Tuneluri (tunneling)

Mihai Budiu — mihaib+@cs.cmu.edu
http://www.cs.cmu.edu/~mihaib/

11 martie 1999

Subiect: conceptul de tunel şi aplicaţiile lui

Cunoştinţe necesare: cunoştinţe elementare despre funcţionarea reţelelor de calculatoare

Cuvinte cheie: protocol, ruter, tunel, TCP/IP, firewall, reţea privată virtuală, mbone, difuzare, mobile-IP

Cuprins

1 Internetul: o reţea paradoxală

În urmă cu cîteva luni am avut privilegiul de a asista la o prelegere deosebit de interesantă despre evoluţia Internetului. Vorbitorul era un "guru", unul dintre cei care au contribuit în mod esenţial la crearea şi dezvoltarea acestei ultime revoluţii tehnologice: David Clark, cercetător la Massachussets Institute of Technology, cea mai prestigioasă universitate tehnică din Statele Unite, şi probabil şi din lume.

David Clark a primit doctoratul tot la MIT in 1973. După primirea doctoratului a lucrat în dezvoltarea reţelei militare ARPANET, care va deveni mai tîrziu Internetul. Dl. Clark a fost unul dintre proiectanţii reţelelor token-ring, despre care am vorbit pe scurt într-un articol anterior.

De la mijlocul anilor 1970 Dl. Clark a lucrat la dezvoltarea Internetului. Intre 1981 şi 1989 a fost arhitectul şet al dezvoltării de protocoale pentru Internet. Dl. Clark a fost şi unul dintre proiectanţii sistemului de operare Multics, după care s-au inspirat cei care au creat sistemul de operare Unix. Cercetarea sa curentă este în domeniul protocoalelor şi arhitecturilor pentru reţele de date de foarte mare viteză; în speţă extinderea Internetului pentru a suporta trafic de timp real, alocarea de resurse şi tarifare.

Expunerea domnului Clark despre Internet a fost extrem de concentrată; aşa cum numai un individ cu o experienţă uriaşă acumulată poate să o facă, Clark a desluşit trăsăturile esenţiale ale reţelei, reuşind să facă, aşa cum a spus chiar dumnealui, o "introducere în Internet în 15 minute" (restul expunerii a fost consacrat discuţiilor despre evoluţia ulterioară a reţelei). Voi încerca să prezint în introducerea acestui text unele dintre ideile domnului Clark. Voi reproduce din memorie spusele dînsului; sper să nu fiu o sursă prea mare de distorsiuni. Despre Internet şi istoricul său am mai scris şi cu alte prilejuri în PC Report, iar copiile articolelor cu pricina sunt disponibile din pagina mea de web; nu o să mă repet aici.

> Pe la începutul anilor '70, în timp ce lucram la construirea Internetului — spunea David Clark — am discutat cu un inginer de la AT&T[1]. Insul mi-a împărtăşit la un pahar impresia lui despre strădania noastră: "eu cred că sunteţi ţicniţi; o reţea de felul ăsta nu poate să funcţioneze."

Din punctul de vedere al unei companii de telefoane, într-adevăr, Internetul este o reţea complet paradoxală; totul este cu susul în jos, cu totul altfel decît în reţeaua de telefonie.

De exemplu, în reţeaua telefonică toată "inteligenţa" se află în interiorul reţelei: centralele telefonice, releele, centralele interurbane, sunt mecanisme extraordinar de complicate, care controlează fiecare detaliu al funcţionării reţelei: gestiunea apelurilor, formarea circuitelor între sursă şi destinaţie, rezervarea de resurse (circuite) în toate centralele, semnalizarea, multiplexarea convorbirilor pe trunchiurile dintre centrale, controlul accesului la reţea (semnalizat prin tonul de ocupat), tarifarea, etc., sunt toate făcute în interiorul reţelei. Prin comparaţie, telefoanele, de la capătul sîrmei, sunt nişte dispozitive complet inepte, incapabile de altceva decît de a codifica şi decodifica vocea, şi de o semnalizare primitivă (ex. sonerie, ton de ocupat, etc.).

Dimpotrivă, în Internet miezul reţelei este practic tembel, şi oferă un serviciu aproape inexistent nodurilor externe; prin contrast toată inteligenţa se află în entităţile de la extremităţi (calculatoarele), care comunică între ele. Internetul nu interzice nimănui accesul, nu rezervă nici un fel de resurse pentru nimeni, nu tarifează nimic, şi în general, nu oferă nici un fel de garanţii.

