

the economics of network control

RIPE51 Amsterdam

Estimating the Traffic Matrix in IP Networks

October 10th, 2005

Thomas Telkamp telkamp@cariden.com

www.cariden.com

(c) cariden technologies, inc.

The Traffic Matrix

- The amount of data transmitted between every pair of network nodes
- For what purpose?
 - Analysis and Evaluation of other network states than the current:
 - Capacity Planning
 - network changes
 - Resilience Analysis
 - network under failure conditions
 - Optimization
 - OSPF/IS-IS metric optimization/TE
- Also interested in external traffic (Inter-AS)

What do we have?

• NetFlow

- v5 deployment is complex
- newer versions (aggregation, v8) not complete
- DCU (Juniper)
 - only 16 classes
- BGP Policy Accounting
 - only 64 classes, BGP only
- MPLS
 - TE tunnels
 - requires full TE mesh
 - LDP counters
 - nice solution, only minor issues (see [4])

What do we want?

- Derive Traffic Matrix (TM) from easy to measure variables
 - No complex features to enable
- Link Utilization measurements
 - SNMP
 - easy to collect, e.g. MRTG
- Problem:
 - Estimate point-to-point demands from measured link loads
- Network Tomography
 - Y. Vardi, 1996
 - Similar to: Seismology, MRI scan, etc.

Is this new?

- Not really...
- ir. J. Kruithof: *Telefoonverkeersrekening*, De Ingenieur, vol. 52, no. 8, feb. 1937 (!)

(9)



