



Računarske mreže i internet

Današnji internet je, sa milionima povezanih računara, komunikacionih linkova i komutatora; milijardama korisnika koji se povezuju putem prenosivih računara, tableta i pametnih telefona; i nizom novih povezanih uređaja: senzora, veb kamera, igračkih konzola, okvira za slike, pa čak i već 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, odgovori 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, ispitaćemo osnovne hardverske i softverske komponente koje čine računarsku mrežu. Počecemo 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. Ispitaćemo 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 kraćom istorijom računarskih mreža.

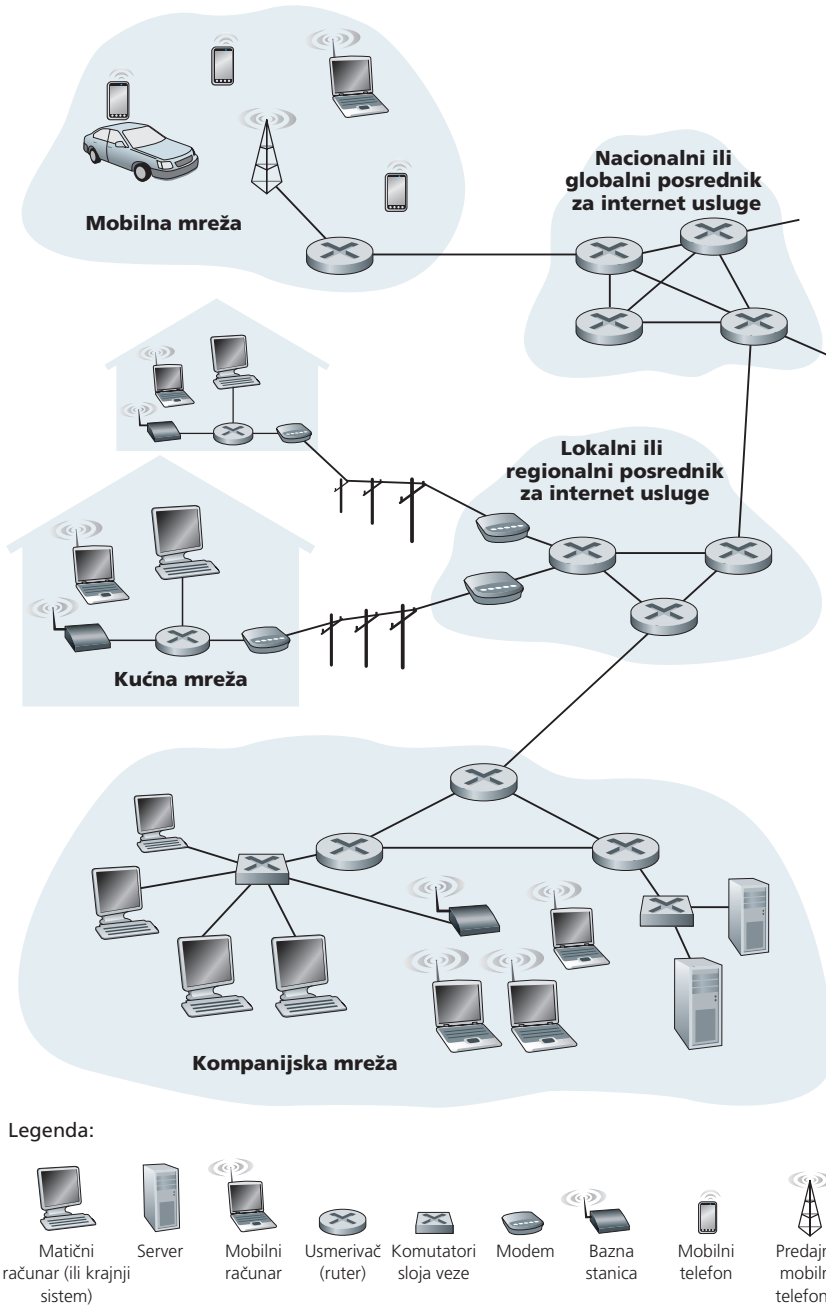
1.1 Šta je internet?

