

Het berekenen van kwaliteit van Internet-telefonie met wiskundige modellen

Door de opkomst van het Internet heeft de klassieke telefonie er sinds kort een geduchte concurrent bij: Internet-telefonie, vaak ook wel Voice-over-IP of kortweg VoIP genoemd. Het voornaamste struikelblok voor een grootscheepse invoering van VoIP is lange tijd de geluidskwaliteit geweest, die in veel gevallen ondermaats was. Echter, door de opkomst van snelle Internet-verbindingen – bijvoorbeeld via ADSL – kun je prima bellen via VoIP. En door het ontwikkelen en doorrekenen van wiskundige modellen zijn we inmiddels in staat de communicatienetwerken zódanig in te richten dat de geluidskwaliteit vergelijkbaar is met die van de klassieke telefonie, en veel bedrijven zijn inmiddels al overgegaan op VoIP.

Rob van der Mei

Rob van der Mei studeerde in 1990 af in zowel Wiskunde als Econometrie aan de Vrije Universiteit (VU). Na zijn promotie heeft hij 10 jaar gewerkt als consultant en onderzoeker op dit vakgebied bij KPN, AT&T en TNO Informatie- en Communicatietechnologie. Momenteel is hij deeltijd hoogleraar aan de VU, bij de opleiding BedrijfsWiskunde en Informatica (BWI). Daarnaast is hij senior onderzoeker op het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI) als specialist op het gebied van Performance Analyse van Communicatienetwerken.

Rob Kooij

is consultant en senior onderzoeker bij TNO Informatie- en Communicatietechnologie in Delft, en is specialist op het gebied van Quality of Service van communicatienetwerken. Hij geeft regelmatig lezingen en gastcolleges voor bedrijven en universiteiten.

In het najaarssemester geeft Rob van der Mei het Masters college "Performance Analyse van Communicatienetwerken" voor studenten BWI, Informatica en Econometrie. Voor meer informatie, zie www.few.vu.nl/~mei.

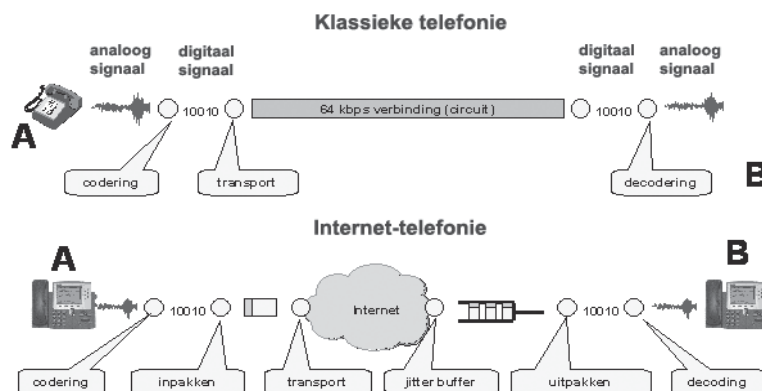
De opkomst van Internet-telefonie – VoIP – is zonder twijfel één van de meest veelbelovende ontwikkelingen binnen de informatie- en communicatietechnologie (ICT). Lange tijd is VoIP door de bestaande aanbieders van telefoniediensten niet serieus genomen vanwege het feit dat de geluidskwaliteit van VoIP-verbindingen vaak slecht was in vergelijking met de doorgaans goede geluidskwaliteit bij de klassieke telefonie. Maar inmiddels is daar verandering in gekomen. Door de opkomst van breedband-technologie (bijvoorbeeld ADSL, WiFi, UMTS, kabel-Internet) kun je in theorie perfect bellen

via het Internet. Wiskundigen en informatici hebben zich gebogen over de oorzaken van de slechte geluidskwaliteit, en inmiddels weten we hoe we een netwerk zo moeten inrichten en besturen dat de kwaliteit van VoIP verbindingen vergelijkbaar is met de klassieke telefonie.

Hoe werkt Internet-telefonie eigenlijk?

Het klassieke telefonienetwerk is een *circuitgeschakeld* netwerk. Als persoon A het telefoonnummer van persoon B draait, dan zorgt het netwerk ervoor dat er een spraakverbinding, ook wel *circuit* genoemd, tussen A en B wordt opgezet, waardoor spraakverkeer mogelijk is in beide richtingen. Het circuit blijft actief totdat één van de twee bellers ophangt. Voor elke verbinding wordt een vaste hoeveelheid transmissiecapaciteit, ook wel *bandbreedte* genoemd, in het netwerk gereserveerd. Voor vaste telefonie is dat meestal 64 kilobits per seconde (kbps), en voor GSM is dat rond de 10 kbps.