9-2-1937 De Ingenieur no.	8. Elect	rotec	hniek 3.				E. 2		
<i>"X</i> ,	wiki	celd e	en haar ge	ebruik is o	mslachtig	. waarom	we liève		
$c_{21}, u_{21} + c_{80}, u_{20} + c_{13}, u_{23} + \dots$	een	meer	practische	e methode	aanbevele	n, die nar	n de hand		
etc. On deze wijze bereikt men dat de som der horizon.	het	voort	orgende ve læzet ber	naderen d	gedemons cr gevraa	treerd. Ze rde onder	bestaat m		
e rijen gelijk wordt aan de aanvangsverkeersdichtheden.	keer	sdich	theden, u	itgaande v	an den ge	geven too	estand. Z		
fout wordt nu proportioneel over alle waarden ver-	de į	regeve	en verkee	rsverdeelis	ng de volg	ende:			
rid. Resumeerend, wordt volgens de methode der verbou-				TAB}	SL VI.				
gsgetallen, na invoering van enkele vereenvoudigingen		2	G	rgeven verk	eersverdeelin	w.			
(8) $x_1 = x_1 \frac{gX_1}{gX_1}$		Naar centrale Aan.							
$v_1 = v_1 = v_1 = v_1 = v_1 = \frac{e^{X_1}}{e^{X_1}} + v_1 e^{\frac{e^{X_2}}{e^{X_2}}} + v_1 e^{\frac{e^{X_3}}{e^{X_3}}} + e^{e^{$							vangs-		
V v v v v	1.1		1	2	3	4	verkeer		
$x_{11} = v_{11} \frac{e^{iX_2}}{V_s} \frac{e^{iX_1}}{X_s} \frac{X_s}{X_s}$		1,1	2.000	1.030	650	820	4 000		
$v_{11} \frac{1}{V_1} + v_{12} \frac{1}{V_1} + v_{13} \frac{1}{V_2} + etc$	ale .					010	41000		
te.	cent	2	1.080	1.110	555	255	3.000		
n anderen vorm geschreven:	e e	3	720	580	500	200	2.000		
$x_{11} = c_{111} a X_1 a a X_1$	10	4	850	280	210	.160	1.000		
$c_{11} a_1 + c_{12} a_2 + c_{13} a_3 + c_{14} a_3 + e_{14} a_4 + e_{16} x_5$	eis	id.							
$x_{12} = c_{13-a}X_2 \frac{a^{ab_1}}{c_{13-a}X_1 + c_{13-}X_2 + c_{13-}X_3 + c_{13-}X_4 + c_{14-}X_4 + etc.}$	veri	reer	4.150	8.000	1.915	983	-10.000		
n waardan a V a V ala naami maa da ma	Ir	a een	volgende en eindy	tabel vu rerkeersdie	lt men all htheden i	lereerst d	e gegever		
idingsgetallen, aan welken term de methode haar naam	eers	te hor	rizontale 1	rij de indi	vidueele w	narden va	an tabel 6		
leent.	eeht	er ve	rmenigvu	ildigd met	de verho	ouding tu	isschen d		
Bij präctische toepassing behoeft men, om vlugger te werken, slechts tot tabel å de methode der interesse-factoren te volgen, om daarma direct over te gaan tot de berekening der verhoudingsgetallen. Een vijfde tafel bevat dan de			oude en nieuwe aanvangsverkeersdichtheden, d.i. 4.000						
			4.000						
			voor de tweede rij wordt deze lantor gelijk aan 3.000						
	_								
keerswaarden van den nieuwen toestand. Een algemeen nadeel dezer methode is, dat ze ondoor-	Dea	somm	en der ve	erticale rije	en van de	nieuwe ta	abel zullet		
keerswaarden van den nieuwen toestand. Ien algemeen nadeel dezer methode is, dat ze ondoor- stig is, maar bovenal, dat ze niet voldoet aan de eischen.	De s nu e voor	somm chter den	en der verschill nieuwen	erticale rije len van de toestand	en van de e eindverk vereischt	nieuwe ta eersdichti worden. 1	abel zuller heden, di Deze som		
Keerswaarden van den nieuwen toestand. Sen algemeen nadeel dezer methode is, dat ze ondoor- tig is, maar bovenal, dat ze niet voldoet aan de eischen, meld in paragraaf 13 a tot d. Beknopt uitgedrukt, komt n methode henen near dat me en aastel echkenden.	De i nu e vooi men	somm echter den zijn	en der ver verschill nieuwen afzonderli	erticale rije len van de toestand ijk ondera	en van de e eindverk vereischt an tabel 7	nieuwe ta cersdichti worden. I toegevoe	abel zuller heden, di Deze som gd.		
kerswaarden van den meuwen toestand. kan algemeen nadeel dezer methode is, dat ze ondoor- ttig is, maar bovenal, dat ze niet voldoet aan de eischen, neld in paragraaf 18 a tot d. Beknopt uitgedrukt, komn e methode hierop neer, dat we een aantal onbekenden kenen uit een gering aantal gegevens en met behulg	De a nu e vooi men	somm rehter den zijn	en der ver r verschill nieuwen afzonderli	erticale rije len van de toestand ijk ondera TABE	en van de e eindverk vereischt an tabel 7 L VII.	nieuwe ta eersdichti worden. 1 toegevoe	abel zullet heden, di Deze som gd.		
