih veza može uspostaviti?
 - Pretpostavimo da želite da uspostavite četiri veze između komutatora A i C, i još četiri veze između komutatora B i D. Da li ove pozive možemo rutirati kroz ova četiri linka kako bismo uspostavili svih osam veza?

- P5. Podsetite se poređenja sa karavanom automobila iz odeljka 1.4.

Pretpostavimo ponovo da je brzina kretanja 100 km/h.

- Uzmimo da karavan putuje 150 kilometara, kreće ispred jedne naplatne rampe, prođe kroz drugu i svoj put završi neposredno posle treće naplatne rampe. Koliko je kašnjenje od jednog do drugog kraja?
- Ponovo odgovorite na pitanja pod (a), ali ovog puta uz pretpostavku da je u karavanu osam automobila umesto deset.

Vi e nap mene: spiti anje kašnjenja usle pr stiranja i pren sa

- P6. Ovim elementarnim problemom započinjemo istraživanje kašnjenja usled prostiranja i kašnjenja usled prenosa, dva središnja pojma u umrežavanju. Zamislite dva računara, A i B, povezana jednim linkom, čija je brzina prenosa R b/s. Prepostavimo da su ova dva računara međusobno udaljena m metara i da je brzina prostiranja duž tog linka s metara u sekundi. Računar A šalje paket veličine L bitova računaru B.
- Izrazite kašnjenje usled prostiranja d_{pros} u zavisnosti od m i s .
 - Odredite trajanje prenosa paketa d_{prenos} u zavisnosti od L i R .
 - Zanemarujući kašnjenja usled obrade i čekanja u redu, napišite izraz za kašnjenje od jednog do drugog kraja.
 - Prepostavimo da računar A počne sa prenosom paketa u trenutku $t = 0$. Gde se nalazi poslednji bit tog paketa u trenutku $t = d_{\text{prenos}}$?
 - Prepostavimo da je d_{pros} veće od d_{prenos} . Gde se nalazi prvi bit paketa u trenutku $t = d_{\text{prenos}}$?
 - Prepostavimo da je d_{pros} manje od d_{prenos} . Gde se nalazi prvi bit paketa u trenutku $t = d_{\text{prenos}}$?
 - Prepostavimo da je $s = 2,5 \cdot 10^8$, $L = 100$ bitova, a $R = 56$ kb/s. Odredite udaljenost m tako da d_{pros} bude jednak d_{prenos} .
- P7. U ovom problemu razmatramo slanje glasa u realnom vremenu od računara A do računara B kroz mrežu sa komutiranjem paketa (VoIP). Računar A u hodu pretvara analogni signal glasa u digitalni niz bitova od 64 kb/s, a zatim ove bitove grupiše u pakete od 56 bajtova. Između računara A i računara B postoji samo jedan link čija je brzina prenosa 2 Mb/s, a kašnjenje usled prostiranja 10 ms. Čim napravi paket, računar A ga odmah šalje računaru B. Čim računar B primi čitav paket, on njegove bitove pretvara u analogni signal. Koliko vremena prolazi od trenutka kada se neki bit napravi (od prvobitnog analognog signala na računaru A) do trenutka kada se taj bit dekoduje (u deo analognog signala na računaru B)?
- P8. Prepostavimo da više korisnika deli link brzine 3 Mb/s. Takođe, prepostavimo da svaki korisnik zahteva 150 kb/s prilikom prenošenja podataka, ali da je svaki korisnik aktivan samo 10 procenata vremena. (Pročitajte deo o razlici između komutiranja paketa i komutiranja kola u odeljku 1.3.)
- Ako se koristi komutiranje kola, koliko korisnika može da bude podržano?
 - U nastavku ovog zadatka prepostavimo da se koristi komutiranje paketa. Odredite verovatnoću da određeni korisnik prenosi podatke.
 - Prepostavimo da u mreži ima 120 korisnika. Odredite verovatnoću da u određenom trenutku tačno n korisnika istovremeno prenosi podatke. (Savet: koristite binomijalnu raspodelu.)
 - Odredite verovatnoću da 21 ili više korisnika istovremeno prenosi podatke.