- O companie de genul AT&T garantează fiecărui utilizator că nu va avea de a face decît într-o proporţie minusculă cu refuzul accesului la reţea (adică ton de ocupat) din lipsa de circuite din centrale; Internetul nu promite nimic;
- AT&T garantează că, o dată stabilită o conexiune între doi convorbitori ea nu va fi desfăcută decît cînd unul dintre ei închide; Internetul nu oferă nici un fel de garanţie cu privire la cîte dintre datele transmise vor ajunge la celălalt capăt;

[1] AT&T a fost timp de 60 de ani cea mai mare companie de telecomunicaţii din lume, avînd, pînă în 1984, un monopol practic complet asupra telefoniei în Statele Unite; în 1984 AT&T a fost sfărîmată de guvernul american în mai multe companii care se concurează una pe alta. AT&T derivă direct din compania fondată de Alexander Graham Bell, inventatorul telefonului.

- AT&T garantează securitatea convorbirilor telefonice, pe cînd în Internet e posibil ca sute de urechi să intercepteze şi modifice datele care circulă;
- AT&T garantează că după un anumit număr de milisecunde fiecare apel telefonic este fie conectat fie oferă ton de ocupat; în Internet timpul de stabilire a unei conexiuni este nelimitat;
- AT&T promite că tot ce unul dintre vorbitori pronunţă în microfon ajunge la capătul celălalt; în Internet un bit sau un megaoctet din datele pe care le trimiteţi pot dispărea pentru totdeauna;
- AT&T promite că (în măsura în care viteza luminii permite), cei doi vorbitori vor purta o conversaţie interactivă, în care spusele unuia ajung cît se poate de repede la celălalt; în Internet ceea ce trimiteţi astăzi poate apărea undeva, în altă parte, teoretic chiar şi peste zile întregi;
- AT&T înregistrează şi tarifează fiecare secundă de convorbire telefonică în funcţie de plasamentul celor care conversează, ora convorbirii, abonamentul plătit, tarife speciale, etc.; în Internet nu există nici un fel de contabilizare a cine cu cine, cînd, cît şi pe unde comunică;
- AT&T este o corporaţie unică, care administrează întreaga reţea pe care o are în posesiune şi controlează fiecare aspect al funcţionării ei; Internetul este o federaţie de reţele de dimensiuni foarte diferite, din toate ţările globului, administrată de indivizi pricepuţi şi nepricepuţi, fiecare după cum îl ţin puterile;
- AT&T face cu alte companii telefonice contracte prin care-şi interconectează reţelele, stipulînd fiecare detaliu de responsabilitate a părţilor; în Internet datele oricui pot traversa practic orice parte a reţelei, fără ca trimiţătorul, destinatarul sau cei care posedă acele părţi ale reţelei să afle vreodată;
- Telefonia mondială se sprijină pe un set relativ mic de standarde, care indică exact fiecare amănunt, de la mufele pe care le pot avea cablurile, pînă la felul în care se transmite fiecare bit de informaţie; Internetul leagă laolaltă zeci de feluri de reţele diferite, şi poate acomoda fără nici un fel de efort tehnologii de care nu a auzit nimeni în momentul în care a fost proiectat.

1.1 Serviciul oferit de Internet

Dacă studiem cu atenţie unicul serviciu oferit de Internet o să observăm că el sună cam aşa: "utilizatorul dă nişte date reţelei, cu indicaţia de a le trimite undeva. Reţeaua ar putea să transporte unele dintre date, la un moment dat, pînă la capătul celălalt."

Dacă vi se pare o exagerare, studiaţi din nou specificaţiile protocolului numit IP, (Internet Protocol), care este executat de toate calculatoarele din interiorul reţelei (numite rutere), şi o să observaţi că nu puteţi descrie deloc mai precis funcţionalitatea acestuia.

Acesta este paradoxul Internetului: o construcţie atît de fenomenală (cum poate mărturisi oricine a folosit serviciile sale, de e-mail, ftp, web, telnet, telefonie, jocuri, şi atîtea altele) este înălţată pe un eşafodaj atît de "şubred" ca IP.

Cînd inginerul de la AT&T l-a întrebat pe David Clark: "noi am proiectat reţeaua de telefoane pentru convorbiri telefonice, şi am optimizat-o la maximum pentru asta; Internetul vostru pentru ce e bun?", David Clark i-a răspuns: "nu am nici cea mai mică idee la ce e bun Internetul; noi am optimizat Internetul pentru... schimbare. Internetul trebuie să acomodeze orice fel de aplicaţie ne-ar trece prin minte, şi ca atare trebuie să fie extrem de flexibil".