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 stanice 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 neobičajenih 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 kaksijalni 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** (sviće- vi). 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 Cisco [Cisco VNI 2011] procenjuje da će globalni internet saobraćaj u 2012. godini biti blizu 40 egzabajtova 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 raskrsnica 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 zgrada- ma. 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 detaljnije obrađujemo 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 šta 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 nazivaju 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 zapisa, 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 podrobnije šta podrazumevamo pod infrastrukturom koja određenim aplikacijama obezbeđuje određene usluge. Pretpostavimo da imate novu sjajnu ideju za distribuiranu internet aplikacije 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 podrobnije razmatramo u poglavlju 2. Za sada ćemo se poslužiti jednostavnim poređenjem kakva inače često koristimo u ovoj knjizi. Pretpostavimo 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 koverta, zatvori kovertu, zalepi markicu u gornji desni ugao koverta 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 poštuje 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 opisujemo u poglavlju 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 zbunjeni time šta 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 zbunjeni 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?

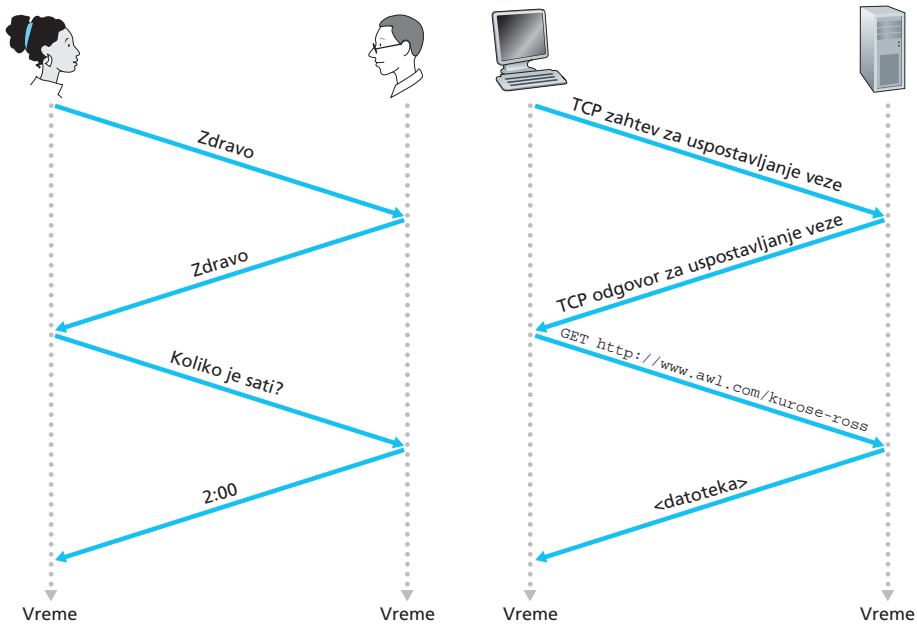
Pošto sada imamo osnovnu predstavu o tome šta je internet, razmotrićemo još jedan veoma važan termin koji se stalno pominje u umrežavanju računara: *protokol*. Šta je protokol? Šta protokol radi?

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 pojam 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) uređaja koji međusobno komuniciraju koriste isti protokol, kako bi ispunili neki zadatak.

Razmotrimo sada još jednu sličnost sa ljudima. Pretpostavimo da ste na predavanjima (na predavanju iz računarskih mreža, recimo). Predavač nejasno priča o protokolima i zbunjeni ste. Predavač zastaje i pita: „Ima li nekih pitanja?” (poruka je poslata i primili su je svi studenti koji ne spavaju). Dižete ruku (šaljući nedvosmisleni poruku predavaču). Predavač razume šta 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 zagušenja 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 primeri 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 (interneta 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.