- P9. Vratimo se za trenutak na odeljak 1.3 koji se bavi razlikom između komutiranja paketa i komutiranja kola u kome smo naveli primer linka brzine 1 Mb/s. Korisnici prenose podatke brzinom 100 kb/s kada rade, ali verovatnoća da korisnici prenose podatke iznosi samo $p = 0,1$. Prepostavimo sada da je link od 1 Mb/s zamjenjen linkom od 1 Gb/s.
- Koliko iznosi N , odnosno najveći broj korisnika koji se mogu uslužiti istovremeno, ukoliko se koristi komutiranje kola?
 - Sada prepostavite da se koristi komutiranje paketa i da postoji M korisnika. Napišite formulu (u funkciji od p , M , N) za izračunavanje verovatnoće da više od N korisnika šalje svoje podatke.
- P10. Zamislite paket dužine L koji nastaje u krajnjem sistemu A, putuje preko tri linka do odredišnog krajnjeg sistema. Ova tri linka su povezana pomoću dva komutatora paketa. Označimo redom sa: d_i, s_i, R_i dužinu, brzinu prostiranja i brzinu prenosa linka i , za $i = 1, 2, 3$. Kašnjenje obrade komutatora paketa je d_{obrade} . Pod prepostavkom da ne postoji kašnjenje usled čekanja u redu, koliko je ukupno kašnjenje paketa od jednog do drugog kraja u zavisnosti od d_i, s_i, R_i ($i = 1, 2, 3$) i L ? Prepostavimo sada da je paket veličine 1500 bajtova, brzina prostiranja sva tri linka jednaka $2,5 \cdot 10^8$ m/s, brzina prenosa sva tri linka je 2 Mb/s, kašnjenje usled obrade komutatora paketa je 3 msec, dužina prvog linka je 5000 km, a dužina drugog linka je 4000 km, dok je dužina poslednjeg linka 1000 km. Koliko je kašnjenje od jednog do drugog kraja za ove vrednosti?
- P11. U prethodnom problemu, prepostavimo da je $R_1 = R_2 = R_3 = R$ i da je $d_{\text{obrade}} = 0$. Prepostavimo dalje da komutator paketa ne radi po principu uskladišti pa prosledi, već da odmah prosleđuje svaki bit koji primi, ne čekajući da stigne čitav paket. Koliko je kašnjenje od jednog do drugog kraja?
- P12. Komutator paketa prima paket i određuje izlazni link na koji bi taj paket trebalo da prosledi. Kada paket stigne, neki drugi paket je do pola poslat tim izlaznim linkom, a četiri druga paketa čekaju da budu prosleđena. Paketi se prenose redom kojim su pristigli. Prepostavimo da su svi paketi od 1500 bajtova i da je brzina linka 2 Mb/s. Koliko iznosi vreme kašnjenja usled čekanja u redu za taj paket? U opštem slučaju, koliko iznosi kašnjenje usled čekanja u redu kada su svi paketi dužine L , brzina prenosa je R , x bitova paketa koji se trenutno prenosi je već preneto, a u redu za čekanje se već nalazi n paketa?
- P13. (a) Prepostavimo da N paketa istovremeno stiže na link u kome trenutno nema nijednog paketa koji se prenosi, ili čeka u redu. Svi paketi su dužine L , a link ima brzinu prenosa R . Koliko iznosi prosečno kašnjenje usled čekanja u redu za N paketa?
(b) Prepostavimo da N paketa istovremeno pristiže nalik svakih LN/R sekundi. Koliko je prosečno kašnjenje usled čekanja u redu paketa.