Keerswaarden van den meuwen toestand, Sen algemeen nadeel dezer methodo is, dat zo ondoor- htig is, maar bovenal, dat ze niet voldoet aan de eischen meel in paragraaf 13 at ott 6. Deknopt uitgedruitet, kom te methode hierop neer, dat we een aantal onbekende deenen uit een gering aantal gegevens en met behuig a eenlige formules, waarvan we niet eens de strekking men. Liezens contrort de volwende sentheken	De i nu e vooi men	somm echter den zijn iste be	en der verschill nieuwen afzonderli	rticale rije len van de toestand ijk onderas TABE colgens de s	en van de e eindverk vereischt an tabel 7 L VII. methode der	nieuwe ta eersdichti worden. 1 toegevoe dubbele fe	abel zuller heden, di Deze som gd. actoren.		
keensauateen vah den insuwen boeinant. Keensauateen vah den insuwen boeinant. med in paragraaf 18 e tot d. Beknopt uitgedraft, kom med in paragraaf 18 e tot d. Beknopt uitgedraft, kom e methode hierop neer, dat we een aantal endekender ekenon uit een gering nantal gegevens en met behalp enige formules, waarvan we miet een de strekking men. Hieraan ontkomt de volgende methode. di Methode der dudele betaren.	De s nu 4 vooi men	somm sehter den zijn	en der verschill nieuwen afzonderli	rticale rije len van de toestand ijk onderas TABE colgens de s Naar ee	en van de e eindverk vereischt an tabel 7 L VII. methode der entrale	nieuwe ta eersdichtl worden. 1 toegevoe; dubbele fe	abel zullet heden, di Deze som gd. actoren.		
screwsautom van den muwen howiand. en algemeen nadeel dezer methode is, dat is ondoor en algemeen nadeel dezer methode is, dat is ondoor med in parsgraaf II a tot 4. Bekange uitgedraft, komt en methode hieroper, dat we een aantal onbekende ekenen uit een gering aantal agepvens en met behalg eenige formules, waarvan we niet eens de strekking nen. Hieraan ontionnt de volgende methode, 10. Mitded de dolde gehoten. Not methode herot op een symmetriedse behaudeling. Not methode herot op een symmetriedse behaudeling.	De a nu e voor men	somm schter den zijn Late be	en der verschill nieuwen afzonderli madering u	erticale riji len van di toestand ijk ondera: TABE colgens de s Naar co 2	en van de e eindverk vereischt an tabel 7 L VII. methode der entrale 3	nieuwe ta cersdichtl worden. 1 toegevoe dubbele fe 4	abel zullet heden, di Deze som gd. incioren. Ann- vangs- verkeer		
isereivaanden van dech nurven toestaad. seereivaanden van dech nurven toestaad. toestaad en seereid op de seereid op de seereid op de seereid med in pargraaf 34 a tot d. Bekangst uitgedracht, komt en entdoch heren pering aantal angevens en met behalg en entdoch kereid op de seereid op de seereid op de seereid en uitgedracht op de seereid op de seereid op de seereid en Hieran ontdown de volgeneel methode. d) Methode der dabbele placare de sentedoch heren op op op mentriedele behandeling het problem. Waar alle voorgaande methoden sich eerden op de nieuwe aanvange-verkeendichtheeden sich	De a nu e voor men	somm schter r den zijn Late bi	en der verschill nieuwen afzonderli madering u	erticale riji len van di toestand ijk onderas TABE colgens de s Naar ee 2	en van de e eindverk vereischt an tabel 7 L VII. nethode der a a	nieuwe ta zersdichti worden. 1 toegevoe dubbele fe 4	abel zullet heden, di Deze som gd. actoren. Ann- vangs- verkeer		
texterosated win den naveren localizat, hererosated win den naveren localizat, ligi immer lovena data zini et volkete and e-sieher medi in parquest 18 at 04. Abkapat uitgeduch, kom en entrolde herero part dat we en anatal endekender seksno uit een gering aanda gegevens en net behand immer. Hieraan ordiomi de volgiter en de trekking umen. Hieraan ordiomi de volgiter en de trekking of Markol et obsidel gatzen. Data metlook beruit op een symmetrische behandeling og en symmetrische behandeling enden og on einzwe anaranga-verkensidelin false um, voren w met dasa metlose ook en nieuwe eind kompilatilischen als behandel in	De s nu e vooi men	somm schten zijn Late be	en der verschill nieuwen afzonderli madering u 1 3.000	erticale rije ien van de toestand ijk onderas TABE colgens de s Naar co 2 1.545 1.480	en van de e eindverk vereischt an tabel 7 L VII. methode der entrale 3 975 740	nieuwe ta zersdichtl worden. 1 toegevoe; dubbele fe 4 480 340	abel zuller heden, di Deze som gd. Aan- vangs- verkeer 6.000 4.000		
to environment with effer micrown location. In the second	De a nu e vooi men	somm schter den zijn Late be	en der verschill r verschill nieuwen afzonderli enadering v 1 3.000 1.440	rticale riji en van de toestand jik ondera: TABE colgens de u Naar ee 2 1.545 1.460	en van de e eindverk an tabel 7 L. VII. methode der a 975 740	nieuwe ta cersdichti worden. 1 toegevoer dubbele fe 4 480 340	abel zullen heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000		
