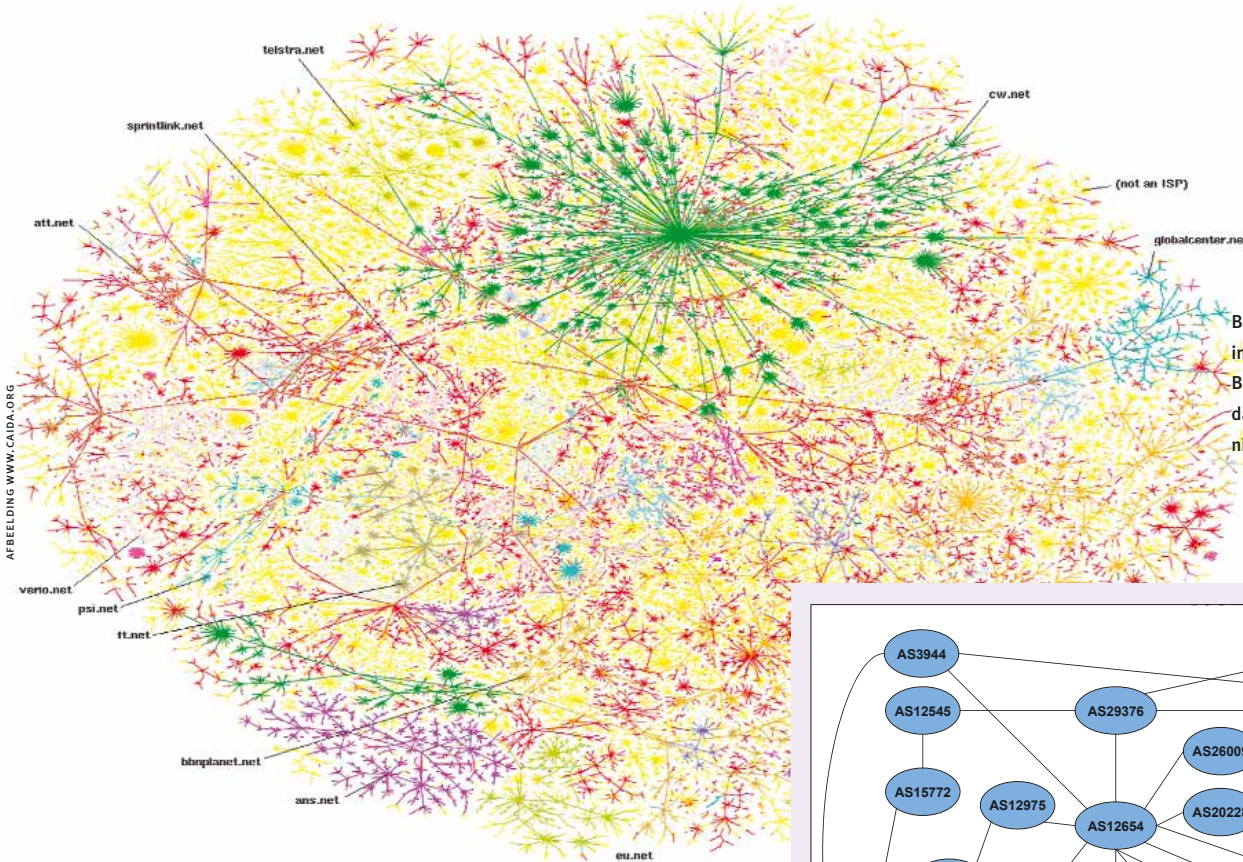


Internet-padvinder SAMCRA voor irritatievrij bellen over Internet



Beeld van de complexe structuur van het internet. Biologen en natuurkundigen zagen daarin al vrij snel de gelijkenis met organische fractale structuren.

Delfts algoritme moet Internet van verkeersinfarct redden

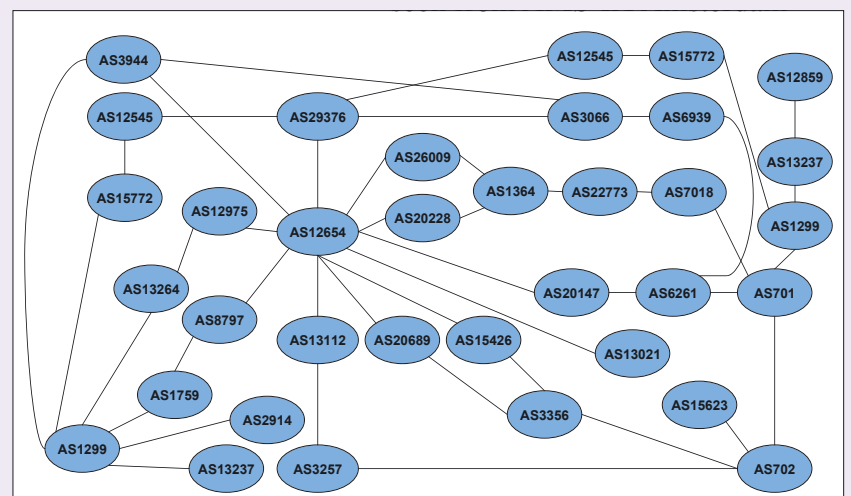
BRUNO VAN WAYENBURG

De groei van Internet loopt vast als de organisatie ervan niet fundamenteel wordt verbeterd, voorspelt hoogleraar netwerkarchitectuur prof.dr.ir. Piet Van Mieghem. De routing, de verkeersregeling van het informatiesnelwegennet, is nu al een zorgenkind. En net zoals bij het fileprobleem zal het louter bijplaatsen van extra capaciteit niet meer baten.

