

Efficiënt verzenden van digitale bestanden over het internet

MAAIKE VERLOOP

Internet is deel van ons dagelijks leven geworden. Denk maar aan activiteiten zoals e-mailen, chatten, surfen over het internet, bellen en downloaden van muziek en films. Al deze toepassingen genereren een stroom aan data die over het internet getransporteerd moet worden. Bij het verzenden van een digitaal bestand wordt gebruik gemaakt van de capaciteit van de 'routers' die op het pad van zender naar ontvanger liggen. In elk van deze routers is echter kruisend dataverkeer aanwezig vanuit andere delen van het netwerk dat ook over capaciteit wil beschikken. Vanwege het groeiend aantal gebruikers is het van belang om de beschikbare capaciteit in het internet zo efficiënt en eerlijk mogelijk te verdelen onder de concurrerende datastromen, zodat gebruikers tevreden zijn met de snelheid van het internet.

Massoulié en Roberts (2000) hebben voor het internetverkeer een stochastisch netwerkmodel geïntroduceerd. Het netwerk bestaat uit een aantal knooppunten, die de eerdergenoemde routers representeren, met elk een eigen bedieningscapaciteit. Een verzoek tot het verzenden van een digitaal bestand wordt gezien als een aankomst van een bepaald type gebruiker in het netwerk. Deze gebruiker heeft van een aantal knooppunten een bepaalde hoeveelheid bediening nodig voordat hij het netwerk weer verlaat. Van belang is dat de gebruiker simultaan dezelfde hoeveelheid capaciteit nodig heeft van alle knooppunten op zijn pad. Dit komt voort uit het feit dat een bestand in veel kleine pakketjes wordt opgedeeld die met tussenpozen door het netwerk worden gestuurd.

Er bevinden zich dus pakketjes verspreid over het hele pad van zender naar ontvanger.

Voor het zojuist beschreven soort netwerken hebben Mo en Walrand (2000) een klasse van ' α -fair strategieën' geïntroduceerd om de capaciteit onder de gebruikers te verdelen. Deze strategieën passen de toegewezen capaciteit dynamisch aan aan de ophoping in het netwerk. Het standaardprotocol dat nu gebruikt wordt om digitale bestanden over het internet te versturen is het Transmission Control Protocol (TCP). TCP kan gezien worden als een speciaal geval van α -fair, namelijk wanneer α gelijk is aan 2. De klasse van α -fair strategieën garandeert dat het aantal gebruikers in het systeem niet onnodig naar oneindig groeit, wat meteen een verklaring geeft voor het feit dat TCP in het algemeen goed werkt. Er is echter weinig bekend over de gemiddelde downloadtijd en in hoeverre deze verbeterd kan worden. In mijn afstudeerscriptie [Verloop 2005] hebben we strategieën gekarakteriseerd die de gemiddelde downloadtijd minimaliseren en we vergelijken die met de α -fair strategieën.

Lineair netwerk

Voorheen werd het optreden van congestie in het internet gemodelleerd met slechts één knooppunt. Het lineaire netwerk modelleert een meer realistische abstractie van het internet waarin type-0 gebruikers bestanden versturen over een pad dat L knooppunten bevat en de type-0 gebruikers

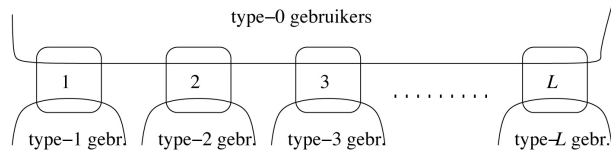
in elk knooppunt hinder ondervinden van kruisend verkeer uit andere delen van het netwerk, de type-1,...,L gebruikers. Een type-0 gebruiker heeft dus simultaan van alle knooppunten dezelfde capaciteit nodig en type- i gebruikers, $i=1,\dots,L$, gebruiken alleen capaciteit van het corresponderende knooppunt (zie Figuur 1). Elk knooppunt heeft dezelfde hoeveelheid capaciteit. Gebruikers arriveren volgens een Poisson proces en de benodigde bedieningsgrootte van type- i gebruikers is verdeeld volgens de stochastische variabele B_i . Een gebruiker wordt met een bepaalde capaciteit bediend die in sommige gevallen ook nul kan zijn. Een bedieningsstrategie verdeelt de beschikbare capaciteit in het netwerk onder de gebruikers.