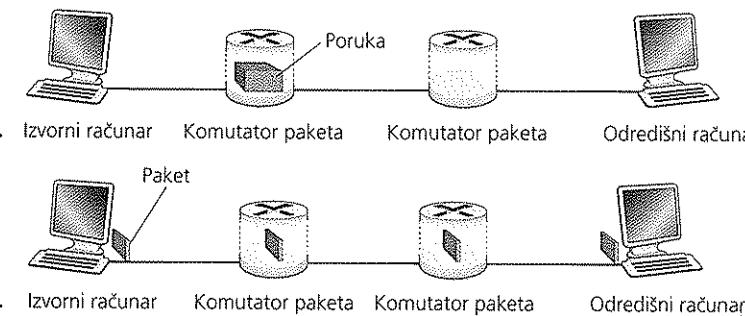
- P14. Razmatramo kašnjenje usled čekanja u redu u baferu rutera. Sa I označimo intenzitet saobraćaja; to jest, $I = La/R$. Prepostavimo da je kašnjenje usled čekanja u redu jednako IL/R ($1 - I$) za $I < 1$.
- Napišite jednačinu za ukupno kašnjenje, to jest, zbir kašnjenja usled čekanja u redu i kašnjenja usled prenosa.
 - Nacrtajte dijagram ukupnog kašnjenja u zavisnosti od L/R .
- P15. Označimo sa a brzinu pristizanja paketa na link u paketima/sekundi, a sa μ brzinu prenosa linka u paketima/sekundi. Na osnovu formule za ukupno kašnjenje (tj. kašnjenje usled čekanja u redu plus kašnjenje usled prenosa) izvedene u prethodnom problemu, izvedite formulu za ukupno kašnjenje u zavisnosti od a i μ .
- P16. Uzmite u obzir bafer rutera koji prethodi izlaznom linku. U ovom problemu, koristite Litlovu formulu, čuvenu jednačinu u teoriji redova čekanja. Označimo sa N zbir prosečnog broja paketa u baferu i paketa koji se trenutno prenose. Sa a ćemo označiti brzinu pristizanja paketa na link. Označimo sa d prosečno ukupno kašnjenje po paketu (tj. kašnjenje usled čekanja u redu plus kašnjenje usled prenosa). Litlova jednačina je $N = a \cdot d$. Prepostavimo da se u baferu nalazi 10 paketa, a da je prosečno kašnjenje paketa usled čekanja u redu 10 ms. Brzina prenosa linka je 100 paketa/sekundi. Koristeći Litlovu formulu, pod pretpostavkom da nema gubitaka paketa, kolika je prosečna brzina pristizanja paketa?
- P17. a. Uopštite formulu 1.2 u odeljku 1.4.3 za različite brzine obrade, brzine prenosa i kašnjenja usled prostiranja.
 b. Uradite ponovo deo pod (a), ali sada pretpostavite da postoji i prosečno kašnjenje usled čekanja u redu d_{red} u svakom čvoru.
- P18. Programom *Traceroute* u tri različita doba dana testirajte vezu između izvornog i odredišnog računara na istom kontinentu.
- Odredite prosečnu vrednost i standardnu devijaciju kašnjenja povratnog puta na svaka tri sata.
 - Ustanovite broj rutera na putanji na svaka tri sata. Da li se putanje menjaju za neki od ovih rezultata?
 - Pokušajte da identifikujete broj ISP mreža kroz koje paketi programa Traceroute prolaze na svom putu od izvora do odredišta. Rutere sličnih imena i (ili) sličnih IP adresa trebalo bi smatrati delom mreže istog posrednika za internet usluge. Da li se u vašim eksperimentima najduža kašnjenja javljaju na tačkama povezivanja susednih posrednika za internet usluge?
 - Ponovite prethodne zadatke, ali sada za izvorne i odredišne računare na različitim kontinentima, a zatim uporedite dobijene vrednosti za isti kontinent i dobijene vrednosti za različite kontinente.
- P19. (a) Posetite veb stranu www.traceroute.org i programom *Traceroute* testirajte vezu između dva različita grada u Francuskoj i istog odredišnog računara u Sjedinjenim Državama. Koliko linkova je isto na ovoj putanji? Da li je prekoatlantski link isti?