Het Internet echter is een *pakketgeschakeld* netwerk. Computers, of VoIP telefoons, vertalen stemgeluid van persoon A in een digitaal signaal, en vervolgens wordt deze digitale informatie in pakketjes over het netwerk verstuurd naar persoon B, zonder dat er sprake is van een directe verbinding. Aan de ontvangende kant worden deze pakketjes weer netjes uitgepakt en terugvertaald naar stemgeluid dat persoon B kan horen. Een belangrijk verschil is dat pakketgeschakelde netwerken *alleen* bandbreedte gebruiken als er daadwerkelijk pakketten verstuurd worden, terwijl bij circuitgeschakelde netwerken een vaste hoeveelheid bandbreedte worden gebruikt, ook wanneer een gesprek even stil valt.



Klassiek telefoongesprek: stemgeluid gaat, na omzetting van analoog naar digitaal, direct via telefooncentrales naar gesprekspartner.

Gesprek via Internet: VoIP telefoon of PC verpakt gedigitaliseerde geluidssignaal in pakketjes die het Internet op worden gestuurd. Eventueel maakt de encoder de pakketjes klein door compressie. Via de adresinformatie vindt het pakketje de weg naar de bestemming. Daar worden ze tijdelijk in een buffer geplaatst. Na uitpakken wordt digitale informatie terugvertaald in stemgeluid.

Het verschil tussen circuitgeschakelde en pakketgeschakelde netwerken vindt een aardige analogie met het wegennet. In circuitgeschakelde netwerken heeft iedere weggebruiker zijn eigen privé-rijstrook, terwijl bij pakketgeschakelde netwerken meerdere gebruikers op dezelfde rijstrook kunnen rijden. Deze analogie maakt ook meteen de wederzijdse voor- en nadelen duidelijk. Het grote voordeel van circuitgeschakelde netwerken is dat er feitelijk geen verkeersopstoppen (vaak *congestie* genoemd) voorkomen, terwijl in pakketgeschakelde netwerken de kans op verkeersproblemen groot is, zeker wanneer het netwerk tijdelijk zwaarbelast is. En dat gebeurt nogal eens op het Internet wanneer veel gebruikers tegelijkertijd zitten te surfen of MP3-bestanden zitten te downloaden...! De prijs die circuitgeschakelde netwerken hiervoor betalen is een enorm verlies aan efficiëntie van het gebruik van transportcapaciteit.

Welke factoren bepalen de gesprekskwaliteit?

Gesprekskwaliteit kun je op drie manieren beoordelen:

1. Eén-weg-luisterkwaliteit: van A naar B, ofwel "Hoe hoor ik de ander?"
2. Eén-weg-spreekkwaliteit: van A naar A, ofwel "Hoe hoor ik mezelf?"
3. Twee-weg-interactiekwaliteit: van A naar B en van B naar A, ofwel "Hoe verloopt de interactie?"

Bij de klassieke digitale telefonie treedt nauwelijks vervorming op van het spraaksignaal. De één-weg-luisterkwaliteit is bijna altijd goed en hangt eigenlijk alleen nog maar af van de kwaliteit van het telefoontoestel. Ook treden er nauwelijks echo's op en is de vertraging heel kort.

Daardoor zijn bij de klassieke telefonie ook de één-weg-spreekkwaliteit en de twee-weg-interactiekwaliteit beide hoog. Kort gezegd, klassieke telefoonnetwerken maken niet efficiënt gebruik van de beschikbare bandbreedte, maar leveren op alle fronten een goede kwaliteit.

Bij Internet-telefonie ligt dat anders, en treedt over het algemeen wel kwaliteitsdegradatie op. Dit heeft drie oorzaken. Ten eerste introduceren programma's die de geluidssignalen comprimeren, de codecs, vervorming van het signaal. Ten tweede kunnen pakketten die worden verstuurd over het Internet verloren gaan. Daardoor vallen er als het ware "gaten" in het spraaksignaal, waardoor de één-weg-luisterkwaliteit afneemt.