there wanted with definitions in boshind, in the second second second second second second method in parameters of the second second second second second second second second second second second second second second second second second distribution of the second second second second second distribution of the second second second second second distribution distribution of the second second second distribution distributio	De a nu e vooi men	somm schter den zijn Late be	en der ver r verschill nieuwen afzonderli madering u 1 3.000 1.440 900	erticale rijierticale rijierticale rijierticale rijikonderaza TABE colgens de r Naar es 1.545 1.460 725	en van de e eindverk vereischt L. VII. methode der intrale 3 975 740 625	nieuwe ts cersdichti worden. 1 toegevoe dubbele fe 4 480 340 250	abel zullet heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000		
to environment to exist. A subscription of the second seco	Van centrale	somm schter den zijn Lite bi	en der ver r verschill nieuwen afzonderli madering a 1 3.000 1.440 900 330	erticale rijden van de toestand ijk onderas TABE colgens de s Naar ee 2 1.545 1.480 725 280	en van de e oindverk wereischt L VII. methode der entrale 3 975 740 625 210	nieuwe ts cersdichti worden. 1 toegevoe dubbele fe 4 480 340 250 160	abel zullet heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000		
testerination with effer increases location, second and the second second second second second results in sum between data rain of workers and se-indered method in approach in a tot of. Bokaspat uitgeduck, bome neutrods here paring analog agevenus en not behalo where the second second second second second second second second second second second second second results and the second second second second second of Motion der adolder platera in the second second second second second second in the second	De s nu e vooi men	somm rehter r den zijn Lste bi	en der ver verschill nieuwen afzonderhi 1 3.000 1.440 900 330 6.855	erticale rijden van de toestand ijk onderas TABE colgens de s Naar ee 2 1.545 1.480 723 280	en van de e oindverk wereischt L VII. methode der entrale 3 975 740 625 210	nieuwe ts cersdichtl worden. 1 toegevoe, dubbete fr 4 480 340 250 160	abel zullen heden, då Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 2.500 1.000		
verweinsteinen von hermiten kontinuk, meter einen einen einen kontinuk, meter einen einen einen einen einen einen einen meter einen einen einen einen einen einen einen einen einen einen einen einen einen einen einen einen kenten einen ei	An contrale	somm rehter r den zijn 1ste bi 1 2 3 4 4 4 ad- zeer	en der ver v verschill r verschill enadering v 1 3.000 1.440 900 330 6.225	rticale rijier van de toestand jik onderas TABE colgens de s Nnar e 2 1.545 1.480 725 280 4.000	en van de e oindverk vereischt L. VII. methode der entrale 3 975 740 625 210 2.340	nieuwe ts cersdichtl worden. 1 toegevoer dubbele fe 4 480 340 250 160 935	abel zullen heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000 13.500		
correspondences with each measurem locational, there are a set of the set of the set of the set of the set of the liqk is, must be loweral, data is not its data and de sinchers and its parameters and the set of the data and the set of the set	De a nu e vooi men Pau e eutruse Van contrale	ad-	en der verschill r verschill madering a 1 3.000 1.440 900 330 6.225 5.000	rticale rijien van de toestand ijk ondera: TABE colgens de r 2 1.545 1.460 723 280 4.000	en van de e oindverk vereischt L VII. methode der entrale 3 975 740 625 210 2.340	nieuwe ts cersdichti worden. 1 toegevoe; dubbele fi 4 480 340 250 160 995	abel zullen heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000 1.000 13.500		