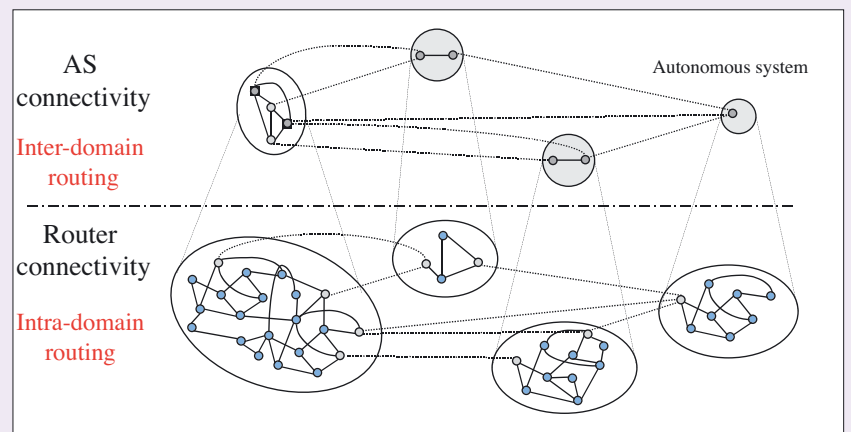
Van Mieghems oplossing: betere internetverbindingen moeten gewoon te koop zijn. Zodat de kwaliteit van de verbinding voor je telefoongesprek of videoconferentie via internet kan worden gegarandeerd en zonder haperingen verloopt, waardoor internetaanbieders écht aan internet kunnen verdienen.

Maar daarvoor is wel eerst slimme routeringsprogrammatuur nodig, die gegarandeerd de beste route door het netwerk bepaalt, liefst zonder dagen lang te rekenen. Met het routeringsalgoritme SAMCRA hebben Van Mieghem en zijn onderzoeksgroep aan de TU DELFT een kandidaat in huis met, theoretisch, de beste papieren. Recent liet een omvangrijk simulatie- en testprogramma samen met Amerikaanse onderzoekers zien dat de rekenmethode ook in de praktijk aan de hoge eisen voldoet.

Van één ding is prof. Piet Van Mieghem vast overtuigd: Internet moet veel beter! Akkoord, je kunt al via het wereldwijde net naar de radio luisteren, je kunt bellen en overal heen surfen. En e-mails komen bijna altijd aan. 'Maar geen enkele provider zal garanderen dat je vlekkeloos kunt bellen via



Schematische voorstelling van een klein deel van het wereld omvattende internet. Elk van deze AS-ovaltjes (Autonoom Systeem) staat voor een netwerk van een internet-service-provider (ISP), zoals gezien vanuit de Amsterdam Internet Exchange. Wereldwijd omvat het internet ongeveer 15.000 autonomen systemen.



Het internet bestaat in feite uit twee hiërarchische lagen. De bovenste is de AS-laag die wordt gebruikt voor verkeer tussen internetproviders (het zogenoemde inter-domein routeren). Daaronder ligt de IP-laag, waar tussen gebruikers van dezelfde internetprovider wordt gecommuniceerd (zogenoemde intra-domein routeren)

Internet, dat je een probleemloze videoconferentie kunt houden', zegt Van Mieghem, 'er worden eenvoudig geen kwaliteitsgaranties gegeven.' Stukken geluid of beeld vallen weg, je moet te lang wachten op antwoord, of de verbinding valt domweg uit, hoe breedbandig de aansluiting ook is. En dat terwijl het 'ouderwetse' alternatief, de telefoon, het al tientallen jaren vrijwel zonder die euvels doet.

Volgens Van Mieghem, hoogleraar telecommunicatienetwerken aan de TU Delft, is er een forse ommezwaai nodig bij de opzet van Internet. Providers zullen kwaliteitsgaranties op internetverbindingen moeten gaan bieden, en klanten zullen daarvoor moeten gaan betalen. Bovendien zal de besturing van het worldwide-net fors complexer worden.

Ondergeschikte rol ¶ Om bij de wortel van de problemen te beginnen: Internet is nooit gebouwd om binnen een bepaalde tijd data te versturen. 'Het is in opzet een puur data-netwerk, waarin tijd oorspronkelijk een ondergeschikte rol speelde', doceert Van Mieghem.

Een bestand dat over Internet wordt verstuurd, of het nu e-mail is, een website of een audiosignaal, wordt in pakketjes opgesplitst, die ieder afzonderlijk het netwerk ingaan. Dat netwerk is een gigantisch, relatief ongeordend weggennet van met elkaar verbonden computers. Daarop zoekt ieder pakketje zijn eigen route uit, om bij het eindpunt weer keurig op een rijtje gezet te worden: de e-mail, de webpagina of het stukje geluid is gearriveerd. Hoe lang dat duurt, hangt af van de reistijd van het laatste pakketje, een tamelijk toevallig bepaalde grootheid.

Bovendien gaat er soms onderweg wat verloren, door slechte verbindingen maar vooral doordat de 'routers', drukke verkeersknooppunten in het weggennet, tijdelijk overbelast raken en binnenkomende pakketjes weggooien. Dat is wel weer op te vangen door een systeem van ontvangstbevestiging en opnieuw opsturen, maar dit levert wel extra vertraging op.

'Connectionless' -'verbingsloos'- noemen vaklieden deze aanpak. Niet omdat er geen verbinding tussen verstuurder en ontvanger zou bestaan, maar omdat er voor één stroom van gegevens geen vaste verbinding wordt gereserveerd. Ieder pakketje zoekt zijn eigen weg, bijna op goed geluk. Het voordeel is dat het netwerk weinig hiërarchisch is, en goed bestand is tegen plaatselijke uitval (dan nemen de gegevens gewoon een omweg). Ook is het makkelijk om het netwerk uit te breiden zonder centrale aansturing.