- Ponovite primer pod (a), ali ovog puta izaberite jedan grad u Francuskoj i još jedan u Nemačkoj.
 - Izaberite grad u Sjedinjenim Državama i testirajte vezu do dva računara, u dva različita grada u Kini. Koliko linkova je zajedničko na ove dve putanje? Da li se dve putanje razilaze pre nego što stignu do Kine?
- P20. Razmotrite primer za propusnu moć koja odgovara slici 1.20 (b). Sada prepostavimo da umesto 10 parova postoji M parova klijent-server. Sa R_s , R_c i R označite brzine linkova servera, linkova klijenata i mrežnih linkova. Prepostavimo da svi ostali linkovi imaju dovoljan kapacitet i da u mreži ne postoji drugi saobraćaj, osim onog koji stvara M parova klijent-server. Izvedite opštu jednačinu za propusnu moć u zavisnosti od R_s , R_c , R i M .
- P21. Uzmimo u obzir sliku 1.19 (b). Prepostavimo da postoji M putanja između servera i klijenta. Nijedna od dve putanje ne deli link. Putanja k ($k = 1, \dots, M$) se sastoji od N linkova prezina prenosa $R_1^k, R_2^k, \dots, R_N^k$. Ukoliko server može da koristi samo jednu putanju za slanje podataka do klijenta, kolika je maksimalna propusna moć koju server može da postigne? Ako server može da koristi sve M putanje za slanje podataka, kolika je maksimalna propusna moć koju server može da postigne?
- P22. Pogledajte sliku 1.19 (b). Prepostavimo da svaki link između servera i klijenta ima verovatnoću gubitka paketa p , i da je verovatnoća gubitka paketa ovih linkova nezavisna. Koja je verovatnoća da paket (poslat od strane servera) prijemnik uspešno primi? Server će ponovo prenositi paket, ako se paket izgubi na putanji od servera do klijenta. Koliko prosečno puta će server ponovo prenositi paket kako bi klijent uspešno primio paket?
- P23. Pogledajte sliku 1.19 (a). Prepostavimo sada da znamo da je link koji predstavlja usko grlo na putanji od servera do klijenta prvi link čija je brzina bitova/sekundi. Prepostavimo da šaljemo parove paketa od servera do klijenta i nazad, i da nema drugog saobraćaja na putanji. Prepostavimo da je svaki paket veličine L bitova, i da je kašnjenje usled prostiranja d_{pros} isto za oba linka.
- Koliko iznosi vreme između pristizanja ovih paketa na odredište? Odnosno, koliko vremena protekne od trenutka kada stigne poslednji bit prvog paketa do trenutka kada stigne poslednji bit drugog paketa?
 - Sada prepostavimo da drugi link predstavlja usko grlo (tj. $R_c < R_s$). Da li je moguće da drugi paket čeka na početku drugog linka? Objasnite. Sada prepostavimo da server šalje drugi paket T sekundi pošto posalje prvi paket. Koliko T mora da iznosi kako ne bi bilo čekanja u redu pre drugog linka? Objasnite.
- P24. Prepostavimo da hitno želite da isporučite 40 terabajtova podataka iz Bostona do Los Andelesa. Na raspolaženju vam je posvećen link brzine 100 Mb/s za prenos podataka. Da li ćete se odlučiti za prenos podataka putem ovog linka, ili ćete koristiti FedEx-ovu isporuku preko noći? Objasnite.

- P25. Prepostavimo da su dva računara, A i B, međusobno udaljena 20 000 kilometara i da su povezani direktnim linkom brzine $R = 2 \text{ Mb/s}$. Prepostavimo da je brzina prostiranja preko tog linka iznosi $2,5 \cdot 10^8 \text{ metara u sekundi}$.
- Izračunajte proizvod propusnog opsega i kašnjenja, $R \cdot d_{\text{pros}}$.
 - Od računara A do računara B bi trebalo poslati datoteku od 800 000 bitova. Prepostavimo da se ova datoteka šalje neprekidno kao jedna velika poruka. Koliko će se najviše bitova nalaziti na linku u određenom trenutku?
 - Protumačite značenje proizvoda propusnog opsega i kašnjenja.
 - Kolika je dužina bitova (u metrima) na linku? Da li je veća od fudbal-skog igrališta?
 - Izvedite opšti izraz za izračunavanje dužine bitova u zavisnosti od brzine prostiranja s , propusnog opsega R i dužine linka m .
- P26. Na osnovu problema P25, prepostavimo da možemo da izmenimo R . Za koju vrednost R je dužina bita jednaka dužini linka?
- P27. Ponovo se vraćamo na problem P25, ali sada sa linkom $R = 1 \text{ Gb/s}$.
- Izračunajte proizvod propusnog opsega i kašnjenja, $R \cdot d_{\text{pros}}$.
 - Uzmimo da bi od računara A do računara B trebalo da se pošalje datoteka od 800 000 bitova. Prepostavimo da se ta datoteka šalje neprekidno kao jedna velika poruka. Koliko najviše bitova može biti na linku u danom trenutku?
 - Kolika je dužina bitova (u metrima) na linku?
- P28. Ponovo se vratite na problem P25.
- Koliko traje slanje datoteke pod pretpostavkom da se šalje neprekidno?
 - Prepostavimo sada da je datoteka razbijena na 20 paketa od po 40 000 bitova. Prepostavimo da primalač potvrđuje prijem svakog paketa i da je trajanje prenosa potvrde prijema paketa zanemarljivo. Konačno, prepostavimo i to da pošiljalac ne može da pošalje sledeći paket sve dok ne dobije potvrdu o prijemu prethodnog. Koliko traje slanje ove datoteke?
 - Uporedite rezultate pod (a) i (b).
- P29. Prepostavimo da između geostacionarnog satelita i njegove bazne stanice na Zemlji postoji mikrotalasni link brzine prenosa 10 Mb/s . Svakog minuta satelit snima po jednu digitalnu fotografiju i šalje je baznoj stanici. Prepostavićemo da brzina prostiranja iznosi $2,4 \cdot 10^8 \text{ metara u sekundi}$.
- Koliko iznosi kašnjenje usled prostiranja ovog linka?
 - Izračunajte proizvod propusnog opsega i kašnjenja, $R \cdot d_{\text{pros}}$.
 - Sa x označimo veličinu fotografije. Koja je najmanja vrednost x sa kojom mikrotalasni link vrši neprekidan prenos?
- P30. Vratimo se na poređenje sa avionskim transportom u delu o slojevima iz odeljka 1.5 i dodavanju zaglavja jedinicama podataka protokola na njihovom putu naniže kroz skup protokola. Postoji li nešto što odgovara informa-