to reproduced with defin mericon location. The second second second second second second second second second second method in parametal 16 at to dt. Ableshopt uitgeducki, kome method herrory next data were an autical subsidiaridge second second second second second second second second second second second second second second second data and the second second second second second second data and the second second second second second second data and the second sec	De a nu e vooi men al al al al al al al al al al al al al	somm rehter r den zijn iste bi iste bi te bi iste bi iste bi iste bi iste bi iste bi iste bi iste bi i	en der verschill nieuwen afzonderli madering t 1 3.000 1.440 900 330 6.225 5.690	erticale rijjer toestand ijk ondera: TABE solgens de z Naar en 2 1.545 1.460 725 280 4.000 4.030	m van de e oindverk vereischt L. VII. methode der entrale 3 975 740 625 210 2.340 2.340	nieuwe ts cersdiohti worden. 1 toegevoe dubbele fe 4 480 340 250 160 935	abel zullen heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 2.500 1.000 13.500		
bereventation with defin measures location. We consider the second sec	De a nu e voou men apartuoo ura Ein vert Soo	somm echter r den zijn iste be iste be iste be ad- ceer m	en der ver verschill nieuwen afzonderli madering x 1 3.000 1.440 900 330 6.225 5.690	rticale rijjer toestand ijk onderaa TABE colgens de r Nnar o 2 1.545 1.460 723 280 4.000	m van de e eindverkivereischt vereischt im tabel 7 L. VII. methode der methode der methode der 23 075 740 625 210 2.340 2.550	nieuwe tr cersdiohti worden. 1 toegevoe; dubbele fr 4 480 340 250 160 250 160 253	abel zullen heden, di Deze som gd. Ann- vangs. verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000 13.500		
secretariation with effer micrown location. Secretariation with effer micrown location, in some low-real data microweak and e-indem model in paragrand 13 at tot 4. Bekanpat uitgedurch, hour methods henrys and data microweak and e-indem termine formules, waarvan wa mit eran data termine in emige formules, waarvan wa mit eran data termine data and the second second second second second data and the second second second second second second bill Mohade dar dabbel glatteras. Some methods benzur og en en symmetrisches behandeling is het problem. Waar alle vorgenande methoden side korentidationen wei meter indev of qu data and the korentidationen in disk mitschage verscheiden helder wei vorgen war mit er meter indevloa qu data mitschage weissens ter van oponsing (we mogen hyr, de richting dar weissens ter van oponsing (we mogen hyr, de richting dar weissens ter mits disk vorgen verkens siged data is tot at id t, is sen typiselte eigenschag, die in meeters of the na tot at het en mitsel mitscheller is van absound the sum beneferscheider is data and the second site of the second term in the site of the second second second second second second the sum of the second second second second second second second the second	De r nu « vooromen men etutuoo ura Eisi verti Soo D den	somm schten r den zijn iste bi iste bi ad- scer m e twe der	verschilter verschilter madering verschilter 1 3.000 1.440 900 0.330 6.225 5.690 ede stap e	erticale rijjer len van de toestand ijk onderas TABE colgens de 2 1.545 1.480 723 280 4.000 4.000 4.030 der benade	m van de e ondverkiv vereischt an tabel 7 L VII. methode der mtrale 3 975 740 625 210 2.340 2.559 ering geseb te verme	nieuwe te cersdiohtik worden. 1 toegevoe dubbele fe 4 4 80 340 250 160 955 1.230 1.230 iedt, doo	abel zullen heden, då Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 2.500 1.000 13.500		
Surveixation with effer increases location. Surveixations with the intervent location. It is most lowers and data mich values and e-indem- mult in paragravit B at 6.4. Bekanput uitgedrack, bours in the strength of the strength of the strength of the energy of the strength of the strength of the strength energy of the strength of the strength of the strength of Michael der dahled platters. Son methode bernering one any matter strength of the strength of the strength of the strength of the strength of the strengt	De t nu « voorone men	sommehten rehten zijn Iste bi Iste bi	en der ver verschilt nieuwen afzonderli madering t 1 3.000 1.440 900 3.50 6.225 5.090 ede stap overtieale 1 vertieale 1	rticale rijjer ien van de ien van de de TABE colgens de r Naar co 2 1.545 1.480 725 280 4.000 4.000 der benade colonmen elen de	m van de e omdverkvereischt vereischt an tabel 7 L. VII. methode der 975 740 625 210 2.340 2.350 tring geset te vermei	nieuwe tr cersdiohth worden. 1 toegevoe dubbele fr 4 4 480 340 250 160 905 1.230 iedt, doo nigvuldig cindverb	abel zullen heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000 13.500		