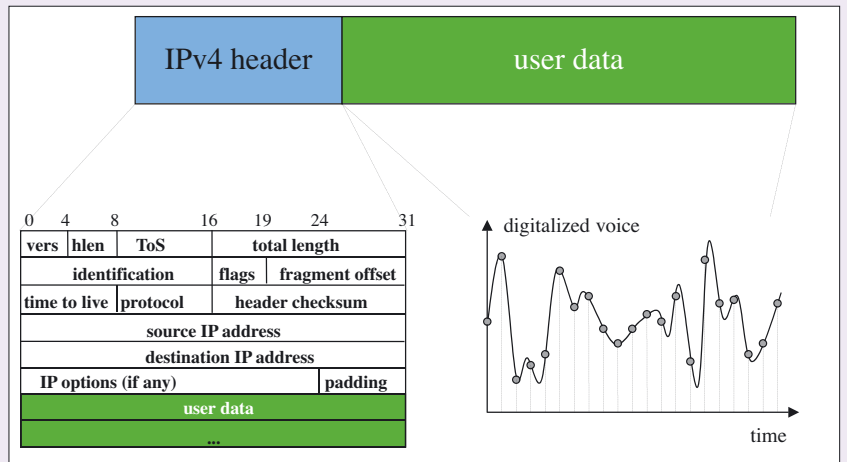
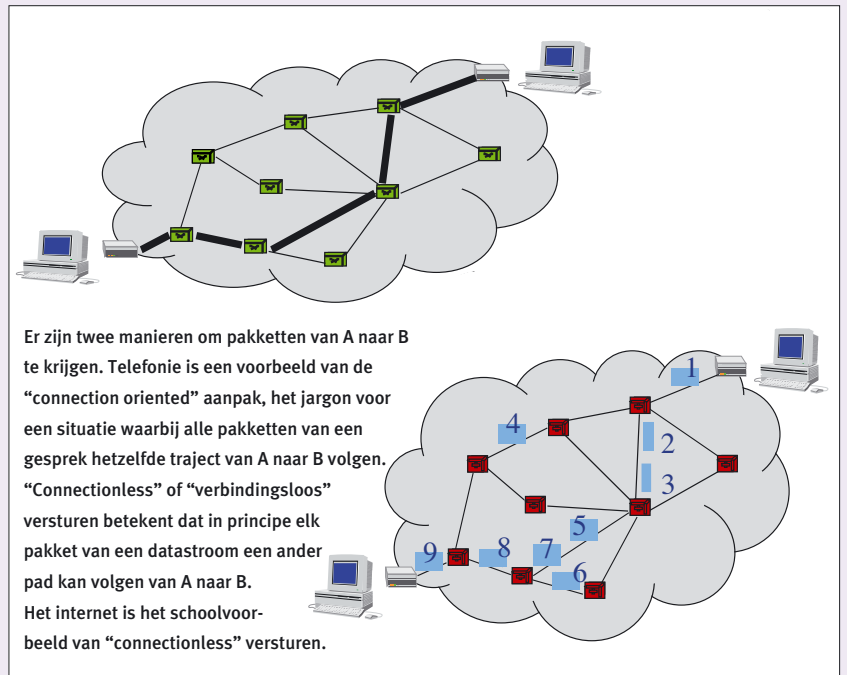
De tegenpool is de 'connection oriented'-aanpak van bijvoorbeeld het wereldwijde telefonienetwerk, dat bestaat uit een strak hiërarchisch georganiseerd patroon van lokale, nationale en internationale centrales en verbindingen. Voor één telefoontje naar Amerika wordt een verbindingroute gereserveerd voor de duur van het gesprek. Alles is erop gericht om de gegevensstroom zo vlekkeloos mogelijk te transporteren, zonder verliezen en liefst zo snel mogelijk, want een vertraging van meer dan een tiende seconde is al hinderlijk bij het spreken.

Eigenlijk, vindt Van Mieghem en veel Internetontwikkelaars met hem, is er een soort mengvorm nodig tussen die twee uitersten. Een controlesysteem dat bepaalde pakketjes hogere prioriteit geeft, zoals aangetekende post, en er ook bandbreedte voor reserveert, waarvoor de gebruiker extra betaalt. 'Quality of Service'(QoS) is de wat nietszeggende vakterm die netwerkspecialisten hantieren voor deze benadering van prijs- en kwaliteitsdifferentiatie. Sterker nog, er is al eens een QoS- datacommunicatieprotocol bedacht, het 'connection oriented' ATM-protocol voor netwerken dat de telefonie-aanbieders eind jaren tachtig ontwikkelden. 'Mede door de Internet-hype heeft dat het nooit gehaald', betreurt Van Mieghem.

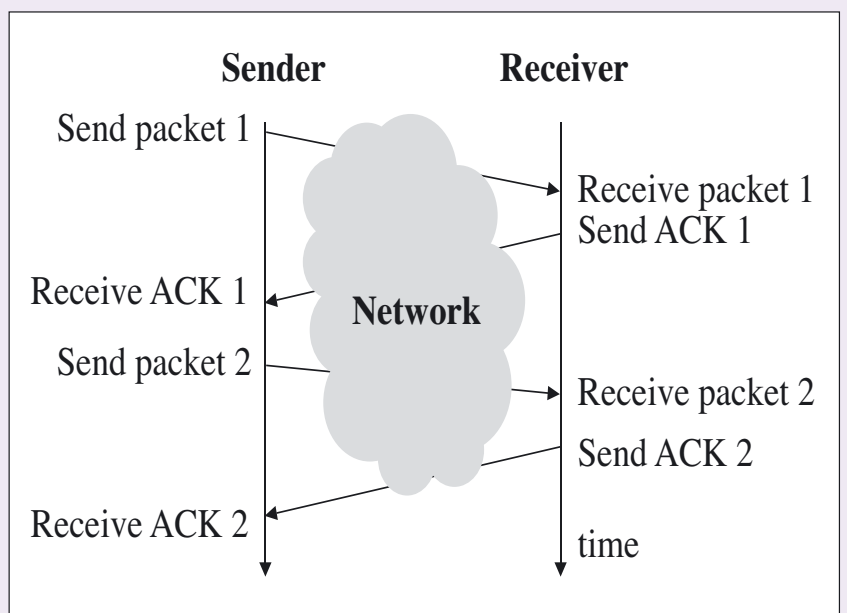
Zorgenkind ¶ Maar nu is er een noodzaak om een verbetering van de machinerie van Internet door te voeren, stelt Van Mieghem. Met de huidige techniek zal het internationale computernetwerk niet veel langer meer kunnen groeien.