cijama zaglavja što se dodaje putnicima i prtljagu dok se oni kreću naniže, sledeći pravila avionskog transporta?

- P31. U savremenim mrežama sa komutiranjem paketa, uključujući i internet, izvorni računar deli dugačke porukе aplikativnog sloja (na primer, sliku ili muzičku datoteku) na manje pakete i te pakete šalje kroz mrežu. Primalac te pakete sastavlja i tako dobija izvornu poruku. Ovaj postupak nazvali smo *segmentiranje poruka*. Na slici 1.27 je prikazan transport poruke od jednog do drugog kraja sa i bez segmentiranja poruke. Zamislite da od izvornog do odredišnog računara sa slike 1.27 bi trebalo poslati poruku dužine $8 \cdot 10^6$ bitova. Prepostavimo da svaki link ima brzinu prenosa od 2 Mb/s . Zanemarujemo kašnjenja usled prostiranja, čekanja u redu i obrade.
- Razmotrimo primer slanja poruke od izvora do odredišta bez segmentiranja poruke. Koliko je vremena potrebno da poruka stigne do prvog komutatora? Imajući u vidu to da svi komutatori koriste komutiranje paketa po principu prenosa podataka uskladišti pa prosledi, koliko je ukupno vremena potrebno za prebacivanje poruke od izvornog do odredišnog računara?
 - Prepostavimo sada da je ova poruka segmentirana na 800 paketa, pri čemu je svaki paket dužine 10 000 bitova. Koliko je vremena potrebno za prenos prvog paketa od izvornog računara do prvog komutatora? Čim se prvi paket pošalje od prvog komutatora ka drugom komutatoru, drugi paket se šalje od izvornog računara ka prvom komutatoru. U kom trenutku će drugi paket u potpunosti dospeti do prvog komutatora?
 - Koliko je vremena potrebno za prenos datoteke od izvornog do odredišnog računara ukoliko se koristi segmentiranje poruke? Uporedite ovaj rezultat sa odgovorom pod (a) i prokomentarišite.



Slika 1.27 ♦ Transport poruke od jednog do drugog kraja: (a) bez segmentiranja poruke (b) sa segmentiranjem poruke