there was a set of the measurem bound and the set of t	De te nu 4 veri entre partico so co D den veri hede	sommereter er denn zijn Iste bi Iste b	r verschillen nieuwen afzonderli madering e 1 3.000 1.440 900 330 6.225 5.690 ede stap o verticale i agen tuss de gevon	rticale rijjerione rijo ien van do toestand ijk ondera: TABE colgens de s Naar e 2 1.545 1.480 725 280 4.090 4.090 4.030 der benade kolommen ehen de	m van de e ondverkvereischt an tabel 7 L. VII. methode der mtrale 3 975 740 625 210 2.340 2.350 2.559 ering geseb te vermee gevraagde sen. Kolor	nieuwe tr nieuwe tr worden. 1 toegevoe dubbele fi 4 480 340 250 160 250 160 250 160 250 160 250 160 250 160 250 160 200 200 200 200 200 200 200 200 200 2	abel zullen heden, då Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000 13.500 13.500 r de waar en met de ceersdicht t		
terrevaluation with the interment location." We approximately seen to be a seen of the second seco	De te nu e un e un men auturos un A Einin verl verl bede vern hede	somm sehten r den zijn iste be iste be ister a d- teer m m e twe der v oudin en en in en en en en en en en en en en en en en e	en der ver verschilten nieuwen afzonderli madering s 1 3.000 1.440 900 330 6.225 5.690 ede stap o verticale l ngen tuss de gevon vuldigd m	rticale rijjerion ien van de investige toestand jjk ondera: TABE colgens de r 1.545 1.460 725 280 4.000 4.000 4.000 4.030 der benade kolommen e.hen de ; colommen e.hen de ; colommen e.hen de ;	m van de e omdverkvereischt an tabel 7 L. VII. methode der 975 740 625 210 2.340 2.350 ering geseb te verme gevraagde sen. Kolom	nieuwe tr sersatiohti toegevoe, dubbele fr 4 4 480 340 250 160 905 1.230 siedt, doo nigvuldige eindverk a 1 word 2 met 4 2 met 4	abel zullet heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 2.500 1.000 13.500 13.500 r de waar en met de ceersdicht t derhalv 000 000, etc.		
there was a second to be a second backward of the second backward to be a second backward ba	De e nu « verimente e e e e e e e e e e e e e e e e e e	somm sehten r den zijn iste be iste be ister ad- ister m m e twe r den r	en der ver verschellt nieuwen afzonderli madering v 1 3.000 1.440 900 330 6.225 5.690 ede stap o verticale 1 gen tuss de gevon vuldigd m	rticale riji en vaa du toestand ijk ondera: TABE colgens de z 1.545 1.460 725 280 4.000 4.000 4.000 der benade kolommen ehen de z des somm 0.225	m van de e ondverker vereischt am tabel 7 L. VII. methode der antrale 3 975 740 625 210 2.340 2.340 2.559 ering geseb te verme gevraagde en. Kolor en kolom	nieuwe tr seeradiohti toegevoe dubbele fi 4 4 480 340 250 160 955 1.230 iedt, doo nigvuhdige eindyest a 1 word, 2 met 4, 2 met 4,	abel zullet heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000 13.500 13.500 r de waar en met d ceersdicht t		
terrevaluation with the increment location." We approximately seen to be a seen of the second seco	De a un a u	somm rehter r den zijn iste bi iste bi iste bi ad- iste bi iste bi ist	verschillen nieuwen afzonderli madering z 1 3.000 1.440 900 330 6.225 5.690 ede stap o verticale l agen tuss de gevon vuldigd n worden de cullen de	rticale rijjerione rij elen van de i toestand ijk onderaa TABE olgens de r 2 1.545 1.460 725 280 4.000 4.030 4.030 der benade kolommen de den somne de 5.600', waarden	m van de e oindverke vereischt an tabel 7 L VII. methode der mtrale 3 075 740 625 210 2.840 2.550 ering geseb te verme gevraagde sen. Kolom van tabel 4 er horizon	nieuwe tr seersdichti toegevoe; dubbele fr 4 480 340 250 160 915 1.230 siedt, doo nigvuldig cindverfs a 1 word 2 spevonde tale rije	Ann- vangs- vangs- vangs- verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000 13.500 13.500 13.500 r de waar en met de ceersdicht t		