Doordat type-0 gebruikers alle L knooppunten simultaan nodig hebben, ontstaat er een dynamische interactie over en weer tussen de verschillende typen gebruikers. Wanneer bijvoorbeeld op een bepaald moment de keuze wordt gemaakt om type-1 gebruikers te bedienen, betekent dit meteen dat in alle L knooppunten de capaciteit niet gebruikt kan worden door type-0 gebruikers. Dit maakt het model fundamenteel verschillend ten opzichte van het klassieke model met slechts één knooppunt waar al veel meer bekend over is.

Strategieën gebaseerd op de grootte van een gebruiker

Het doel in mijn afstudeerscriptie is om voor het lineaire netwerk strategieën te vinden die het gemiddeld aantal gebruikers in het netwerk minimaliseren. Dit is equivalent met het minimaliseren van de gemiddelde verblijftijd van een gebruiker in het netwerk.

In het geval van slechts één knooppunt zijn verschillende strategieën uitvoerig geanalyseerd. Denk bijvoorbeeld aan bediening in volgorde van aankomst of de strategie die op elk moment de capaciteit eerlijk verdeelt tussen alle aanwezige



Figuur 1: Lineaire netwerk

gebruikers. De keuze voor een bedieningsstrategie beïnvloedt het gedrag van het systeem. Het is bekend dat bedieningsstrategieën goed kunnen presteren wanneer ze gebaseerd zijn op de hoeveelheid bediening die elke gebruiker nodig heeft. Neem bijvoorbeeld de *Shortest Remaining Processing Time* (SRPT) strategie welke de volledige capaciteit van het knooppunt geeft aan die gebruiker die de minste resterende hoeveelheid bediening nodig heeft. Zo wordt steeds de snelste manier gekozen om een gebruiker uit het systeem te krijgen. Ook voor de lange termijn is dit goed, want altijd wordt de totale beschikbare capaciteit gebruikt. Schrage en Miller (1966) hebben bewezen dat SRPT inderdaad het totaal aantal gebruikers in het systeem minimaliseert.

Een nadeel van SRPT is dat het vereist dat de bedieningsgrootte van elke gebruiker in het systeem bekend is. Deze informatie is in een internetrouter doorgaans niet bekend. De *Least Attained Service* (LAS) strategie geeft voorrang aan die gebruikers die tot nu toe de minste hoeveelheid bediening hebben ontvangen. Bij LAS is dus geen informatie over de werkelijke bedieningsgrootte van een bestand nodig. Voor een bepaald soort bedieningsgrootteverdelingen (welke het internetverkeer goed modelleren) is de strategie LAS optimaal binnen de klasse van strategieën die geen informatie gebruiken over de precieze grootte van elke individuele gebruiker in het systeem.

Wij hebben gekeken of strategieën zoals SRPT en LAS ook een goed resultaat geven voor het lineaire netwerk. Het rechttoe rechtaan toepassen van SRPT of LAS op het lineaire netwerk zou inhouden dat in elk knooppunt die gebruiker wordt bediend die op dat moment respectievelijk de minste resterende bediening nodig heeft of de

minste bediening heeft ontvangen. Maar door het opleggen van prioriteiten kan bijvoorbeeld een type-1 gebruiker voorrang krijgen, wat als gevolg heeft dat type 0 niet bediend kan worden, omdat deze simultaan alle knooppunten nodig heeft. Wanneer er geen type-2 gebruikers aanwezig zijn gaat nu de volledige capaciteit in knooppunt 2 verloren. Dit impliceert dat optimaliteit niet automatisch verzekerd is. In mijn afstudeerscriptie wordt bewezen dat voor het lineaire netwerk er situaties zijn waarin zowel SRPT als LAS een instabiel netwerk geven. Dat wil zeggen dat het aantal gebruikers onbegrensd groeit, terwijl een simpele strategie dit kan voorkomen. SRPT of LAS zal dus zeker niet optimaal zijn. Hieruit kan geconcludeerd worden dat we weliswaar gebruikers op basis van hun grootte voorrang willen geven, maar tegelijkertijd ervoor moeten zorgen dat niet teveel capaciteit verloren gaat in het netwerk. Dit maakt het vinden van een optimale strategie buitengewoon moeilijk.