- d. Pored smanjenja kašnjenja, navedite razloge za segmentiranje poruka.
e. Navedite nedostatke segmentiranja poruke.
- P32. Eksperimentišite malo sa apletom Message Segmentation koji ćete pronaći na veb stranici posvećenoj ovoj knjizi. Da li kašnjenja u ovom apletu odgovaraju kašnjenjima iz prethodnih problema? Na koji način kašnjenja usled prostiranja kroz link utiču na ukupno kašnjenje od jednog do drugog kraja kada se koristi komutiranje paketa (sa segmentiranjem poruka), a kako kada se koristi komutiranje poruka?
- P33. Prepostavimo da bi od računara A do računara B trebalo poslati veliku datoteku od F bitova. Između računara A i B postoje tri linka (i dva komutatora), pri čemu linkovi nisu zagušeni (to jest, nema kašnjenja usled čekanja u redu). Računar A deli datoteku na segmente od po S bitova i svakom segmentu dodaje zaglavje od 80 bitova, čime se dobijaju paketi dužine $L = 80 + S$ bitova. Brzina prenosa svakog linka iznosi R b/s. Pronadite vrednost veličine segmenta S za koju je kašnjenje najmanje prilikom prenosa datoteke sa računara A na računar B. Zanemarite kašnjenje usled prostiranja.
- P34. Skajp nudi uslugu koja dozvoljava telefoniranje sa personalnog računara na običan telefon. To znači da glasovni poziv mora da se prosledi preko interneta i preko telefonske mreže. Objasnite kako se ovo postiže.

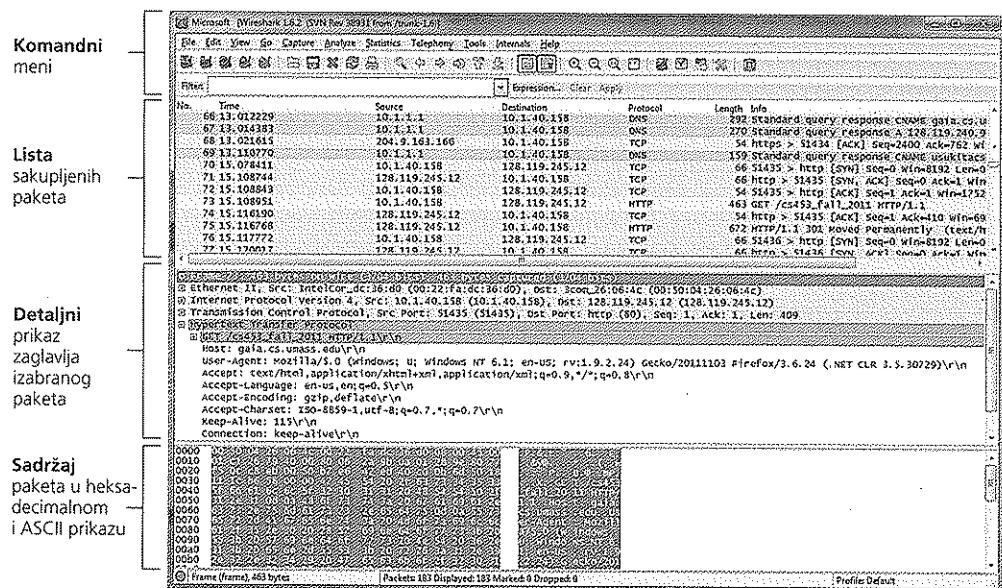
Wireshark laboratorijska vežbanja

„Kaži mi i zaboraviću. Pokaži mi i zapamtiću. Uključi i mene u rad i razumeću.“
Kineska poslovica

Razumevanje mrežnih protokola često zavisi od toga da li ste bili u prilici da ih vidite na delu i da se pojgrate se sa njima – prateći razmenu poruka između dva mrežna entiteta, ulazeći dublje u način rada protokola, pokretanje protokola da urade određene stvari i nadgledanje kako to rade i koje su posledice toga. Ovo se može učiniti simuliranjem, ili u stvarnom mrežnom okruženju kao što je internet. U Java apletima na pratećoj veb lokaciji ove knjige koristi se prvo rešenje, dok se u Wireshark laboratorijskim vežbanjima koristi drugo. Pokretaćeće mrežne aplikacije u različitim situacijama na svom računaru na poslu, kod kuće ili u laboratoriji. Pratićeće rad mrežnih protokola na računaru koji će razmenjivati poruke sa protokolima koji se izvršavaju negde na internetu. Prema tome, vi i vaš računar bićete sastavni delovi ovih živih laboratorijskih vežbi. Posmatraćete – i učiti – radeći.