successfully value of a micrown location. Successfully, is most brown, data with the state of	De e nu 4 vooi nuen nuen nuen nuen nuen nuen nuen nue	somm sehten r den zijn iste bi iste bi iste bi ad- teer m e twe der v e twe der v e twe der v e den en iste bi iste bi	en der ver verschilt nieuwen afzonderli madering v 1 3.000 1.440 900 3.50 6.225 5.690 ede stap o verticale 1 ngen tuss de gevon vuldigd m worden de sullen de v	rticale rijireri len van du toestand ijk onderar TABE colgens de r 2 1.545 1.460 723 280 4.090 4.090 4.090 4.090 4.090 der benade kolommen de sommen de	m van de e ondverke vereischt an tabel 7 L VII. methode der a 975 740 625 210 2.340 2.550 ring geseb te verme gevraagde en. Kolom van tabel i	nieuwe tr seersdichti toegevoe; dubbele fi 4 4 4 80 250 160 905 1.230 iedt, doo iedt, doo ingvuldig eindveri a 1 word 4, 8 gevonde tale rijen a aanvaag	abel zullen heden, di Deze som gd. Ann- vangs- verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000 13.500 13.500 13.500 13.500 10.000 exersident t derhalv 000, etc. mit n deze niet over paverkeers		
Surveitable With definitions in borthand, bereinstanding with definitions in the second second second model in parameters of the second second second second model in parameters in the second	De e nu 4 e vooi nuen nuen e e vooi nuen e e e e e e e e e e e e e e e e e	ad- ter ben ad- ter ben ad- te	en der verschill nietwen afzonderli 1 3.000 1.440 900 3.300 6.225 5.060 0 de gryon verticale 1 begen tuss s.060 de gryon verticale 1 a de gryon verticale 1 a materia a de gryon verticale 1 a de gryon verticale 1 a de gryon verticale 1 a	rtionle rijjertione rijjerion len van de toestand toestand jik onderaa. TABE tolgens de r 2 1.545 1.480 725 280 4.090 4.	en van de e ondverkvereischt matabel 7 L VII. methode der mtrale 3 975 740 625 210 2.340 2.340 2.559 ering geseb te vermei gevraagde en. Kolon en kolom van tabel 1 er horizon	nieuwe breestolohit worden. 1. toegevoe; dubbele fr 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	babel zuller netoren. Aan- verkeer 6.000 4.000 2.500 1.000 13.500 1.000 13.500 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0		
Restriction of the second sec	De e nu 4 vooi men	ad- teer m ad- teer m ad- teer m ad- teer m ad- teer m	een der ve verschill nieuwen afzonderli 1 3.000 1.440 900 330 6.223 5.699 ede stap per tuss 6.699 valdigd r m et de é gevon valdigd r m et de é gevon	rticale riji en vaa de i toestand jik onderaa. TABE colgens de s 1.545 1.460 725 280 4.000 4.000 4.000 4.000 der benade toolommen de sommen de sommen de sommen zi 5.000 vaarden de	en van de e ondverke vereischt in tabel 7 L VIL methode der methole der 975 740 025 210 2.340 2.350 ering geseb te verme gevraagde zen. Kolom en kolom van tabel 1 er horizon er horizon	nieuwe be eersdicht worden. 1. dubbele fr 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4.	hele zulle statistics and the set of the s		
There reasonable Work of the maximum theorem in the maximum term of the process of the second secon	De e mu e voor men men e voor men e e e e e e e e e e e e e e e e e e	somme echten r den zijn stee be ad- teer m e twee soudin- n en soudin- n en soudin- n en soudin- n en soudin- the the the the the the the the the the	een der ve verschill nieuwen afsondering s 1 3.000 1.440 900 330 6.225 5.099 de stap gen tuss de gevoo valdigd m vorden de auime de v n. Deze s rhaalt met de v	rtitule rijk kondern TABEEd TABEEd TABEEd TABEEd TABEEd TABEE TABE	m van de eindverkrevereischt. ur eindverkrevereischt. L VII. antabel 7 rundhade der antabel 7 rundhade der antabel 7 rundhade der antabel 7 rundhade der antabel 2 2.540 2.550 2.	nieuwe be eersdicht toegevee, dubbele fr 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	habel zuller heren, di Deze som utoren. Ann- verkoren 6,000 4,000 1,000		
been subject to the set of the s	De e nu e voor nu en verver verver verver verver verver verver verver verver nu en verver plaa plaa plaa plaa beste verver v	somme sehter z den zijn iste b i iste b i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	een der ve verschill nieuwen faconderli afonderli 1 1 3.000 1.440 900 3.00 6.225 3.090 6.225 3.090 ede stap 900 6.225 3.090 ede stap 900 6.225 3.090 ede stap 900 6.225 3.090	etticale rijk ondera toestand TABEBER	m van de eindverk vereischt, methode der mtralle 3 075 740 2.350 2	nieuwe be eersdicht worden. 1. dubbele fr 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	habel zullet heten, di betes om variante variante verkeer r de waar en met d 2,500 1,000 1		