 ISTORIJSKA ČITANKA

VRTOGLAVO MNOŠTVO KRAJNJIH SISTEMA NA INTERNETU

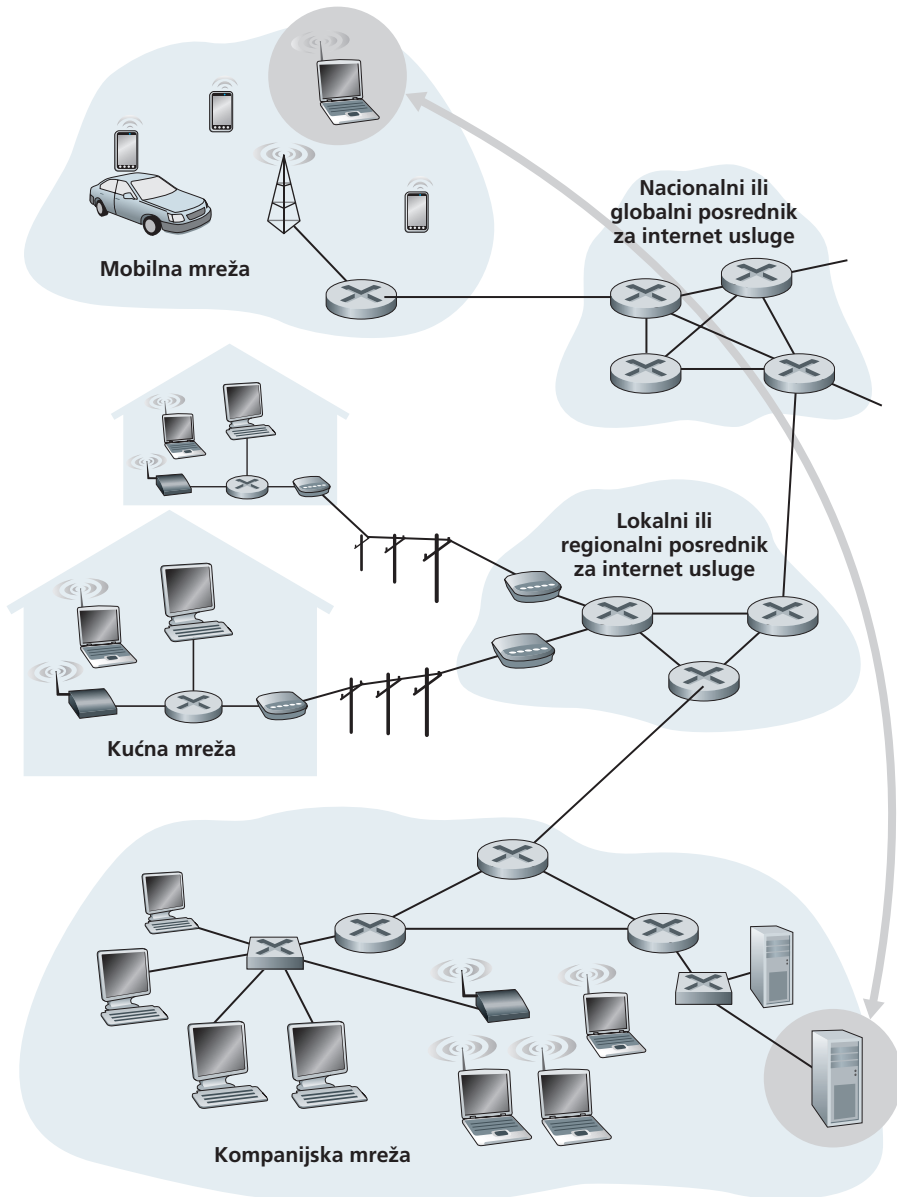
Ne tako davno, skoro jedini uređaji koji su se kao krajnji sistemu povezivali na internet bili su tradicionalni računari, kao što su stoni računari i moćni serveri. Počevši od kasnih devedesetih godina, pa sve do danas, sve više interesantnih uređaja se povezuje sa internetom, šireći njihovu sposobnost 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 dohvata 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 biomedicinske 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