'De benadering bij uitbreidingen van internet is altijd geweest: gooi er meer capaciteit tegenaan en alles komt goed', schetst de hoogleraar, 'zo is Internet ook gebouwd. Maar dat zal niet meer werken.'

Routing, het doorschakelen van de datastromen over Internet via drukke wisselstations ofwel 'routers', begint zo langzamerhand een zorgenkind te worden. Internet is georganiseerd in zo'n vijftienduizend deelnetwerken van grote internetaanbieders, ofwel 'autonomous systems' (AS). Binnen hun eigen deelnetwerk gebruiken die voor het vinden van de beste interne routes het OSPF (Open Shortest Path First)-protocol, gebaseerd op een rekenmethode die



Alle informatie verstuurd over het internet is gedigitaliseerd. Deze data wordt verzonden als datapakket. Voorop wordt een controlegedeelte geplaatst, waarin onder meer is opgenomen het IP-adres van de zender en de ontvanger, de totale lengte van het pakket en het protocol waarmee de data (de informatie) is gegenereerd.



Bij het "verbingsloos" versturen van datapakketten over het Internet komen lang niet alle pakketten aan. Om IP-pakketten die niet zijn aangekomen alsnog te versturen, hanteert tcp (Transmission Control Protocol) een techniek waarbij de aankomst van de pakketten worden bevestigd met een "ACK"-bericht.

in 1959 is ontwikkeld door de Nederlandse wiskundige Edsger Dijkstra (1930-2002). Het grote voordeel van dit 'Dijkstra-algoritme' is dat het razendsnel is, ook bij grote netwerken. Wanneer het aantal routers in het netwerk toeneemt, neemt de rekentijd om een optimaal pad te vinden maar iets meer dan evenredig toe.

'Dat is echt gigantisch goed', zegt Van Mieghem.

Maar op een hoger niveau, in krachtige routers die de ruggengraat van het net uitmaken, is het 'Border Gateway Protocol' actief. Dat bepaalt de route niet met 'Dijkstra', maar aan de hand van afspraken tussen internetproviders. Dat hoeft dus niet de kortste route op te leveren.

'Border Gateway Protocol is een werkelijk complex systeem met allerlei updates, dempers en andere routerings-trucs om het verkeer in goede banen te leiden', zegt Van Mieghem, 'routeringsspecialisten zien nu al dat BGP niet heel veel groter meer te maken is.'

De complexiteit en inefficiëntie veroorzaken nu al grote problemen wanneer bijvoorbeeld een BGP-router uitvalt. Een andere oplossing is een veel uitgebreidere vorm van controle, waarbij het ook op het hoogste niveau mogelijk is om een overzicht van het hele netwerk te krijgen en de beste routes te plannen. Een QoS-systeem, met prijs- en kwaliteitsdifferentiatie biedt die mogelijkheid, zegt Van Mieghem, omdat daarbij een overzicht van het netwerk toch al nodig is voor het verdelen van de capaciteit over meer en minder geprivilegieerde datapakketten. Om deze reden heeft de internetstandaarden-organisatie IETF (Internet Engineering Task Force) na veel debat in 1998 de toen al tien jaar oude 'Quality of Service'-gedachte overgenomen, waardoor onderzoek en interesse in QoS-systemen aanmerkelijk toenamen. Experimentele versies van zulke systemen, met bijvoorbeeld twaalf verschillende prioriteitsklassen, worden door tientallen onderzoeksgroepen beproefd.

Beruchte klasse ¶ Toch is de overstap nog niet zo eenvoudig. QoS-routing is rekenkundig veel lastiger dan gewone routing. Het Dijkstra-algoritme heeft één criterium per deeltraject tussen twee routers: de vertraging die de data onderweg opdoet. Maar voor doelmatige QoS-routing moet rekening worden gehouden met meerdere criteria: bijvoorbeeld bandbreedte, snelheid én het verliespercentage van de pakketjes.

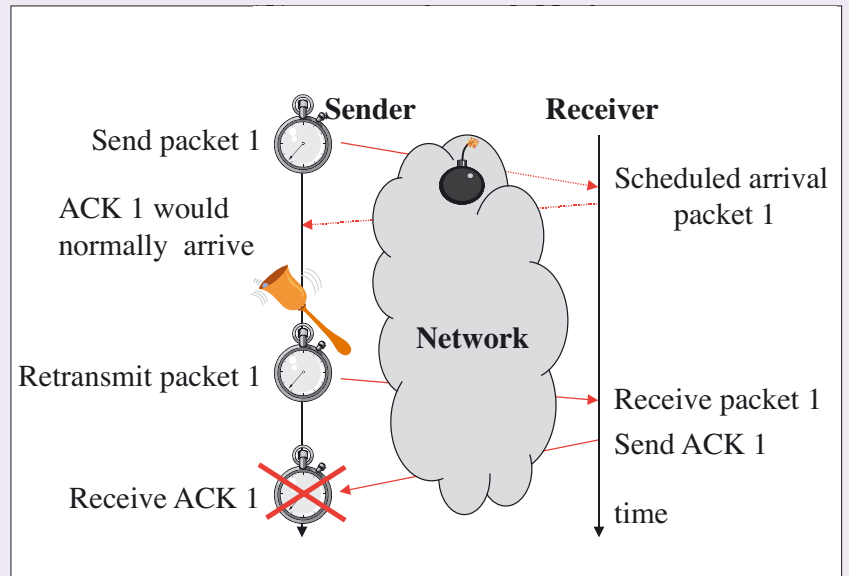
Het zoeken naar een route die in zijn geheel aan meerdere criteria voldoet is, in tegenstelling tot 'Dijkstra', een 'NP-compleet probleem', zegt Fernando Kuipers, promovendus in de groep van Van Mieghem. Ofwel: QoS-routing behoort tot een beruchte klasse van rekenproblemen, waarvoor de rekentijd in sommige gevallen exponentieel toeneemt met de omvang van het probleem, in dit geval de grootte van het netwerk. Voor sommige netwerkstructuren moeten eenvoudigweg alle mogelijke routes worden doorgerekend, en met ieder extra knooppunt kan het aantal mogelijke paden stijgen met het aantal knooppunten in het netwerk. Door een netwerk met enkele tientallen knooppunten lopen er al gauw miljarden malen miljarden mogelijke routes, en zelfs voor de krachtigste computers gaat het dagen of weken duren om die door te rekenen. Voor internet zijn zulke wachttijden geen optie.