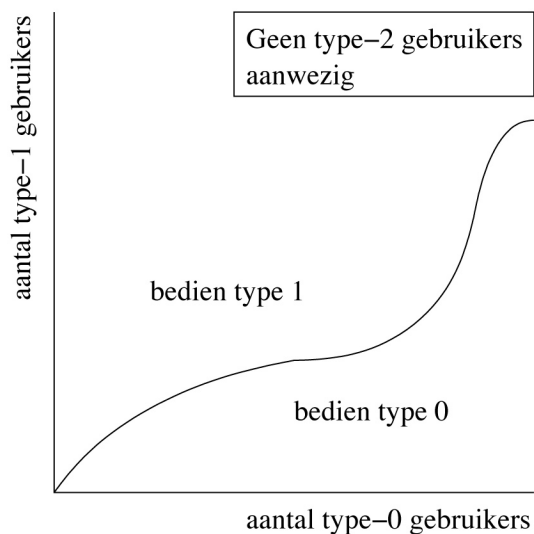
Optimale strategie

Om de optimale strategie voor het netwerk te bepalen, richten we ons op exponentiële bedieningsgrootteverdelingen. We zoeken naar de strategie die het gemiddeld aantal gebruikers in het systeem minimaliseert binnen de klasse van strategieën die geen gebruik maken van de exacte bedieningsgrootte van een gebruiker. In het geval van één knooppunt is bewezen dat de strategie die voorrang geeft aan het type gebruikers met de grootste vertreksnelheid, gedefinieerd als $\mu_i = 1/E(B_i)$, optimaal is. Willen we dit toepassen op het lineaire netwerk, dan moeten we wel met eventueel verlies van capaciteit rekening houden. In de onderstaande twee situaties bestaan er strategieën die op elk moment én de vertreksnelheid van het netwerk maximaliseren én altijd de volledig beschikbare capaciteit gebruiken. Optimaliteit is dan verzekerd:

- Wanneer type-0 gebruikers gemiddeld 'klein genoeg' zijn, $\sum_{i=1}^L \mu_i \leq \mu_0$ dan is het optimaal om strikt voorrang te geven aan type 0.
- Wanneer type-0 gebruikers gemiddeld 'iets groter' zijn, $\sum_{i=1, i \neq j}^L \mu_i \leq \mu_0 \leq \sum_{i=1}^L \mu_i$ voor alle $j=1, \dots, L$, dan is het optimaal om typen 1, 2, ..., L te bedienen wanneer van elk type tenminste één gebruiker aanwezig is en anders wordt type 0 bediend. Wanneer er geen type-0 gebruikers aanwezig zijn, wordt de capaciteit in knooppunt i gegeven aan eventueel aanwezige type- i gebruikers.

Voor het overgebleven geval wanneer de type-0 gebruikers 'te groot' zijn, $\mu_0 < \sum_{i=1, i \neq j}^L \mu_i$ voor een j , is het niet mogelijk om exact de optimale strategie te bepalen. Neem voor het gemak aan dat het lineaire netwerk slechts uit twee knooppunten bestaat en stel $\mu_0 < \mu_1$. Wanneer zowel type-1 als type-2 gebruikers aanwezig zijn, is het voor de hand liggend om deze typen beide te bedienen. Wanneer er echter geen type-2 gebruikers aanwezig zijn, is het minder duidelijk wat te doen. Het bedienen van type 0 maakt gebruik van de volledige capaciteit in het netwerk. Het bedienen van type 1 laat capaciteit in knooppunt 2 ongebruikt, maar maximaliseert daarentegen de vertreksnelheid waarmee gebruikers het netwerk verlaten (want $\mu_0 < \mu_1$). Met behulp van dynamische programmering kunnen we aantonen dat de optimale strategie gekarakteriseerd kan worden met behulp van een functie. Wanneer er geen type-2 gebruikers zijn, bepaalt deze functie of type 0 dan wel type 1 bediend wordt (zie Figuur 2).