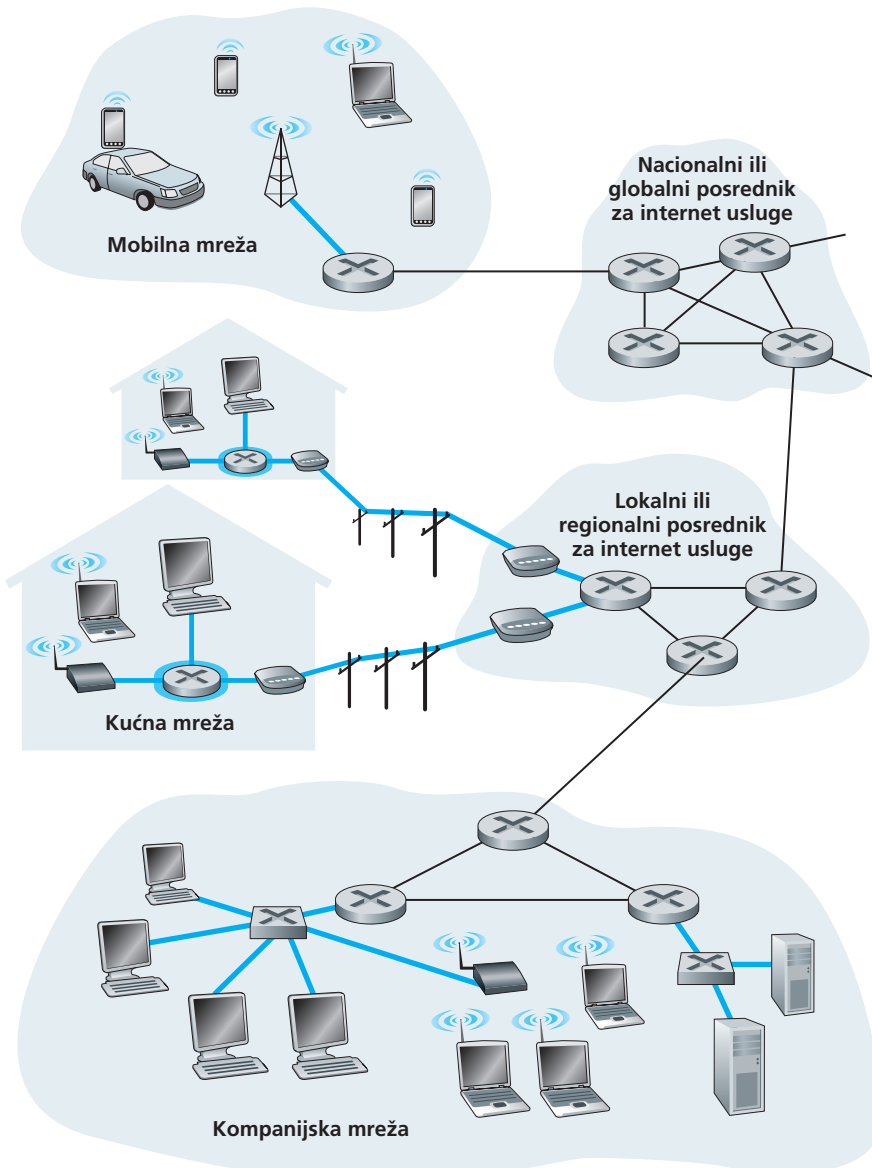
kojih primamo rezultate pretrage, e-poštu, veb strane i video zapise preraspodeljuje u velike **centre podataka**. Na primer, Google ima 30-50 centara podataka od kojih većina ima više od sto hiljada servera.



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, preduzće i širokopojasna mobilna bežična mreža) u kojima se koriste.



Slika 1.4 ♦ Pristupne mreže

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

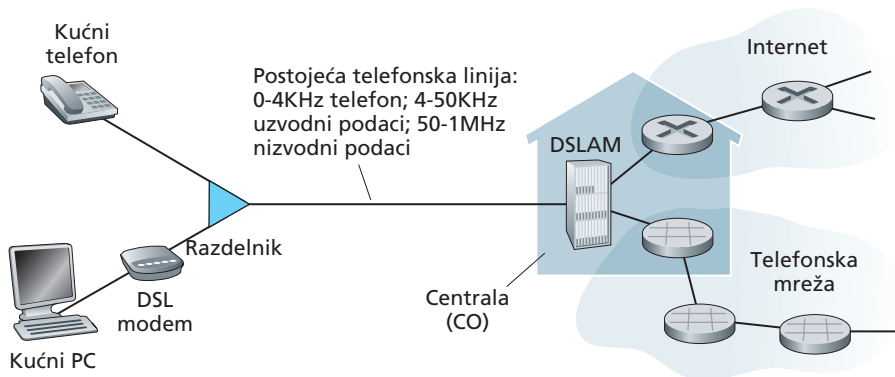
Danas, više od 65% u razvijenim zemljama ima pristup internetu, pri čemu su Koreja, Holandija, Finska i Švedska vodeće, u kojima više od 80% domaćinstava ima pristup internetu, koristeći većinom širokopojasne veze velike brzine [ITU 2011]. Finska i Španija su pristup brzom internetu proglasile „zakonskim 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 pretplatnička 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 pretplatničkoj 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:

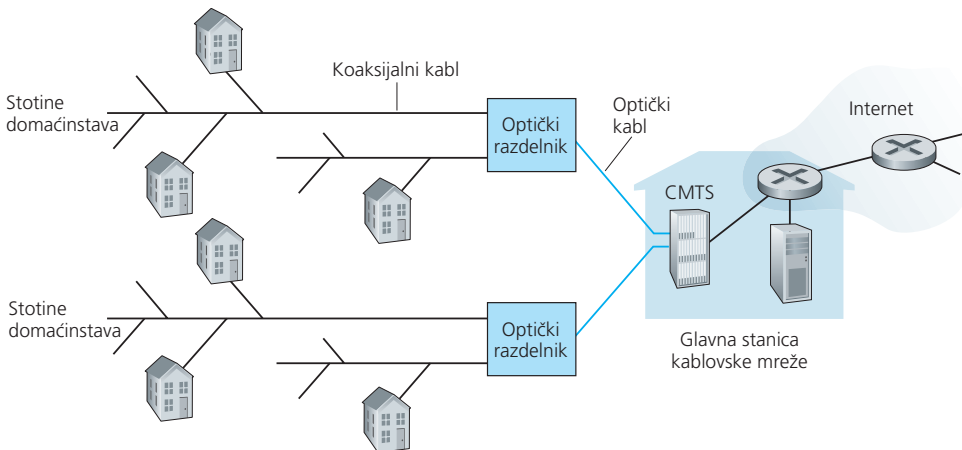
- nizvodni kanal (eng. downstream) velike brzine, u opsegu od 50 kHz do 1 MHz;
- uzvodni kanal (eng. upstream) srednje brzine, u opsegu od 4 kHz do 50 kHz;
- običan dvosmerni telefonski kanal, u opsegu od 0 do 4 kHz.

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 poglavlju 1.3.1.) Kod korisnika, razdelnik razdvaja podatke i telefonski signal koji stižu 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. Inženjeri 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*).

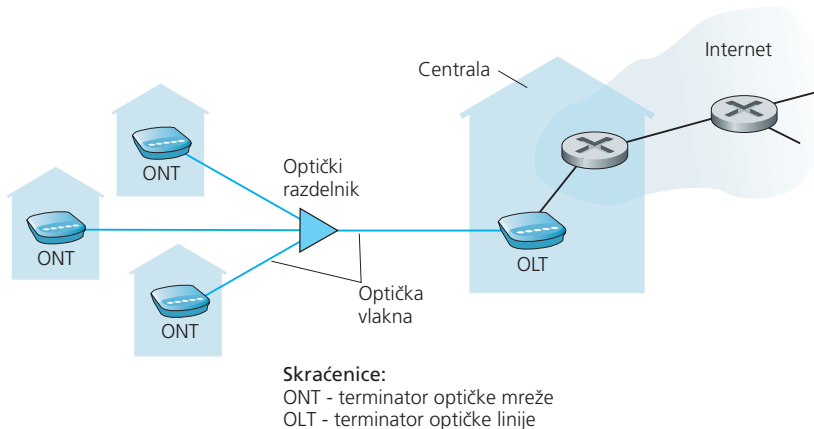
Kablovski pristup internetu zahteva specijalne modeme, nazvane kablovski modemi. Kao i DSL modem, i kablovski modem je tipično eksterni uređaj koji se pomoću Ethernet priključka povezuje na kućni PC. (O Eternetu ćemo detaljnije govoriti u poglavlju 5). U glavnoj stanici kablovskog sistema, završni sistem 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 mreža, 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 širokopojsnom medijumu. 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 bavićemo se detaljnije u poglavlju 5).

Iako DSL i kablovske mreže predstavljaju trenutno više od 90 procenata širokopojsnog 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 govori, 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 konkurentne mrežne arhitekture za optičku distributivnu mrežu koje vrše ovo razdvajanje: aktivne optičke mreže (AONs) i pasivne optičke mreže (PONs). AON je u suštini komutirani Ethernet, 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 poslani iz OLT ka razdelniku se umnožavaju na razdelniku (slično kao i kod glavne centrale).



Slika 1.7 ♦ FTTH pristup internetu:

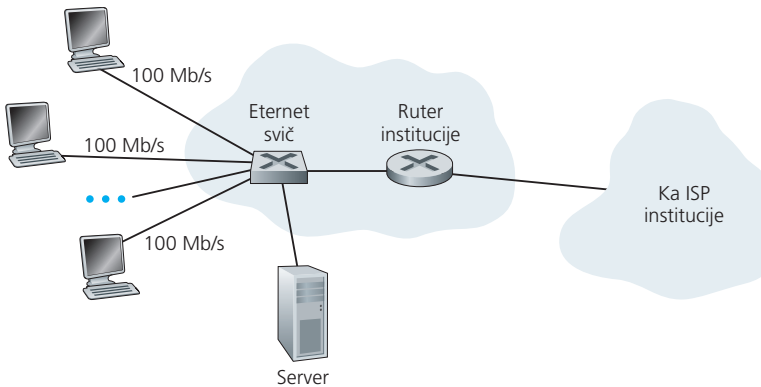
FTTH može da pruži brzine internet pristupa u gigabitima po sekundi. Međutim, većina FTTH posrednika za internet usluge pruža različite brzine, pri čemu veće brzine koštaju više. Prosečna nizvodna brzina za US FTTH korisnike bila je otprilike oko 20 Mb/s u 2011. godini (u poređenju sa 13 Mb/s za mreže 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 – kućni modem se preko telefonske linije povezuje na modem posrednika za internet usluge. U poređenju sa DSL-om i drugim širokopojsnim 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 rutera 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-