Een belangrijk probleem ligt bij de één-weg-spreekkwaliteit in de vorm van *echo's*: je hoort je eigen stem vertraagd terug. Dit effect is hoorbaar bij vertragingen groter dan 25 milliseconden (ms). Helaas is de vertraging bij Internet-telefonie altijd groter dan 25 ms. Het echoprobleem valt echter eenvoudig op te lossen door middel van *echo-cancellers*, geavanceerde programma's die een vertraagde copy van het stemgeluid, de echo dus, kunnen wegfilteren.

Daarnaast is de reistijd van de spraaksignalen van belang voor het voeren van een goed en interactief gesprek (al geldt dit in mindere mate bij van die zelfingenomen mensen die alleen praten en niet luisteren...). Bij normale telefonie vormt dat nauwelijks een probleem, maar bij Internet-telefonie des te meer. Als de één-weg-vertraging groter is dan 150 ms neemt de kwaliteit duidelijk hoorbaar af. Bij een één-weg-vertraging van meer dan 400 ms zal het niet meer mogelijk zijn een fatsoenlijk interactief gesprek te voeren.

Waar wordt vertraging opgelopen?

Bij de communicatie tussen A en B treden allerlei vertragingen en vervormingen op.

Coderings-vertraging: De eerste vertraging bij een Internet-telefonie gesprek begint al bij de computer, of VoIP-telefoon, van persoon A. Die moet namelijk het stemgeluid omzetten in een digitaal signaal. Dit coderen van een spraak-sample kost tijd. De precieze benodigde tijd hangt af van de gebruikte codec. De traditionele telefonie gebruikt een codec (G.711) die een digitale verkeersstroom van 64 kbps genereert, met daarbij een vertraging van slechts 0.125 ms. Er zijn tegenwoordig ook codecs beschikbaar die de spraaksignalen comprimeren, om zodoende zuiniger om te gaan met de beschikbare bandbreedte op het netwerk. Hoe beter de compressie, des te kleiner is het pakketje met geluids informatie, maar des te langer de rektijd om de compressie uit te voeren met als gevolg meer vertraging. Voorbeelden van veelgebruikte codecs zijn G.726 (32 kbps), G.729 (8kbps) en G.723.1 (6.3 kbps). Bij de laatste bedraagt de coderingsvertraging echter al 37.5 ms. Merk op dat een codec natuurlijk alleen maar bruikbaar is als de modem in de computer voldoende capaciteit heeft. Zo kan een eindgebruiker met een 56K modem de standaardtelefonie codec G.711 (64 kbps) niet gebruiken!

Inpakvertraging: Naast het coderen kost ook het inpakken van de spraakframes in pakketten tijd. De precieze vertraging hangt af van het aantal frames dat in een pakket wordt gestopt. Typische waarden voor deze zogenaamde pakketisatie-vertraging bedragen enkele tientallen milliseconden.

Propagatie-vertraging: En dan is er nog vertraging op het Internet. Het pakket gevuld met spraak-samples reist over het Internet, en loopt daarbij vertraging op. Deze vertraging heeft een vaste en een variabele component. De vaste component hangt bijvoorbeeld af van de afstand die de pakketten moeten afleggen. Aangezien de informatie zich met grofweg tweederde van de lichtsnelheid beweegt, bedraagt deze propagatie-vertraging ongeveer 5 microseconden per kilometer.

Internet-vertraging: De variabele vertraging is het gevolg van de veranderende netwerkcondities op het Internet. Een pakketje kan bijvoorbeeld belanden achter een aantal pakketten die horen bij een MP3-bestand dat wordt gedownload. In dat geval neemt de vertraging al snel toe. Voor Internet-telefonie zou het goed zijn als telefoniepakketten voorrang zouden krijgen boven dit soort "MP3-pakketten". Voor het downloaden van grote bestanden maakt een paar milliseconden immers toch niet zoveel uit,

maar voor Internet-telefonie des te meer!

Typische waarden voor één-weg-vertraging op het huidige Internet liggen tussen 20 en 150 ms. Via de DOS commando's PING en TRACERT kun je zelf eenvoudig de vertraging en de route van je PC naar websites bepalen.