Osnovna alatka za praćenje razmenjenih poruka između pokrenutih protokola naziva se **sakupljač paketa** (eng. packet sniffer). Kao što iz naziva ove alatke možete da zaključite ona pasivno kopira (sakuplja) poruke koje se šalju od strane vašeg računara ili ka njemu. Osim toga, ova alatka prikazuje sadržaj različitih polja protokola ovako sakupljenih poruka. Na slici 1.28 prikazan je snimak radne povr-

šine sakupljača paketa *Wireshark*. U pitanju je besplatan program koji može da se izvršava na računarama pod operativnim sistemima Windows, Linux/Unix i Mac. U ovoj knjizi pronaći ćete *Wireshark* laboratorijska vežbanja pomoću kojih ćete istražiti veliki broj protokola pomenutih u određenom poglavljju. U prvom vežbanju najpre ćete da nabavite i instalirate kopiju programa *Wireshark*, pristupiće nekoj veb lokaciji kako biste prikupili i ispitali poruke protokola koje razmenjuju vaš veb čitač i odgovarajući veb server.



Slika 1.25 ◇ Slika radne površine programa Wireshark (odobreno od strane Wireshark fondacije)

Sve detalje u vezi sa ovim prvim *Wireshark* vežbanjem (uključujući i uputstva o tome kako da nabavite i instalirate *Wireshark*) nalaze se na veb adresi <http://www.awl.com/kurose-ross>.

Leonard Kleinrock

Leonard Kleinrock je profesor računarskih nauka na Univerzitetu Kalifornija – UCLA u Los Andelesu. Njegov računar na ovom univerzitetu je 1969. godine postao prvi čvor interneta. Pravila komutiranja paketa koja je stvorio 1961. godine postala su tehnologija na kojoj se zasniva internet. Diplomirao je na Gradskom koledžu u Njujorku (CCNY), dok je magistarske i doktorske studije iz oblasti elektrotehničkog inženjerstva završio na MIT-u.



Zbog čega ste se opredelili za specijalizaciju u oblasti tehnologije umrežavanja i interneta?

Na doktorskim studijama na MIT-u 1959. godine primetio sam da se većina mojih kolega opredelila za teoriju informacija i teoriju kodovanja. Na MIT-u je radio Klod Šenon (Claude Shannon), izuzetan istraživač, koji je pokrenuo ove oblasti i sâm već rešio mnoge značajne probleme. Preostali istraživački problemi bili su teški i nisu bili toliko značajni. Zato sam odlučio da sâm pokrenem novu oblast – nešto čime se do tada нико nije bavio. Podsećam vas da sam na MIT-u bio okružen velikim brojem računara i ubrzo mi je postalo jasno da bi svi ti računari trebalo da komuniciraju. U to vreme jednostavno nije postojao način da se to ostvari, tako da sam odlučio da razvijem tehnologiju koja bi omogućila stvaranje efikasnih i pouzdanih mreža za protok podataka.

Šta je bio vaš prvi posao u računarskoj industriji? Kako je on izgledao?

Između 1951. i 1957. sam kao student posećivao večernja predavanja elektrotehničkog inženjerstva na Siti koledžu u Njujorku. Tokom dana sam radio, najpre kao tehničar, a zatim i kao inženjer, u maloj firmi za industrijsku elektroniku po imenu „Photobell“. Radeći za tu firmu i njihovu proizvodnu liniju, uveo sam digitalnu tehnologiju. U osnovi, koristili smo fotoelektrične uređaje za detektovanje prisustva određenih objekata (kutija, ljudi i slično). Električna kola poznata pod nazivom *bistabilni multi vibratori* bila su upravo ona vrsta tehnologije koja nam je bila potrebna za uvođenje digitalne obrade u ovu oblast. Ispostavilo se da su ova kola postala osnovni delovi računara, a danas se u žargonu nazivaju *flip-flopovi* ili *prekidači* (preklopnići).

O čemu ste razmišljali prilikom slanja prve poruke od računara do računara (iz Univerziteta UCLA ka Istraživačkom institutu Stanford)?