'De NP-compleetheit schrikt onderzoekers nogal af', zegt Kuipers. 'Hun redenering is: als je het toch niet precies kunt uitrekenen, moet je er een slag naar slaan. Dat leidt tot 'heuristieken', rekenmethoden die een pad zoeken op basis van redelijk klinkende vuistregels, zoals: kijk bij voorkeur naar korte routes door het netwerk. Ook al heeft een omweg dus misschien wel minder vertraging. Bij heuristische methoden is dus er geen garantie dat het optimale pad gevonden wordt, maar de rekentijd blijft tenminste beperkt (al valt ook dat niet altijd te garanderen).'

Van Mieghem: 'Er is momenteel echt een wildgroei van publicaties waarin mensen hun heuristiek vergelijken met een andere heuristiek die dan toevallig iets slechter of beter is.'

Hijzelf, tot 1998 werkzaam bij telecombedrijf Alcatel in Antwerpen, volgde aanvankelijk ook die strategie, en ontwikkelde het heuristische algoritme TAMCRA, van 'Tunable Accuracy Multiple Constraints Routing Algorithm'. Maar Alcatel had in die tijd geen geld over voor de verdere ontwikkeling van het idee.

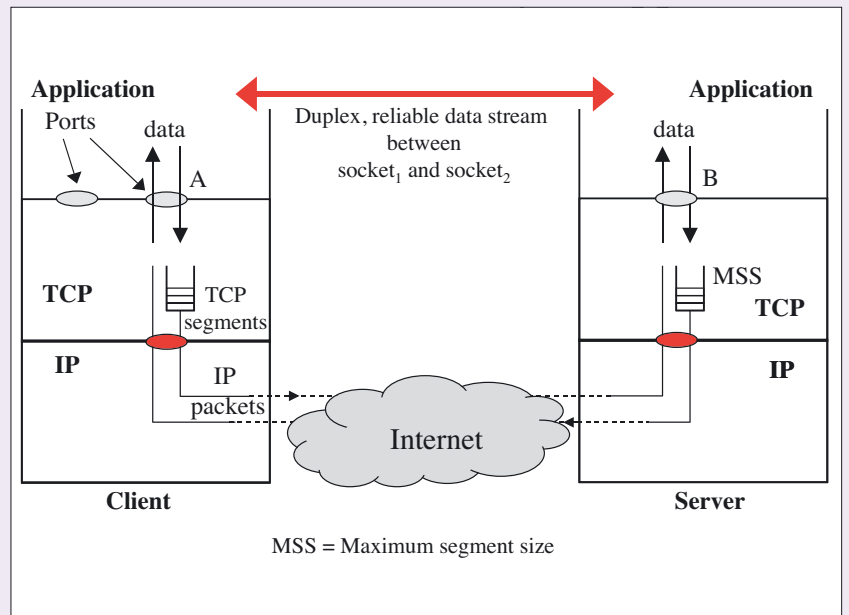
SAMCRA ¶ Daarna begon Van Mieghem in Delft waar hij en zijn promovendus Kuipers besloten toch een gooi te doen naar een niet-heuristische, exacte oplossing, met als resultaat een nieuwe variant: SAMCRA (Self Adapting Multiple Constraints Routing Algorithm). SAMCRA is een algoritme dat wél gegarandeerd het pad vindt dat het best aan alle eisen voldoet (of met zekerheid



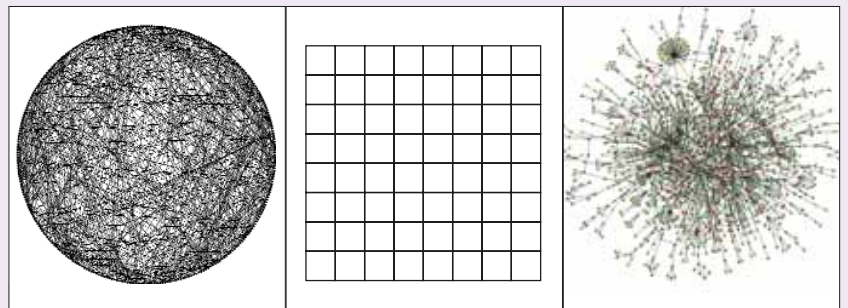
Wanneer de bron en de ontvanger besluiten te communiceren via het TCP-protocol, dan verwacht de bron voor elk verstuurd datapakket een bevestiging (ACK-bericht). Echter, de bron zal niet eeuwig op zo'n ACK wachten. Wanneer een pakketje verloren gaat in het netwerk, dan wacht de bron een bepaalde tijd.

Wanneer hij binnen de verwachte periode nog niks heeft ontvangen, wordt het verloren pakket opnieuw verstuurd.

Dit proces wordt herhaald totdat er een bevestiging is ontvangen.



De communicatie tussen twee e-mail-programma's op verschillende computers over het internet volgt een gelaagde structuur. De bovenste laag is de zogenoemde applicatielaag waar de programma's informatie genereren. Op de daaronderliggende laag deelt TCP op in segmenten. De grootte van de segmenten is afhankelijk van de beschikbare capaciteit van de verbinding A-B. De TCP segmenten worden als IP-pakket verstuurd over het internet, waarna ze door het TCP aan de kant van de ontvanger weer worden gehegroepeerd tot één correcte informatiestroom.