În retrospectivă putem spune că proiectarea Internetului a fost un succes ingineresc fenomenal; majoritatea aplicaţiilor care se folosesc de Internet astăzi nici nu puteau fi imaginate în urmă cu douăzeci de ani, şi suntem abia la început, credeţi-mă.

1.2 Protocolul de transport

Una dintre cheile funcţionării unui sistem atît de "fragil" este protocolul TCP, Transport Control Protocol. Dacă două calculatoare conversează între ele prin Internet, numai ele două folosesc TCP, şi nu şi toate nodurile aflate pe traseul dintre ele. TCP repară toate slăbiciunile protocolului IP, transformînd Internetul într-un mediu predictibil şi fiabil. Dacă reţeaua dintre calculatoare funcţionează cîtuşi de puţin, în sensul că livrează ceva din datele care i se dau, TCP îşi face treaba:

- TCP garantează că datele trimise de un capăt ajung în partea cealaltă în exact aceeaşi ordine în care au fost trimise, indiferent de comportarea reţelei;
- TCP garantează că datele trimise ajung exact o dată;
- TCP garantează şi că datele din conversaţii diferite (ale altor calculatoare, sau ale aceloraşi două calculatoare din trecut) nu sunt niciodată amestecate;
- TCP garantează că reţeaua *nu se congestionează*; acesta este poate cel mai paradoxal aspect al funcţionării Internetului: dacă telefoanele ar funcţiona în acest fel, e ca şi cum telefonul dumneavoastră de acasă are grijă de toate centralele telefonice urbane, interurbane şi internaţionale prin care trece convorbirea dumneavoastră! Dacă TCP nu ar face acest lucru, reţeaua nu ar funcţiona de loc. Nodurile terminale ale reţelei au grijă de o entitate extrem de complexă, despre care de fapt nici nu ştiu mare lucru (nu e de mirare ca tehnicianul de la AT&T nu înţelegea cum se poate aşa ceva). TCP face treaba asta însă fără a şti mare lucru despre cum arată reţeaua; despre asta însă vom vorbi altă dată.

Mă voi opri aici din rememorarea conferinţei domnului Clark, pentru a ataca subiectul de fond al acestui articol. Şi anume voi ilustra cum pe baza protocolului IP au fost construite alte servicii sofisticate, care dau reţelei înfăţişări foarte diferite.

2 Conceptul de tunel

Conceptul central al acestui articol este *tunelul*. Este un concept deosebit de simplu, dar cu aplicaţii uluitoare. Voi ilustra noţiunea printr-o analogie.

Într-un articol anterior, despre rutarea din Internet, comparam transmisiunea datelor prin Internet cu funcţionarea sistemului poştal; analogia este destul de precisă, şi o voi refolosi şi aici.

Calculatoarele care comunică sunt doi cetăţeni, iar Internetul este sistemul poştal. Unitatea de transmisiune este scrisoarea (pachetul de date). Un ins pune scrisoarea la poşta, iar apoi o armată de poştaşi, şoferi, aviatori, hamali, etc. mută scrisoarea la destinatar. Scrisorile se pierd uneori, iar poşta nu garantează că ele vor ajunge la destinaţie; la fel se petrec lucrurile şi în Internet.

Să ne imaginăm acum că avem de a face cu o ţară care nu vrea să adere la convenţiile poştale internaţionale, care nu recunoaşte timbrele, care trimite scrisorile în pungi în loc de plicuri şi la care plata se face direct funcţionarilor. Să ne mai imaginăm că, din anumite motive, scrisorile noastre trebuie să traverseze această ţară bizară (şi nu avem un avion la dispoziţie). Ce ne facem?

Sistemul poştal internaţional ar putea crea în acest scop o organizaţie specială, cu filiale la două graniţe ale acestei ţări. Atunci cînd un plic trebuie să traverseze această ţară, acesta este livrat la graniţă, este băgat într-o pungă şi plata este făcută unui funcţionar, cu rugămintea de a trimite punga la cealaltă graniţă. Cînd punga ajunge dincolo, cealaltă filială extrage din pungă plicul, după care îl re-inserează în circuitul poştal normal. Traseul poştal între cele două filiale se numeşte în terminologia Internetului "un tunel". Numele este destul de natural, pentru că obiectul de transportat (plicul) intră într-o zonă întunecoasă (punga) şi iese abia la capătul celălalt la lumină, netulburat.