Variatie in vertraging, "jitter": De pakketten volgen niet noodzakelijkerwijs dezelfde route van A naar B over het Internet, en lopen mede daardoor uiteenlopende vertragingen op. Deze variatie in vertraging wordt ook wel jitter genoemd. Als gevolg van jitter komen de pakketten niet in een constante stroom bij persoon B aan. De decoder aan de ontvangende kant moet echter wel een continue stroom frames krijgen om een vloeiend stemgeluid te kunnen reproduceren. Daarom worden de aangekomen pakketten tijdelijk opgeslagen in een zogenaamde uitspeelbuffer, ook wel jitter-buffer genoemd. Deze buffer houdt het eerste pakket dat arriveert een vaste tijd, zeg T milliseconden, vast. Pas daarna wordt het pakket doorgegeven aan de decoder, en vanaf dat moment leest het programma de frames met een constante snelheid uit. De pakketjes die onderweg teveel vertraging opliepen, worden als verloren beschouwd.

De parameter T heeft veel invloed op de gesprekskwaliteit. Als T te groot is, dan is het geluid aan de ontvangende kant weliswaar zuiverder, maar lopen de pakketten te veel vertraging op. Als T daarentegen te klein is, dan gaan er teveel pakketten verloren. Een goede waarde van T is meestal enkele tientallen milliseconden.

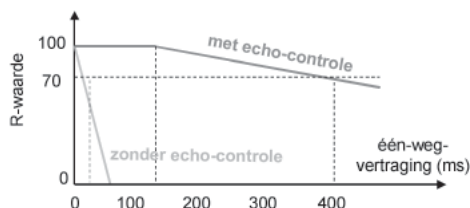
Pakketverlies: In telecommunicatienetwerken is het verloren gaan van pakketten een gewoon verschijnsel. Dit kan bijvoorbeeld optreden door tijdelijke overbelasting van het netwerk, of door fouten in fysieke dragers zoals bij mobiele netwerken of bij satellietcommunicatie. Voor de kwaliteit van Internet-telefonie hoeft een gering pakketverlies niet desastreus te zijn: pas als een bepaalde drempel wordt overschreden, zal de kwaliteit merkbaar afnemen. De hoogte van deze drempel hangt af van de codec en van het al dan niet gebruik van slimme methoden om pakketverlies te camoufleren. Dit wordt wel Packet Loss Concealment (PLC) – vrij vertaald "het verbergen van pakketverlies" – genoemd. Een codec zonder PLC laat bijvoorbeeld bij het verloren gaan van een pakket slechts een stilte horen, of een "tick", maar een codec met PLC herhaalt bijvoorbeeld het vorige pakket, hetgeen nauwelijks merkbaar is.

Het E-model voor gesprekskwaliteit

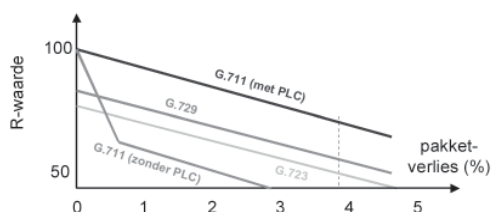
De kwaliteit van een telefoongesprek hangt dus af van allerlei vertragingen en vervormingen. Maar hoe kun je nu, gegeven die vervormingen en vertragingen, de kwaliteit van een telefoon-

gesprek kwantificeren, of voorspellen? Welnu, dat doet het zogenaamde *E-model* voor ons, zie [1]. Het E-model is ontwikkeld door ETSI en ITU, dat zijn organisaties die allerlei standaarden en afspraken vastleggen op het gebied van telecommunicatie. Het E-model geeft een kwaliteitsmaat, de zogenaamde R-waarde, een getal tussen 0 en 100. R-waarde 100 staat voor perfecte kwaliteit, en als de R-waarde lager dan 70 is dan is de kwaliteit onacceptabel. Het E-model beschrijft hoe de R-waarde afhangt van allerlei parameters, zoals bijvoorbeeld de één-weg-vertraging en het pakketverlies.

Onderstaand figuur laat zien hoe de R-waarde, de kwaliteit dus, afhangt van de één-weg-vertraging voor de G.711 codec. De bovenstaande lijn is voor het geval er perfecte echocontrole is. In dat geval is de kwaliteit bij vertraging van minder dan 150 ms nagenoeg perfect. Bij een vertraging van meer dan 400 ms wordt de kwaliteit onacceptabel. Zoals al eerder is opgemerkt zien we dat zonder echocontrole (onderste lijn) al bij meer dan 25 ms vertraging de kwaliteit onacceptabel wordt. Internet-telefonie zonder echocontrole is dan ook ondenkbaar!