Er bestaan verschillende soorten van netwerktopologieën. Twee extreme types zijn de 'random'-topologie en het roostertopologie. De roostertopologieën zijn zeer regelmatig, terwijl hun tegenhanger – de random topologie – juist ongeordend zijn. De topologie van het internet ligt hoogstwaarschijnlijk ergens in het midden van deze twee extremen. De derde topologie, waartoe naast onder meer de proteïne-structuur waarschijnlijk ook het internet behoort, wordt door fysici 'scale-free' genoemd.

meldt dat zo'n pad niet bestaat.)

Weliswaar kan dat in theorie dus heel lang gaan duren, erkent Van Mieghem. 'Maar NP-compleet betekent explosieve rekentijd in het slechtste geval'.

In de praktijk traden er bij realistische netwerkstructuren nooit problemen met extreem lange rekentijden op, viel de Delftse onderzoekers op. Om die observatie verder te onderbouwen voerde Kuipers een omvangrijk testprogramma uit, waarin hij SAMCRA beproefde voor een groot aantal typen netwerkstructuren. Uiteindelijk vond hij een viertal voorwaarden die allemaal vervuld moeten zijn voor NP-compleet gedrag. De meeste van die voorwaarden waren niet erg realistisch. Een gewoon computernetwerk zou er nooit aan voldoen. Zo was één van de voorwaarden een sterk negatief verband tussen bijvoorbeeld vertraging en het percentage pakketverlies. Maar normale verbindingen tussen twee routers verliezen juist méér pakketjes wanneer de vertraging oploopt, legt Kuipers uit. Het samengaan van de vier voorwaarden achten de onderzoekers al helemaal onrealistisch.

'Het mooie daarvan is dat je kunt concluderen dat realistische netwerken toch goed te berekenen zijn met een exact algoritme', zegt Van Mieghem. 'We hebben nog meer algoritmen ontwikkeld, maar SAMCRA is het beste paard in onze stal.' Samen met onderzoekers van de Universiteit van Arizona en de Universiteit van Texas, in Austin, vergeleken ze SAMCRA met een groot aantal heuristische algoritmes, door op een computer een reeks realistische netwerken te simuleren. 'SAMCRA deed het steeds beter dan de anderen', meldt Kuipers. Overigens kunnen de twee niet bewijzen dat SAMCRA nooit NP-compleet gaat doen in realistische netwerken, erkent Van Mieghem, 'Als je dat zou kunnen, dan ben je aardig in de richting om een hoofdprijs in de wiskunde te winnen.'

Over enkele maanden promoveert Kuipers op zijn werk aan het algoritme, dat de netwerkonderzoekers aan de man proberen te brengen onder internet- en netwerkexperts. 'De code staat op onze site', nodigt Van Mieghem uit. 'Het mooie is ook', werft hij, 'dat het SAMCRA ook van toepassing is op andere routeringsproblemen. Bijvoorbeeld routeplanning voor auto's: waar het algoritme van Dijkstra eenvoudig de kortste route kan vinden, zou SAMCRA ook rekening kunnen houden met vertraging door files of stoplichten, of desnoods met het aantal restaurants langs de weg.'

Kuipers is ooit benaderd door een robotica-onderzoeker die SAMCRA wilde gebruiken voor een zelfstandige robot. De robot werkte met informatie van verschillende camera's. Bij het integreren van de verschillende videobeelden staken met routing vergelijkbare problemen de kop op.

Ook andere toepassingen, bij logistieke problemen of bij het zoeken in grote databases, zijn denkbaar. Van Mieghem: 'Ik houd me aanbevolen'.

Business-model ¶ 'Een brede toepassing van SAMCRA en de kwaliteitsdifferentiatie van QoS zou internetaanbieders meteen aan een beter 'business model' helpen', zegt de hoogleraar. 'Huidige internetaanbieders werken meestal met een "flat fee", waarbij je voor een bepaald bedrag zoveel kunt surfen als je wilt (tot een zekere limiet). Voor de verkochte bandbreedte geldt een inspanningsverplichting, geen kwaliteitsgarantie.'

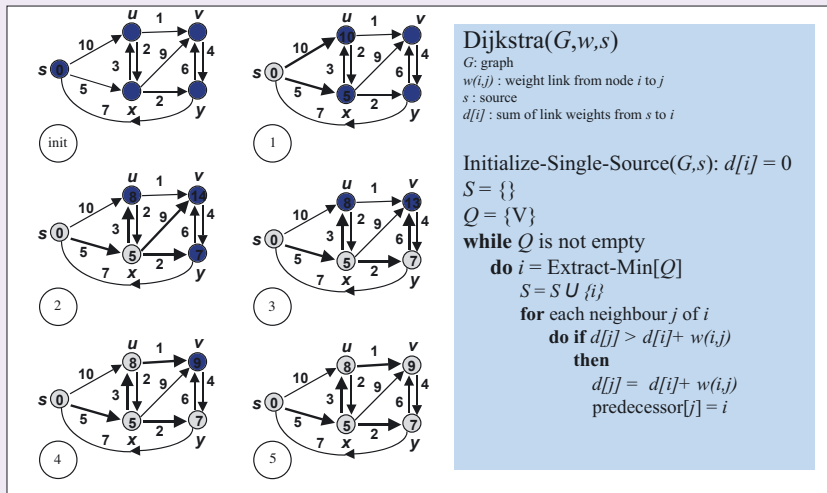
Maar om het geld te blijven laten rollen wanneer uiteindelijk iedereen op internet zit, en er geen groei van de markt meer is, zul je echter aan prijsdifferentiatie moeten doen, voorspelt Van Mieghem.