În general, avem de a face cu un tunel cînd datele (plicurile) trimise cu un anumit protocol sunt "împachetate" folosind un alt protocol de transmisiune (pungile), şi sunt despachetate apoi la celălalt capăt. Împachetarea pachetelor se mai numeşte *încapsulare*.

3 Aplicaţii

3.1 Subreţele speciale

Pentru o vreme în arena reţelelor de comunicaţii s-a dus o luptă acerbă între protocoalele folosite în Internet, bazate pe IP şi TCP, şi o serie de protocoale standardizate de organizaţia mondială a telecomunicaţiilor. Lupta a fost incertă pînă în urmă cu doi-trei ani; pentru o vreme balanţa a înclinat în sprijinul reţelelor de tip OSI (Open System Interconnection: denumirea standardelor organizaţiei sus-menţionate); de curînd a devenit însă evident că Internetul este, cel puţin pentru următorii ani, tehnologia învingătoare.

În afară de TCP/IP şi reţelele de tip OSI, există o sumedenie de alte feluri de reţele de calculatoare, în general dezvoltate de marile companii de calculatoare, toate incompatibile între ele. De pildă IBM are propriul model, numit SNA, Digital (acum Compaq) are DecNet, Apple are Appletalk, etc. Din cauza asta, la ora actuală în lume există o bază mare instalată de reţele care funcţionează cu protocoale diferite.

Dar aceste reţele nu sunt sortite să rămînă izolate; ele pot fi folosite ca punţi de legătură în Internet folosind conceptul de tunel. Figura 1 ilustrează acest fenomen cu un caz real.

Din motive tehnice, la începutul formării reţelei universitare române, acum numită RoEduNet, cîteva reţele erau conectate între ele folosind un protocol de comunicaţii numit X25, care este un protocol OSI. Legătura la Internetul mondial era oferită de Politehnica din Bucureşti (PUB: "Politehnica" University of Bucharest, `pub.ro`; între Pub şi alte cîteva universităţi era însă instalată o reţea X25; la Pub se afla un switch X25 (un switch este un ruter, în terminologia X25), la care se cuplau mai multe linii telefonice închiriate, care veneau de la alte universităţi. Şi la ora actuală, Universitatea din Bucureşti (`unibuc.ro`) este cuplată în acest fel. Legătura între reţeaua IP (Internet) şi cea X25 este făcută cu două cutii care sunt numite *rutere multiprotocol*. Aceste cutii ştiu să converseze protocoale diferite pe interfeţe diferite; ruterul de la poli vorbea IP cu lumea exterioară şi X25 cu switch-ul. Cele două rutere de la extremităţile reţelei X25 deschideau între ele un circuit X25, prin care apoi transmiteau de la unul la altul pachetele IP; acestea deveneau

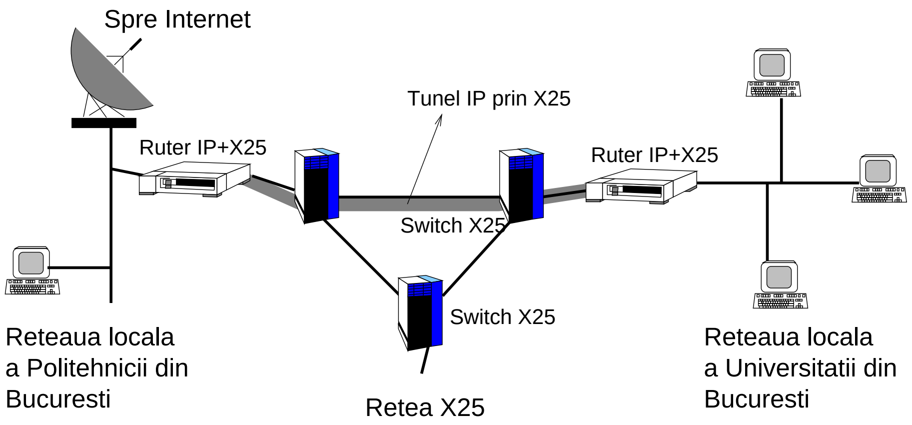

Figura 1: Un tunel X25 între reţeaua universităţii Politehnica din Bucureşti şi reţeaua Universităţii din Bucureşti. Pachetele IP de la Poli sunt "împachetate" de către un ruter multiprotocol (care ştie atît IP cît şi X25) ca date în pachetele X25, şi sunt despachetate de ruterul de la Universitate şi transmise apoi în reţeaua locală.

date ordinare pentru protocolul X25. Acesta nu este altceva decît un tunel, care transportă IP prin X25.