Nu gaan we kijken naar de kwaliteitsdegradatie als gevolg van pakketverlies. Het plaatje hieronder laat zien hoe de gesprekskwaliteit afneemt als het pakketverlies toeneemt, voor verschillende codecs (met en zonder PLC).

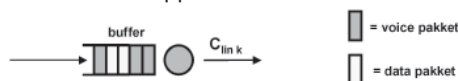


Als we de afbeeldingen combineren, kunnen we voor veel situaties de gesprekskwaliteit bepalen. Stel bijvoorbeeld dat we te maken hebben met het scenario waarin we de G.711 codec met PLC gebruiken, met perfecte echocontrole, een vertraging van 220 ms en 1% pakketverlies. We lezen dan in de onderste grafiek af dat de R-waarde ongeveer 90 is. In de bovenste grafiek zien we dat er voor een vertraging van 220 ms een extra degradatie van ongeveer 5 (op de R-schaal) optreedt. Dit leidt dus tot een totale R-waarde van $90 - 5 = 85$, in dat geval is er dan sprake van hoge kwaliteit. Gebruiken we echter de G.711 codec zonder PLC, dan is

de R-waarde bij 1% pakketverlies ongeveer 70. De totale R-waarde, inclusief vertraging, wordt dan $70 - 5 = 65$. De kwaliteit is in dit geval onacceptabel!

Wachtrijmodellen

Maar hoe kunnen we nu de vertraging en pakketverlies voorspellen? Welnu, daarvoor kunnen we modellen en resultaten uit de wachtrijtheorie gebruiken, zoals die bij verschillende Bedrijfswisskunde & Informatica colleges behandeld wordt aan de VU, zoals "Performance Analyse van Communicatienetwerken" en "Modelleren van Bedrijfsprocessen". Stel bijvoorbeeld dat bij een netwerkknooppunt twee soorten verkeer aankomen: Internet-telefonie-verkeer en dataverkeer - bijvoorbeeld het downloaden van Web pagina's of MP3-tjes - en dat er geen prioriteitsmechanisme is (dit is het geval bij de meeste Internet routers). Als de pakketteninstroom tijdelijk groter is dan de snelheid C_{link} waarmee de pakketten kunnen worden afgehandeld, dan worden pakketten tijdelijk gebufferd, hetgeen leidt tot vertraging. Hoeveel vertraging wordt opgelopen hangt af van allerlei factoren, zoals bijvoorbeeld het aantal netwerkknooppunten tussen A en B, de karakteristieken van het netwerkverkeer en de belasting van de links tussen de knooppunten. Deze vertraging kan worden voorspeld met behulp van een wachtrijmodel. Het plaatje hieronder geeft een eenvoudig wachtrijmodel voor één enkel knooppunt.



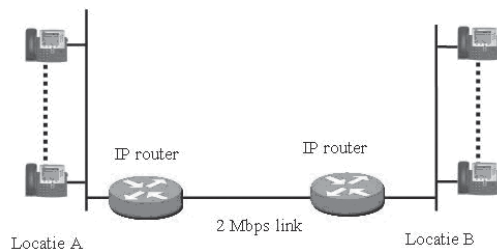
In dit model representeren de klanten voice- en data-pakketten, en representeert de bediende de capaciteit van de uitgaande link. Voor dit soort modellen kunnen we resultaten uit de wachtrijtheorie gebruiken om bijvoorbeeld de vertraging en de verlieskansen uit te rekenen.

Samengevat, als we wachtrijmodellen combineren met het E-model kunnen we de kwaliteit van een VoIP-telefoongesprek voorspellen. Omgekeerd kunnen we dan uitrekenen aan welke eisen het netwerk moet voldoen om een gegeven kwaliteitsniveau van VoIP te realiseren. Op die manier kunnen we ervoor zorgen dat de kwaliteit van VoIP minimaal zo goed is als die van de klassieke telefonie, en heeft de klassieke telefonie er een geduchte concurrent bij!