Iskreno, nismo bili svesni važnosti događaja. Nismo bili pripremili posebnu poruku od istorijskog značaja poput mnogih drugih pronalazača u prošlosti (Semjuel Mors sa: „Šta je Bog prouzrokovao“ – staroengleski: „What hath God wrought“, ili Aleksander Graham Bel sa: „Votsone, dodi ovamo! Potreban si mi“; ili Nil Armstrong sa: „Ovo je mali korak za čoveka, ali veliki za čovečanstvo“). Ti ljudi su bili *pametni!* Razumeli su medije i odnose sa javnošću. Sve što smo mi želeli bilo je da se prijavimo na računar Standford

Univerziteta. Stoga sam otkucao: „L“, što je pravilno prihvaćeno, otkucali smo: „o“, koje je prihvaćeno i zatim smo otkucali: „g“ (engl. *log* – prijaviti se) što je dovelo do pada sistema računara na Standfordu! Prema tome, ispalio je da je naša poruka nazvana: „Lo“, bila najkraća i možda najproročanskija poruka ikad, kao u poruci: „Pogledaj i opazi!“ (staroengleski izraz „*Lo and behold*“ koji se koristi za izražavanje iznenadenja).

Nešto ranije iste godine, u jednom saopštenju za javnost Univerziteta UCLA rekao sam da će odmah nakon podizanja i puštanja u rad računarskih mreža, biti moguće pristup računarima iz naših domova ili kancelarija i da će to biti isto onoliko jednostavno koliko i korišćenje električne ili telefonske mreže. Dakle, još tada sam imao viziju o tome da će internet biti svuda prisutan, stalno dostupan svakome ko ima neki uređaj za povezivanje. Ipak, nikada ne bih mogao da prepostavim da će danas čak i moja 99-godišnja majka koristiti internet, što ona zaista čini.

Kako izgleda vaša vizija budućnosti umrežavanja?

Najjasniji deo moje vizije jeste predviđanje same infrastrukture. Videćemo značajan razvitak računarstva u pokretu, mobilnih uređaja i inteligentnih prostora. Dostupnost lakih, jefтинih i moćnih prenosivih računara i komunikacionih uređaja, kao i sveprisutnost interneta omogućili su nam da budemo u pokretu.

Pojam računarstvo u pokretu odnosi se na tehnologiju koja omogućava krajnjim korisnicima da, putujući od jednog do drugog mesta na jednostavan način ostvaruju pristup internet uslugama, bez obzira na to gde putuju i koji uređaj nose, ili kom uređaju imaju pristup. Teži deo moje vizije jeste predviđanje aplikacija i usluga koje će stalno iznenađivati na dramatične načine (e-pošta, tehnologije za pretraživanje, veb, blogovi, društvene mreže, generacija korisnika, kao i deljenje muzike, fotografija, video zapisa itd.). Nadomak smo nove klase iznenadujućih i inovativnih mobilnih aplikacija koje se isporučuju na naše uređaje koje možemo držati u ruci.

Sledeći korak će nam omogućiti iskorak iz nestvarnog virtuelnog prostora u stvarni svet inteligentnog prostora. Naše okruženje (stolovi, zidovi, vozila, satovi, kaiševi i tako dalje) oživeće kroz tehnologiju: aktuatora, senzora, logike, obrade, skladištenja, kamere, mikrofona, zvučnika, ekrana i komunikacije. Ova ugrađena tehnologija će omogućiti našem okruženju da nam obezbedi IP usluge koje želimo. Kada uđem u sobu, soba će znati da sam to učinio. Moći će da komuniciram sa svojim okruženjem prirodno, služeći se pri tom govorom – engleskim jezikom; moji zahtevi će generisati odgovore koji će mi biti predstavljeni u vidu veb stranica na zidnim ekranima, u mojim naočarima, kao govor, ili u obliku holograma i tako dalje.

Gledajući još dalje u budućnost, umrežavanje vidim sa još nekim dodatnim ključnim komponentama. Vidim inteligentne softverske mrežne agente čiji su zadaci: skupljanje podataka, reagovanje na prikupljene podatke, praćenje trendova i dinamičko i adaptivno izvršavanje zadataka. Vidim mnogo veći obim mrežnog saobraćaja koji ne generišu ljudi, već ti ugrađeni uređaji i inteligentni softverski agenti. Ovu ogromnu mrežu kontrolisace veliki skupovi samoorganizujućih sistema. Kroz ovu mrežu istovremeno će se kretati ogromna količina informacija koje će prolaziti kroz izuzetno obimnu obradu i filtriranje. Internet će u osnovi predstavljati nervni sistem koji sve prožima. Sve ove i mnoge druge stvari vidim na našem putu kroz 21. vek.