Din punct de vedere al restului lumii, reţeaua X25 nici nu există; toate celelalte calculatoare au impresia că ruterul de la Pub este cuplat direct printr-o sîrmă cu ruterul de la UniBuc; toată reţeaua X25 este complet transparentă (invizibilă).

Acest fenomen se întîlneşte foarte des; de exemplu în Statele Unite compania de telecomunicaţii Sprint, care posedă o mare parte din coloana vertebrală a Internetului, foloseşte pentru asta reţeaua proprie care rulează protocolul ATM; la capetele reţelei ATM se află rutere multiprotocol IP/ATM, care formează tunele prin reţeaua ATM pentru a transporta traficul Internet.

3.2 Reţele private virtuale

O altă aplicaţie interesantă a tunelelor este folosită de corporaţiile multi-naţionale. O firmă ca IBM are reţele pe tot cuprinsul globului, aşa că nu poate folosi o singură sub-reţea pentru a-şi lega toate departamentele. IBM însă poate crea ceea ce se numeşte *o reţea privată virtuală* (Virtual Private Network, VPN), cum ilustrăm în figura 2.

IBM asignează adrese[2] şi construieşte toate reţelele ca şi cum ar fi legate direct între ele. Să presupunem că toate reţelele de la IBM folosesc IP. Apoi, pentru fiecare reţea, ruterele de la margine construiesc tunele. Ruterul din New-York deschide o legătură la ruterul din Delhi, formînd un tunel. De aici înainte toate pachetele trimise de la New-York la Delhi sunt împachetate în pachete IP şi trimise prin tunel în Delhi. Ruterul din Delhi le despachetează, după care le pune în reţeaua locală, ca şi cum le-ar fi primit de la vecinul imediat.

Acesta este un fenomen foarte interesant, în care date ale unui protocol sunt împachetate în pachete ale aceluiaşi protocol! În analogia noastră anterioară, e ca şi cum am de trimis cinci vederi din America în România, dar pentru a nu plăti cinci timbre, le pun într-un plic pe toate, le trimit

[2]Acest exemplu este pedagogic (dar plauzibil); nu ştiu dacă într-adevăr IBM foloseşte această schemă la nivelul întregii corporaţii.

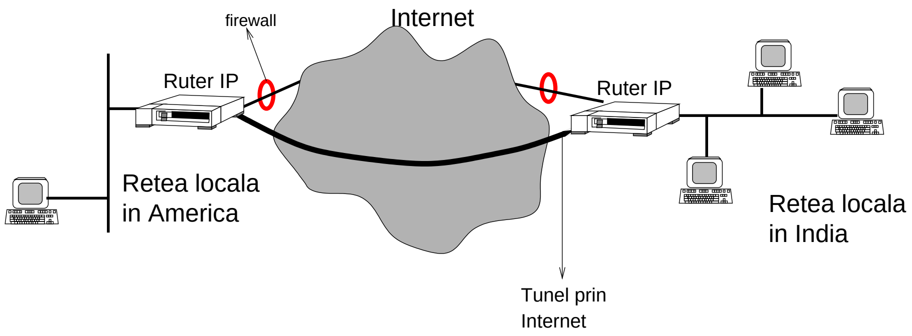

Figura 2: O reţea privată virtuală. Cele două sedii ale unei companii, pe două continente diferite, sunt fiecare separate de Internet cu cîte un firewall. Cele două reţele sunt legate între ele printr-un tunel care trece tot prin Internet, ceea ce permite calculatoarelor din aceste două reţele să comunice între ele nestingherite.

cu poşta unui amic din România, pe care îl rog să le pună la Poşta Română, cu timbre mai ieftine. Protocolul folosit în ambele cazuri e acelaşi, al sistemului poştal, dar cîteodată transport scrisori în scrisori!

Un motiv pentru care corporaţiile folosesc această metodă, în loc de a lega direct cele două reţele prin Internet, este *securitatea*. Adesea companiile restrîng dramatic accesul la informaţiile din interior, mai ales pentru a preveni pirateria informatică. Accesul din exterior în reţeaua IBM se poate face numai prin nişte puncte înguste (ca punctul de vamă de la frontieră), numite "pereţi de foc" (*firewall*). Un administrator permite un acces extrem de limitat printr-un firewall, de pildă doar poştă electronică, dar nu şi web sau ftp. Cu toate că accesul din exterior (sau chiar din interior spre înafară) este strict limitat, datorită reţelei private virtuale, calculatoarele din centrele IBM de pe cele două continente pot comunica între ele nestingherite, fără nici un fel de limitări cauzate de firewalls.