'Er is in Amerika wel eens onderzocht welke types infrastructures op de lange duur winstgevend zijn', vertelt Van Mieghem. 'Het bleek dat bijvoorbeeld postrijen en spoorwegen nauwelijks renderen. Alleen het telefoonnetwerk, in dit geval het Amerikaanse AT&T, bracht na zestig jaar geld op.'

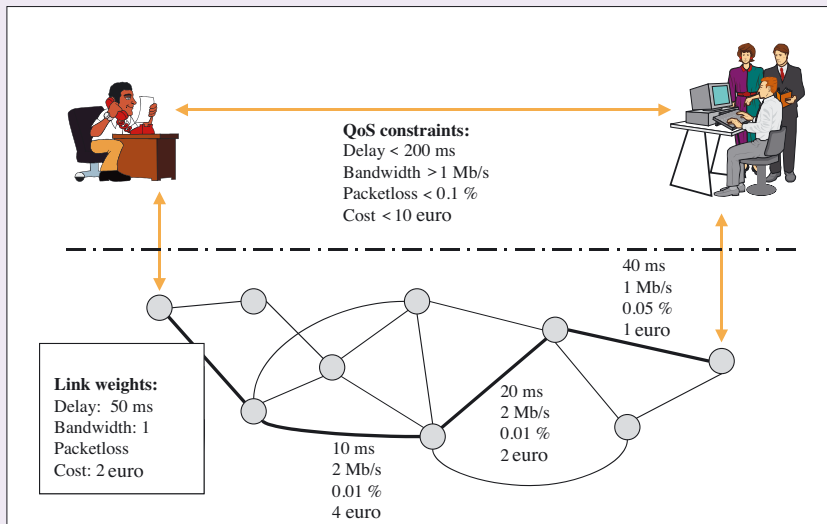
Volgens Van Mieghem heeft het, naast de monopolie-positie die telefoonmaatschappijen hadden, te maken met de 'connection oriented' organisatie van het telefoonnetwerk, waar je méér betaalt voor uitgebreidere faciliteiten (internationaal bellen is duurder dan lokaal), maar waar je dan ook gegarandeerde kwaliteit krijgt.

SAMCRA zou een eerste stap kunnen zijn om ook op internet die kant op te gaan, denkt Van Mieghem, om uiteindelijk uit te komen bij de 'heilige graal'. 'Wanneer we die hebben bereikt, kun je op ieder moment de voor iedere toepassing vereiste verbindingskwaliteit krijgen, tegen redelijke kosten en overal.'

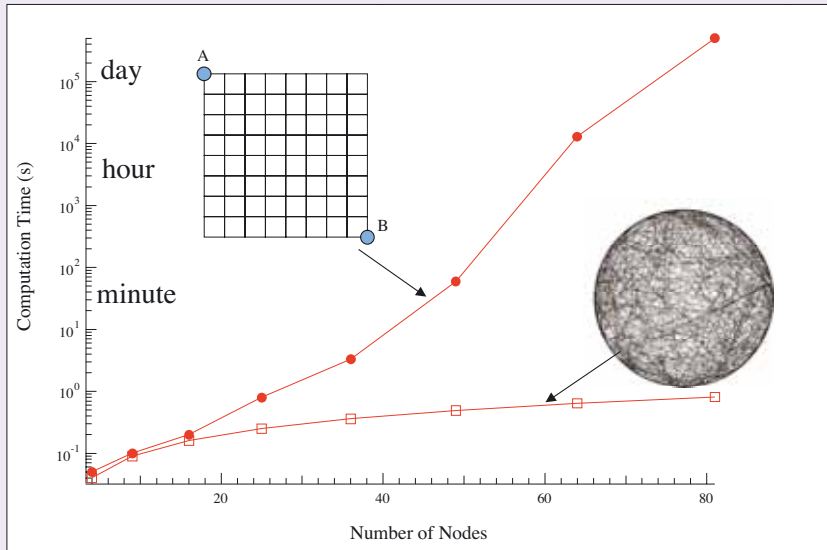
'Wie er op al die kwaliteitsgradaties en -garanties zit te wachten? Banken die geldtransacties gegarandeerd veilig willen doen', oppert de hoogleraar, 'maar ook bedrijven die willen videoconferentiëren of bellen over het internet. Ik ken genoeg mensen die zeggen: Voice over IP (Internettelefonie - red.) werkt bij mij prima. Maar wat als niet de huidige 200 duizend maar 20 miljoen mensen dat



Het Dijkstra algoritme vindt vanaf het beginpunt (s) de kortste paden naar alle andere knooppunten in het netwerk. De afstand van s naar alle andere knooppunten ($d[i]$) is initieel oneindig, behalve voor s zelf: $d[s]=0$. Dijkstra kiest telkens het knooppunt i waarvoor $d[i]$ het kleinst is en bekijkt of hij de paden naar de burens van i kan verbeteren door via i te gaan. Knooppunten die eenmaal zijn gekozen worden nooit een tweede keer gekozen. Dus wanneer alle knooppunten zijn gekozen, stopt "Dijkstra" en zijn de kortste paden gevonden.