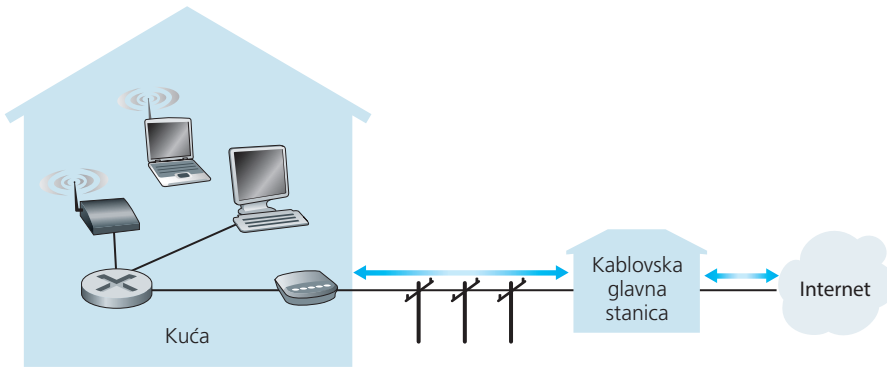
verzitetima i kućnim mrežama. Kao što je prikazano na slici 1.8, Ethernet korisnici koriste kablove sa upredenim bakarnim paricama za povezivanje sa Ethernet komutatorom, tehnologijom o kojoj ćemo detaljnije govoriti u poglavlju 5. Ethernet komutator, to jest svič, ili mreža takvih međusobno povezanih 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 *Beskrajni 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 [wagle.net 2012]). Najčešće korišćena tehnologija 802.11, o kojoj ćemo podrobnije govoriti u poglavlju 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 uobičajene komponente kućnih mreža. Mnoga domaćinstva kombinacijom širokopojasnog kućnog pristupa (kablovskih ili DSL modema) i jeftine 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 stanica (tačka bežičnog pristupa) koja komunicira sa bežičnim računarnom; kablovski modem koji obezbeđuje širokopojasni pristup internetu i ruter koji povezuje baznu stanicu i stacionarni računar sa kablovskim modemom. Ovakva mreža omogućava članovima domaćinstva da imaju širokopojasni 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 principa 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 Ethernet 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, zamislimo 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 vasioni prostor, kao u slučaju bežičnih lokalnih mreža (LAN) ili digitalnih satelitskih kanala.

Pre nego što pređemo na karakteristike različitih tipova medijuma, recimo nekoliko reči i o njihovim cenama. Stvarna cena fizičkog linka (bakarnog ili optičkog kablja 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 aparata 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 neoklopljenim 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. Takvom 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 dopunjuju 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 elektromagnetnim smetnjama, imaju neznatno slabljenje signala do razdaljine do 100 kilometara i veoma teško se prislušuju. 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 $n \times 51,8 \text{ Mb/s}$. 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 elektromagnetni 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 poglavlju 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 veb 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