3.3 MBONE: reţeaua de difuzare

O altă aplicaţie extrem de interesantă a conceptului de tunel a fost construită prin teza de doctorat a lui Steve Deering, la Universitatea Stanford. Este vorba de difuzare.

Reţeaua de televiziune funcţionează prin difuzare (*broadcast*): un post emite şi toată lumea receptează. În cazul calculatoarelor comunicaţia este *punct-la-punct*: unul vorbeşte şi unul singur ascultă. Dar există aplicaţii ale calculatoarelor care ar beneficia de difuzare; de exemplu teleconferinţele între mai mulţi participanţi. În engleză se face distincţie între difuzarea pe care o primeşte toată lumea (broadcast) şi difuzarea pe care o primeşte doar o submulţime dintre posibilii ascultători, de pildă doar cei interesaţi. Ultima se numeşte *multicast*.

Implementarea difuzării în sine nu este o treabă deosebit de grea (vom vedea mai jos cum este ea realizată); problema cea mai complicată este cum poate fi implementată difuzarea în Internet, care este deja construit şi nu a fost conceput pentru a suporta aşa ceva. Asta este o adevărată problemă inginerească, pe care Deering a rezolvat-o cu mult succes.

Soluţia lui Deering cere cooperarea unora din ruterele din Internet, pentru a fi eficace. Pentru că nimeni nu poate schimba toate ruterele dintr-o reţea cu 100 de milioane de calculatoare, care se întinde pe tot globul, soluţia trebuie să funcţioneze chiar dacă numai cîteva rutere sunt de acord să colaboreze, iar toate celelalte nu ştiu nimic despre difuzare. Vom numi ruterele care participă la mbone *rutere multicast*. Aceste rutere sunt relativ puţine, răspîndite în toată lumea; sunt nişte dispozitive experimentale. Totalitatea ruterelor multicast se numeşte "coloana vertebrală de difuzare", sau Multicast backBONE, *Mbone*. Mbone este operaţională din 1988 (`http://www.mbone.com`). Harta curentă a reţelei este disponibilă la `http://www.cs.berkeley.edu/~elan/mbone.html`.

Aţi ghicit care este tehnologia folosită? Cum se numeşte acest articol? Figura 3 ilustrează modul în care funcţionează MBone.

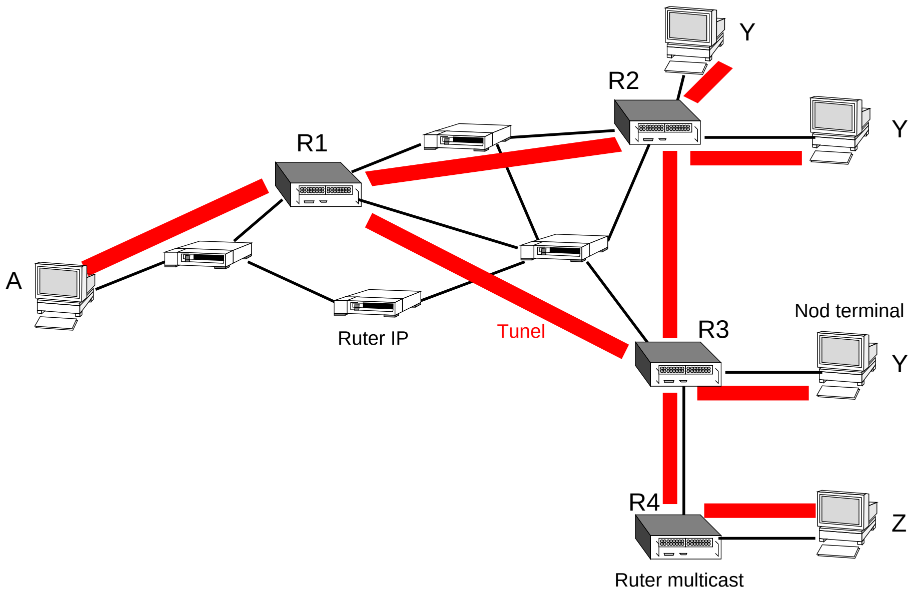

Figura 3: Reţeaua virtuală de difuzare Multicast BackBone. Ruterele care înţeleg protocolul de rutare special folosit în Mbone crează între ele tunele prin care-şi trimit pachetele de difuzare. Un ruter din reţeaua de difuzare multiplică un pachet destinat mai multor calculatoare pentru fiecare vecin. Tunelurile (ilustrate cu linii groase) formează o reţea virtuală, numită Mbone.