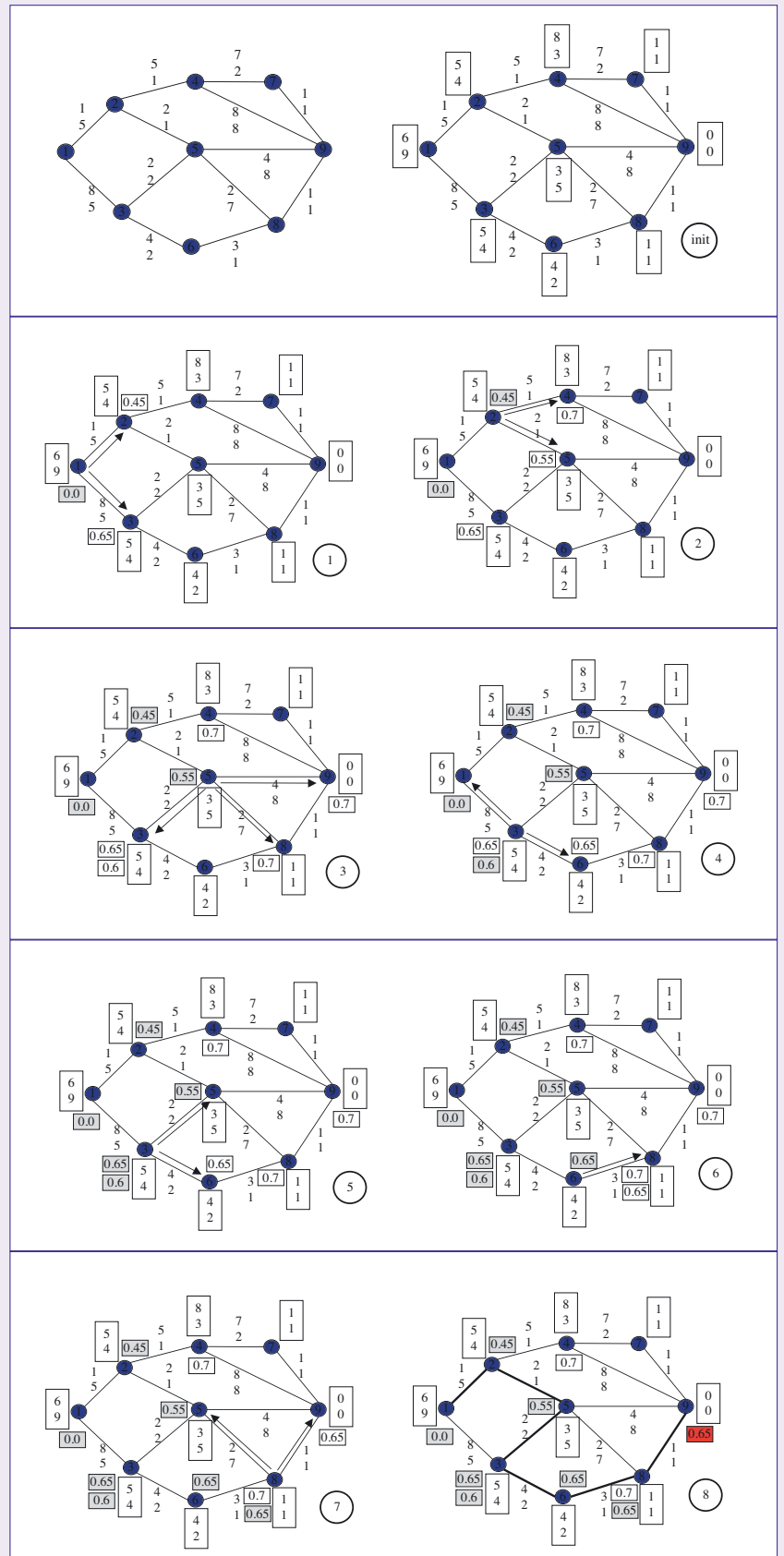
Het QoS-routeringsprobleem behelst het vinden van paden die aan meerdere eisen (bijv. vertraging, bandbreedte, verlieskans en kosten) voldoen. Zo kan VoIP (internettelefonie) alleen goed functioneren als de vertraging kleiner is dan 200 ms, de bandbreedte tenminste 10 Kb/s, een verlieskans kleiner dan 1 % en de kosten: zo laag mogelijk. Het netwerk kan uit verschillende verbindingen bestaan (glas, koper, satelliet), elk met zijn eigen karakteristieken. De kwaliteitskenmerken van een dergelijk pad worden bepaald door de gewichten van de afzonderlijke verbindingen van dat pad. De kunst van QoS-routeren is om dat pad te vinden, dat het binnen de gestelde QoS eisen blijft.



NP-complete problemen zijn problemen waarvoor het aantal berekeningsstappen en de rekentijd in het ergste geval razendsnel uit de hand kan lopen. Het QoS routeringsprobleem is zo'n probleem, maar gelukkig blijkt de rekentijd in de praktijk erg snel te zijn.

willen, en niet alleen 's avonds? Daarnaast komen er natuurlijk toepassingen die u en ik zich nog niet voor kunnen stellen. Complete filmbibliotheken e-mailen, real-time grafische toepassingen in 3D, wie zal het zeggen? Het verleden leert dat als je meer bandbreedte aanbiedt, de mensen wel iets zullen verzinnen om dat weer op te vullen.'

Voor nadere informatie over dit onderwerp kunt u contact opnemen met prof.dr.ir. Piet Van Mieghem, tel. (015) 278 2397, e-mail p.vanmieghem@ewi.tudelft.nl of met ir. Fernando Kuipers, tel. (015) 278 1347, e-mail f.a.kuipers@ewi.tudelft.nl



Een illustratie van SAMCRA. Het netwerk wordt gekenmerkt door twee parameters: vertraging en kost. Het voorbeeld toont een zoektocht naar het pad tussen knooppunt 1 en knooppunt 9 dat aan de eisen voldoet, in dit geval gesteld op 20,20. Dat wil zeggen dat de vertraging niet langer mag zijn dan 20 eenheden en de kosten kleiner of gelijk moet zijn aan 20. In de initialisatiefase wordt het Dijkstra algoritme gebruikt om ondergrenzen te vinden voor de afstand van elk knooppunt naar de bestemming. Deze ondergrenzen zijn in de rechthoeken weergegeven. Hierna begint SAMCRA (net zoals Dijkstra) met het kiezen van het pad met de kleinste lengte en dit pad onder bepaalde voorwaarden uit te breiden naar de burens. SAMCRA's lengtemaat is niet-linear en wordt in de kleine rechthoeken weergegeven. Een eenmaal gekozen pad wordt grijs gekleurd. In stap 3 wordt het duidelijk dat meerdere paden kunnen worden opgeslagen bij een knooppunt. SAMCRA stopt (stap 8) wanneer de bestemming de kleinste lengte heeft.