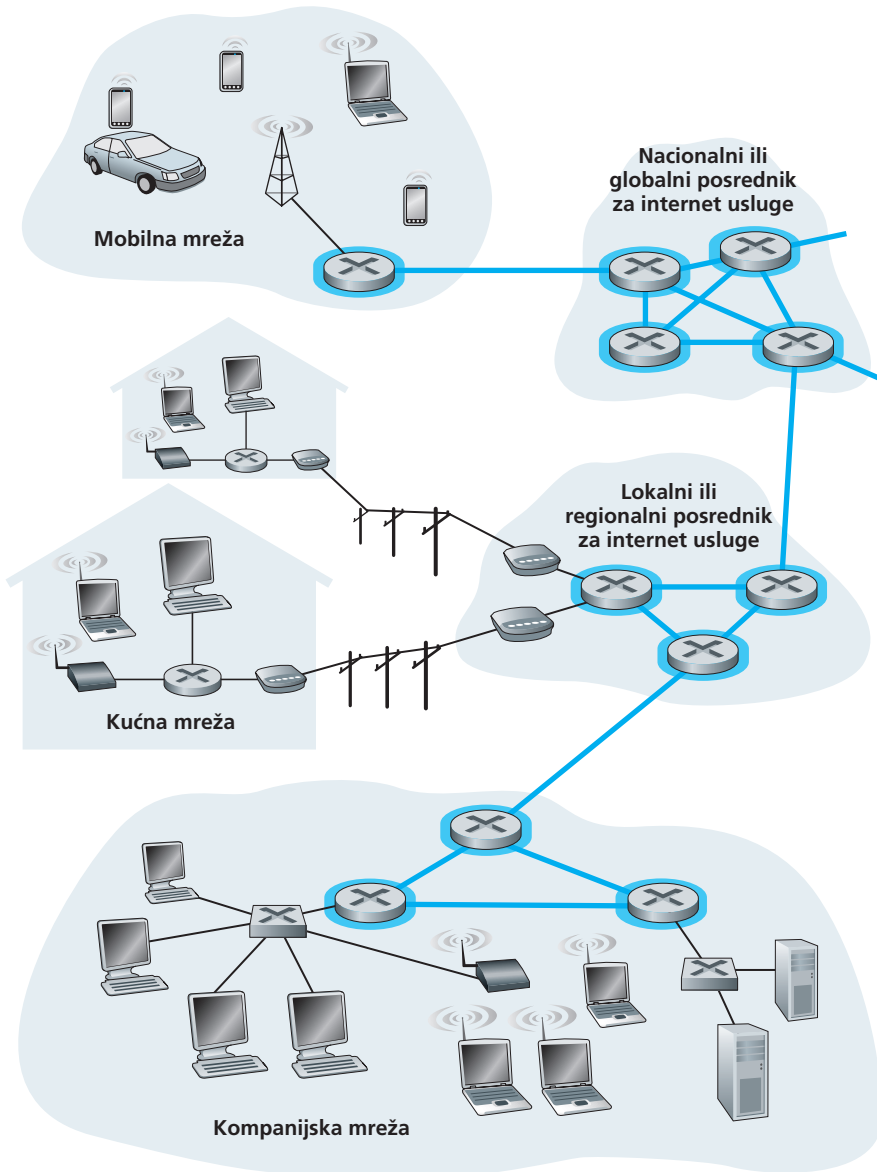
Pošto smo ispitali obod interneta, zaronimo malo dublje unutar jezgra mreže – smešu sačinjenu od komutatora paketa i linkova koji međusobno povezuju krajnje sisteme interneta. Na slici 1. 10 jezgro mreže je istaknuto podebljanim, osenčenim linijama.

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 određnog 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.

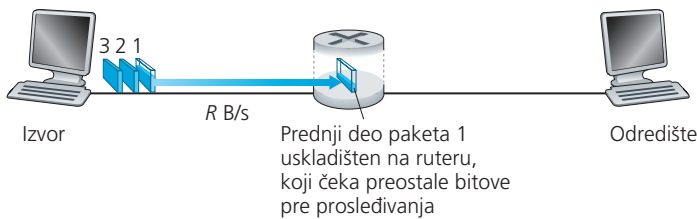
Princip prenosa podataka uskladišti pa prosledi

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 rutera. 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 **usklađiti pa proslediti**, 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 uskladištio 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!

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

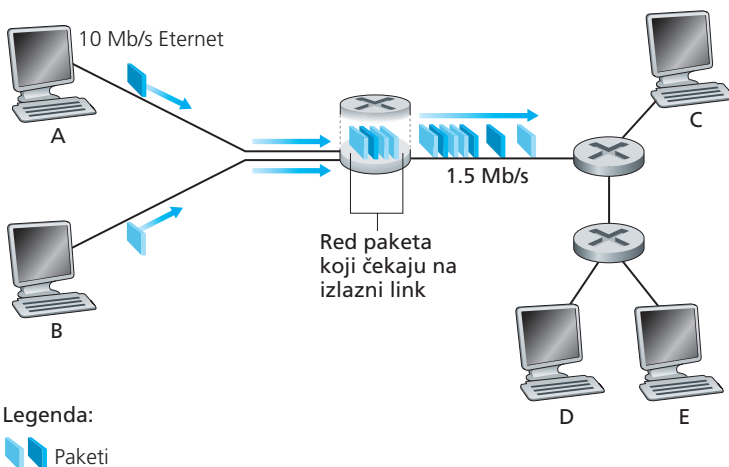
$$d_{\text{s kraja na kraj}} = N \frac{L}{R} \quad (1.1)$$