Ruterele multicast sunt configurate de administratori să ştie despre alte rutere multicast. Fiecare ruter multicast este configurat să comunice cu un anumit set de alte rutere multicast, "vecinii" săi (de care se poate afla la distanţă foarte mare, de altfel). Un ruter multicast construieşte cîte o legătură virtuală cu fiecare vecin, un tunel folosind protocolul IP. De aici înainte ruterele multicast transmit pachetele de difuzare numai prin aceste tunele. Ele au impresia că sunt direct conectate unul cu altul, ca şi cum restul Internetului nu ar mai exista!

Din cauza aceasta reţeaua MBone este o reţea *virtuală*. Ca şi reţelele private virtuale, în MBone doi vecini aparenţi pot fi de fapt la distanţe foarte mari, dar sunt legaţi de un tunel care le dă iluzia de vecinătate fizică.

Deşi este extrem de interesant, nu voi mai intra în amănunte prea multe despre funcţionarea Mbone; voi ilustra doar principiile generate, printr-un exemplu:

1. Un anumit set de adrese din Internet, numite "adrese de clasă D" sunt rezervate pentru difuzare. Fiecare adresă de difuzare reprezintă un grup de ascultători ai unei singure trans-

misiuni.

2. Dacă un calculator vrea să asculte o anumită emisiune, tot ce are de făcut este să-şi atribuie o astfel de adresă şi să anunţe ruterul cel mai apropiat din Mbone.

3. Ruterele din Mbone îşi transmit unul altuia informaţii despre unde se află calculatoare cu fiecare adresă. În figura 3, toate ruterele vor afla despre cele trei calculatoare cu adresa Y.

4. Să presupunem că calculatorul A vrea să trimită o conferinţă video pentru adresa Y. Atunci el trimite ruterului cel mai apropiat (R1) din Mbone pachetele de transmis, folosind un tunel.

5. Acest ruter ştie care din vecinii lui au ascultători interesaţi de emisiune. În figura noastră aceştia vor fi R2 şi R3. R1 ca atare face *două* copii ale pachetului iniţial, şi trimite cîte una fiecăruia dintre vecini, prin tunelul stabilit.

6. Fiecare ruter procedează mai departe, transmiţînd atîtea copii cîte tuneluri are, spre rutere interesate de pachet. Dacă unul din vecinii unui ruter nu deserveşte nici un calculator cu adresa Y (ca R4 din figură), atunci acel ruter nici nu primeşte o copie.

7. Procesul se repetă pînă pachetele ajung la toate destinaţiile.

Metoda aceasta este deosebit de elegantă, pentru că rezolvă problema *scalabilităţii*. Observaţi că efortul fiecărui participant pentru transmisiune este relativ mic pentru fiecare pachet; în nici un caz nu depinde de numărul de recipienţi (ci doar de numărul de vecini).

Prin contrast, să ne imaginăm cum am fi rezolvat această problemă dacă nu aveam deloc rutere multicast la dispoziţie. Ei bine, atunci sursa trebuia să ştie care sunt toţi receptorii, şi să deschidă cîte o legătură pentru fiecare. Apoi sursa trebuia să transmită fiecare pachet de atîtea ori cîţi receptori avea. Asta este clar o risipă, pentru că cele mai multe pachete (identice) vor traversa aceleaşi legături în mod inutil. Dacă sunt 10 000 de consumatori, aceasta ar depăşi capacităţile atît ale sursei, cît şi probabil ale legăturii sursei la reţea.

3.4 Mobile-IP: calculatoare mobile

În fine, vom ilustra o ultimă tehnologie spectaculoasă al tunelelor, cu o altă aplicaţie care funcţionează în Internet şi este în curs de aprobare de către corpul de standardizare al Internetului, IETF (Internet Engineering Task Force).

Problema are de-a face cu calculatoarele care "se plimbă", care nu au o poziţie fixă. De pildă, dacă zburăm cu avionul cu un laptop, acest calculator ar putea fi într-o zi în Europa, iar în alta în Japonia. Cum poate comunica acest calculator în Internet ca şi cum ar fi tot timpul legat la aceeaşi reţea?

Problema provine din modul în care adresele sunt atribuite şi rutarea pachetelor este făcută în Internet; am consacrat un întreg articol în trecut acestui subiect, aşa încît nu o să mă repet aici.