Voorbeeld

Als voorbeeld beschouwen we de situatie dat er tussen twee locaties A en B van een bedrijf gebruik wordt gemaakt van VoIP. Voor het gemak gaan we er van uit dat er op de link tussen

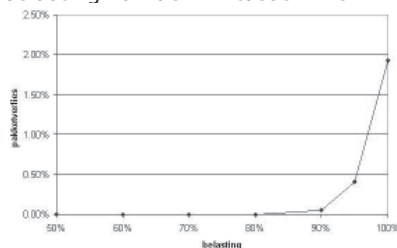
locatie A en locatie B alleen VoIP verkeer aanwezig is. Om een concrete berekening te maken moeten we een aantal aannames doen: we veronderstellen dat er gebruik wordt gemaakt



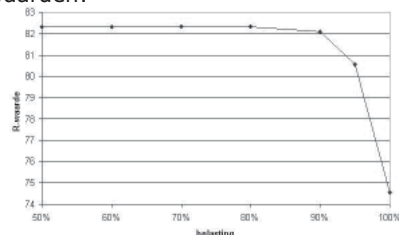
van de G.729 codec, dat de bandbreedte tussen A en B 2 Mbps bedraagt, dat de buffergrootte in elke router 25 pakketten bedraagt en dat de voice pakketten 60 Byte zijn. Onder deze omstandigheden zal de vertraging van pakketten nooit meer zijn dan ongeveer 80 ms. Als we verder uitgaan van perfecte echocontrole dan is de enige potentiële bron van kwaliteitsdegradatie pakketverlies. We zullen laten zien hoe we met behulp van een wachtrijmodel het pakketverlies kunnen berekenen als functie van de belasting op de link tussen A en B.

Het wachtrijmodel dat we gebruiken is het zogenaamde M/D/1/K+1 model. Hierin komen pakketten aan volgens een Poisson proces met aankomstintensiteit λ . De bedieningsduur T is deterministisch terwijl de bufferlengte K bedraagt. De belasting ρ is gegeven door $\rho = \lambda T$.

De kans op pakketverlies in het M/D/1/K+1 model kan bepaald worden m.b.v. een resultaat van Cohen [2], zie het kader. Het volgende figuur laat het pakketverlies zien als functie van de belasting van de link tussen A en B.



Met behulp van het E-model kunnen we de pakketverlieswaarden weer doorvertalen naar R-waarden:



Op basis van deze figuur kunnen we voor dit scenario concluderen dat we voor een goede VoIP kwaliteit (R-waarde minimaal 80) een belasting van maximaal 96% toe kunnen staan.

Gaat Internet-telefonie de klassieke telefonie vervangen?

Dat weet je nooit zeker. Wat we echter wél zien in de praktijk, is dat nu door middel van dit soort modellen en analyses niet alleen veel inzicht is verkregen in welke factoren de gesprekskwaliteit bepalen, maar ook hoe ze die bepalen. Daardoor is het nu mogelijk uitstekende kwaliteit te leveren van VoIP over netwerkdomeinen waarover de netwerkkarakteristieken gecontroleerd kunnen worden.

De verlieskans in het M/D/1/K+1 model voldoet aan

$$P_L = \frac{1 + (\rho - 1)\alpha_K(\rho)}{1 + \rho\alpha_K(\rho)},$$

$$\text{waarin } \alpha_K(\rho) = \frac{1}{(K-1)!} \left[\frac{d^{K-1}}{dz^{K-1}} \frac{1}{G(z)} \right]_{z=0}$$

$$\text{met } G(z) = e^{-\rho(1-z)} - z.$$

De laatste tijd zien we daarom steeds meer grote bedrijven overgaan naar VoIP-oplossingen voor telefoongesprekken binnen het bedrijf over hun intranet, als goedkoop alternatief voor de klassieke telefonie. Uit marktonderzoek blijkt dat het gebruik van VoIP bij bedrijven in het laatste kwartaal van 2004 alleen al met 36% is gestegen. Als deze groei zich doorzet, zal volgens een onderzoek van TNO en MarketCap eind 2005 één op de vier bedrijven gebruik maken van VoIP. Ook op de consumentenmarkt wordt VoIP door een groeiend aantal providers aangeboden. Daarmee heeft de klassieke telefonie er een geduchte concurrent bij!

De volgende fase is dat naast VoIP ook tegelijkertijd video en Internet zullen worden aangeboden aan klanten. Ook voor de bepaling van de kwaliteit van deze diensten is de wachtrijtheorie een onmisbaar hulpmiddel.

Referenties

- [1] ITU-T G.107, *The E-model, a computational tool for use in transmission planning*. March 2003.(revised version)
- [2] Cohen, J.W. (1982). *The single server queue*. North Holland publishing company.