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 izlaznombuferu. Ova kašnjenja su promenljiva i zavise od nivoa zagušenja u mreži. Pošto je prostor u baferu ograničen, pristigli paket može da stigne u trenutku kada je bafer već potpuno popunjen 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 jednake dužine. Pretpostavimo da računari A i B šalju pakete računaru E. Računari A i B prvo šalju svoje pakete preko Ethernet linkova brzine 10 Mb/s do prvog rutera. 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 zagušenja na ruteru, pošto paketi čekaju u redu u izlaznom baferu pre nego što budu poslani na link. Na primer, ako računari A i B pošalju u isto vreme rafale od po 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 detaljnije 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. Ovdje 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 zaglavlje paketa. Slično poštanskim adresama i ove adrese imaju hijerarhijsku strukturu. Kada paket stigne do nekog rutera 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, pretpostavimo da Džo putuje iz Filadelfije do ulice Lejksajd Drajev 156 u Orlando na Floridi. Džo prvo vozi do najbliže benzinske pumpe i pita kako da stigne do ulice Lejksajd Drajev 156 u Orlando 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 izađe 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 Orlando. 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 Drajev 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 konfiguriraju ručno u svakom i za svaki ruter, ili internet koristi automatizovaniju 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 tabela prosleđivanja. Protokoli za rutiranje mogu, na primer, da utvrde najkraću putanju od svakog rutera do odredišta i da koriste rezultate najkraće putanje za konfigurisanje tabela prosleđivanja u ruterima.

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, potrebni 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.

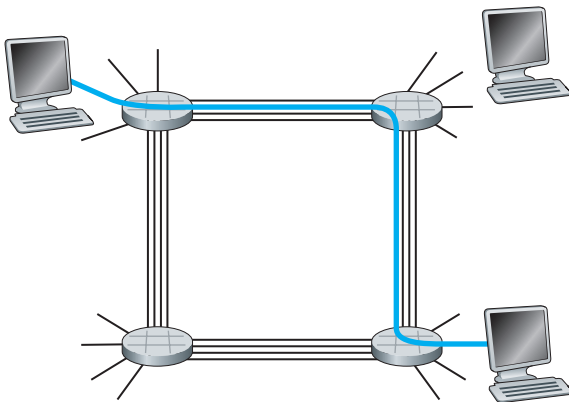
Tradicionalne telefonske mreže predstavljaju primere mreža sa komutiranjem kola. Razmotrimo šta se događa kada jedna osoba telefonskom mrežom želi da pošalje informacije (glas ili faks) drugoj osobi. Da bi pošiljalac mogao da pošalje svoje informacije, telefonska mreža najpre mora da uspostavi vezu između 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 stanice) 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 četvrto 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 predajnoj 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 frekvencija (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.



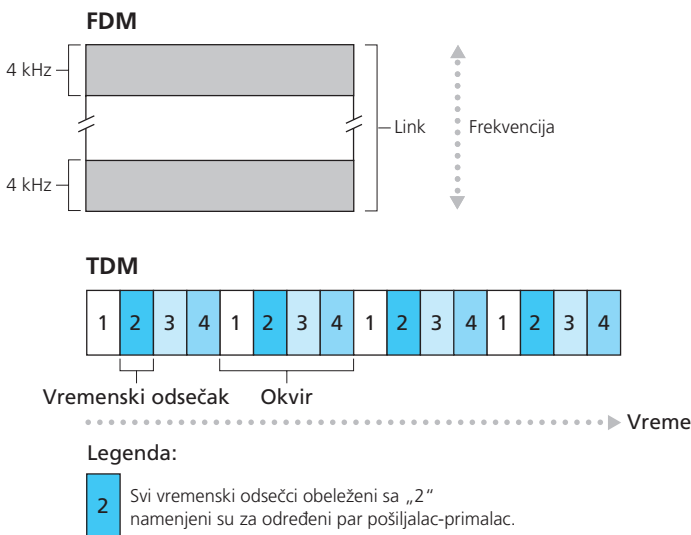
Slika 1.13 ♦ Jednostavna mreža sa komutiranjem kola koju sačinjavaju četiri komutatora i četiri linka

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 odsečki 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 jednaka 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, neuposljenemrežne 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. protraćeni 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 $(640000 \text{ bitova})/(64 \text{ kb/s}) = 10$ 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 [Moliner-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