Ideea este că adresa unui calculator indică aproximativ şi locul geografic în care acesta se află; astfel, dacă un calculator îşi schimbă poziţia, pachetele care-i sunt destinate nu îl mai pot găsi. (Un calculator nu-şi poate schimba adresa, pentru că asta este identitatea lui, după care ceilalţi îl recunosc.) Soluţia există, este implementată, funcţionează, şi este ilustrată în figura 4.

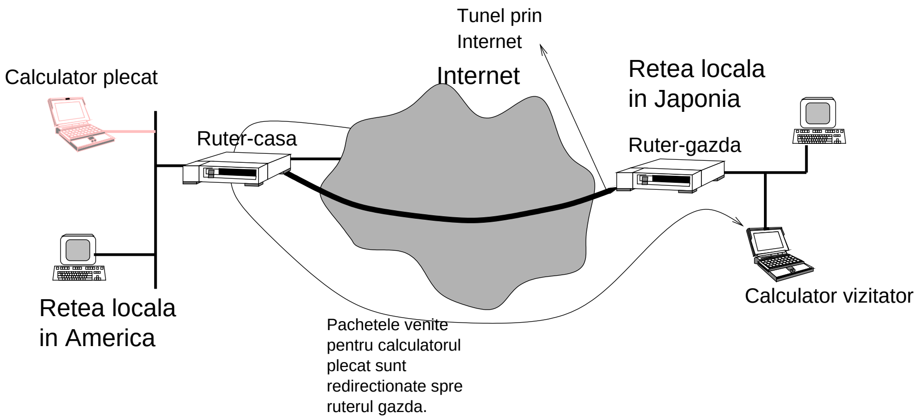

Figura 4: Funcţionarea protocolului IP mobil: un calculator migrator primeşte de la reţeaua în care a poposit o adresă nouă; ruterul de la reţeaua lui de baştină şi de la reţeaua gazdă crează un tunel prin care îi trimit pachetele care i se cuveneau.

Pentru a realiza comunicarea în mod transparent cu un calculator mobil, ne trebuie colaborarea a două rutere: unul în reţeaua unde calculatorul se află de obicei (reţeaua-casă) şi unul în reţeaua unde calculatorul se plimbă (reţeaua-gazdă). Iată cum funcţionează protocolul, în linii mari:

1. Calculatorul coboară din avion în Japonia. El emite un pachet radio, zicînd "cucu, am venit în vizită din Europa; e cineva acasă?";

2. Un ruter gazdă aude acest pachet. Prin anumite metode criptografice, acest ruter se convinge că, într-adevăr, acest calculator nu este un impostor, ci chiar calculatorul european în vizită;

3. Ruterul-gazdă ia legătura cu ruterul-casă: "hai salut; un laptop de-al tău e pe la mine prin zonă; mă ocup eu de el"; prin anumite metode criptografice ruterul casă se convinge într-adevăr că nu vorbeşte nici el cu un impostor;

4. Ruterul gazdă îi răspunde calculatorului mobil: "s-a aranjat: de acum înainte poţi folosi adresa asta din Japonia, ca să primeşti corespondenţa";

5. Ruterul-gazdă şi ruterul-casă construiesc un tunel între ele;

6. De fiecare dată cînd ruterul-casă vede un pachet pentru laptop-ul plecat, în loc să-l trimită în reţeaua locală, unde laptop-ul se afla iniţial, îl bagă în tunel, pentru ruterul Japonez;

7. Ruterul japonez extrage din tunel pachetele pentru vizitator şi i le înmînează la noua adresă.

Din nou, analogia cu sistemul poştal este perfectă; este ca şi cum vecinul de bloc are cheia dvs. de la cutia poştală, ia toate scrisorile pe care le primiţi, le bagă într-un plic cu timbru de Japonia şi le pune din nou la poştă.

Foarte elegant, nu?

4 Concluzii

Am văzut în acest text cum un mecanism extrem de simplu IP, care transferă în mod ne-fiabil date între două calculatoare, poate fi extins în felurite moduri, pentru a construi mecanisme din ce în ce mai sofisticate. Am văzut cum TCP oferă fiabilitate, tunelele oferă legături virtuale între calculatoare distante, Mbone oferă difuzare cu cost redus, iar protocolul Mobile-IP oferă independenţă de poziţie.

Sper ca de acum înainte să nu mai treceţi printr-un tunel fără o umbră de admiraţie.