Het bepalen van de precieze vorm van deze functie is niet haalbaar. Om iets over de vorm van de curve te kunnen zeggen, hebben we ons daarom gericht op een fluid model. Simpel gezegd wordt hierin alleen naar het gemiddelde gedrag gekeken en stochastische fluctuaties in het oor-

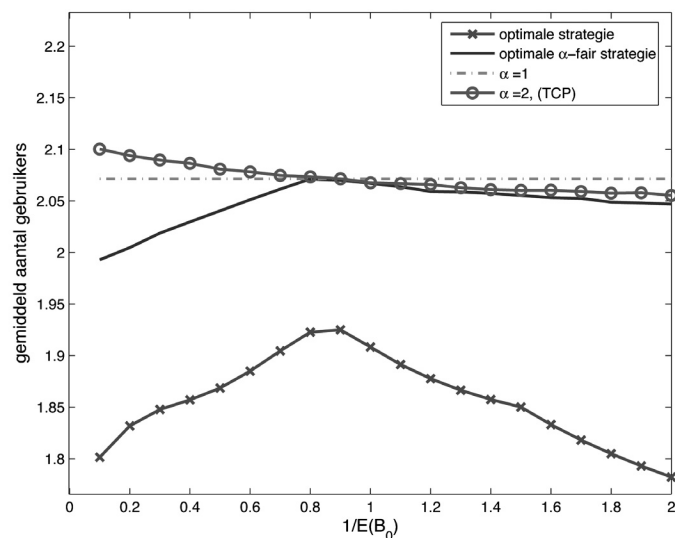


Figuur 2: De strategie behorend bij de functie is als volgt: in het geval dat er geen type-2 gebruikers zijn, wordt type 0 bediend in een toestand onder de lijn en type 1 in een toestand boven de lijn. Type-1 en 2 gebruikers worden altijd bediend wanneer ze beiden aanwezig zijn.

spronkelijke proces worden genegeerd. Voor dit deterministische fluid model is het wel mogelijk de optimale strategie te vinden. In het bijzonder is de zojuist genoemde functie lineair en exact te bepalen. De simulatieresultaten voor het stochastische model tonen bovendien aan dat in de meeste gevallen de lineaire functie een goede benadering vormt.

Effectiviteit van TCP

Nu we weten wat de optimale strategie is voor exponentiële bedieningsgroottes, kunnen we dit gaan vergelijken met het standaard protocol TCP. In Figuur 3 vergelijken we de optimale strategie met de α -fair strategieën. Uit de resultaten kunnen we concluderen dat voor exponentiële bedieningsgroottes de verbetering ten opzichte van TCP ($\alpha=2$) ongeveer 10% zal zijn. Voor meer realistische verdelingen verwachten we dat de winst aanzienlijker zal zijn. Om praktische redenen is het implementeren van de hierboven beschreven strategieën in het internet niet evident. De uitdaging is nu om een strategie te ontwerpen die een



Figuur 3: Grafiek van het gemiddeld aantal gebruikers in het netwerk onder verschillende strategieën, uitgezet tegen de inverse van de gemiddelde bedieningsgrootte van een type-0 gebruiker. De andere parameters zijn constant gehouden en de bedieningsgroottes zijn exponentieel verdeeld met $E(B_1)=0.5$ en $E(B_2)=1$.

werkelijke verbetering oplevert ten opzichte van TCP en tegelijkertijd implementeerbaar is in het internet.

LITERATUUR

Massoulié, L., Roberts, J.W. (2000). Bandwidth sharing and admission control for elastic traffic. *Telecommunication Systems* 15, 185-201.

Mo, J., Walrand, J. (2000). Fair end-to-end based congestion control. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 8, 556-567.

Righter, R., Shanthikumar, J.G. (1989). Scheduling multi-class single server queueing systems to stochastically maximize the number of successful departures. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 3, 323-333.

Schrage, L.E., Miller, L.W. (1966). The queue M/G/1 with the shortest remaining processing time discipline. *Operational Research* 14, 670-684.

Verloop, I.M. (2005). Efficient flow scheduling in resource-sharing networks. Doctoraalscriptie, Universiteit Utrecht. Beschikbaar op <http://www.cwi.nl/~maaike>.

Verloop, I.M., Borst, S.C., Núñez-Queija, R. (2005). Stability of size-based scheduling disciplines in resource-sharing networks. *Performance Evaluation* 62, 247-262.

Verloop, I.M., Borst, S.C., Núñez-Queija, R. (2006). Delay optimization in bandwidth-sharing networks. In: *Proc. CISS 2006*.

MAAIKE VERLOOP is als promovendus verbonden aan het CWI (centrum voor wiskunde en informatica) en aan de technische universiteit van Eindhoven. E-mail: <maaike@cwi.nl>; website: <<http://www.cwi.nl/~maaike>>.