Estimating the Traffic Matrix in IP Networks

Demand Estimation

- Underdetermined system:
 - N nodes in the network
 - O(N) links utilizations (known)
 - O(N²) demands (unknown)
 - Must add additional assumptions (information)
- Many algorithms exist:
 - Gravity model
 - Iterative Proportional Fitting (Kruithof's Projection)
 - Maximum Likelihood Estimation
 - Entropy maximization
 - Bayesian statistics (model prior knowledge)
 - Etc...!
- Calculate the **most likely** Traffic Matrix

Example



y: link utilizationsA: routing matrixx: point-to-point demands

Solve: y = AxIn this example: 6 = PARtoBRU + PARtoLON

Example

Solve: y = Ax -> 6 = PARtoBRU + PARtoLON



Additional information

E.g. Gravity Model (every source sends the same percentage as all other sources of it's total traffic to a certain destination)

Example: Total traffic sourced at PAR is 50Mbps. BRU sinks 2% of total traffic, LON sinks 8%: PARtoBRU =1 Mbps and PARtoLON =4 Mbps

Final Estimate: <u>PARtoBRU = 1.5 Mbps</u> and <u>PARtoLON = 4.5 Mbps</u>

General Formulation



- The total traffic on each link is the sum of all the source destination flows that route over that link
- Given Y and the routing matrix A solve for X

Network Results: Estimated Demands



Known Demands

Estimating the Traffic Matrix in IP Networks

Estimated Link Utilizations! International Tier-1 IP Backbone Estimated Worst-Case Link Utilizations

Known Worst-Case Link Utilizations

Estimating the Traffic Matrix in IP Networks

Demand Estimation Results

Individual demands

- Inaccurate estimates...
- Estimated worst-case link utilizations
- Accurate!

Explanation

- Multiple demands on the same path indistinguishable, but their sum is known
- If these demands fail-over to the same alternative path, the resulting link utilizations will be correct

TM Estimation Deployment Case

- Large ISP network
 - about 80 Routers and 200 Circuits
 - 2550 TM entries
 - not all routers source/sink traffic (e.g. core)
- Known Traffic Matrix
 - Direct MPLS measurement
- Case-study will evaluate:
 - How does estimated TM compare to known TM?
 - How well does the estimated TM predict worst-case link utilizations?
 - How much can the estimated TM be improved by adding point-to-point measurements?
- TM estimation using Cariden MATE Software
 - Demand Deduction tool

Procedure

- Start with current network and known TM
 - save as "PlanA" (with TM "Known")
- IGP Simulation for non-failure
- Save Link Utilizations and Node In/Out traffic
- Estimate Traffic Matrix
 - New TM: "Estimated"
 - Save as "PlanB"
- Simulate IGP routing on both networks
 - single link failures
- Compare Results!

Estimated Demands

Demands (Estimation Only)



Measured Demands (Mbps)

Estimating the Traffic Matrix in IP Networks

Worst-Case Link Utilization



Worst-Case Link Utilizations

Based on Measured Demands (%)

- PlanA Traffic Matrix:
 - Measured
- PlanB Traffic Matrix:
 - Estimated
- IGP Simulation
 - Circuit failures
- Compare Worst-Case Link Utilizations (in %)



Add Measurements (1)

Demand Estimation: Measure top 100 Demands



Measured Demands (Mbps)

- Select the top 100 demands from the estimated traffic matrix
- Setup Juniper DCU (or equivalent) to measure these demands
 - on 23 routers
 - 38% of total traffic
- Add measured data to the TM estimation process
- (FYI: 990 demands represent 90% of total traffic)

Add Measurements (2)

Demand Estimation: Measurements on 10 Routers



Measured Demands (Mbps)

- Select the top 10 routers from the measured in/out traffic
- Select the top 16 demands on each of these routers (estimated)
- Setup Juniper DCU to measure these demands
 - 160 demands
 - 10 routers
 - 41% of total traffic
- Add measured data to the TM estimation process

Worst-Case Link Utilization (2)



Worst-Case Link Utilizations

- Revisit the worst-case link utilizations, now with more accurate TM
- Similar results as before
- Hardly any room for improvement!

Based on Measured Demands (%)

External/Inter-AS TM

- Traffic Matrix on a network will change due to core failures (closest-exit), or peering link failures
- Create *router-to-peer* TM
- Estimation procedure is similar
- Routing is different
 - policy restrictions:
 e.g. no traffic from peer to peer
 - Virtual model of remote AS



• Estimation can make use of a known core TM



External Traffic Matrix

From "Router to BGP AS", the router being the **AR** or **CR**

The external traffic matrix can influence the internal one

TM Estimation Summary

- Algorithms have been published
 - Implement yourself (e.g. IPF procedure)
 - Commercial tools are available
- Can be used in multiple scenarios:
 - Fully estimate Traffic Matrix
 - Combine with NetFlow/DCU/etc.
 - Measure large demands, estimate small ones
 - Estimate unknown demands in a network with partial MPLS mesh (LDP or RSVP)
 - Estimate Peering traffic when Core Traffic Matrix is known
- Also see AT&T work
 - E.g. Nanog29: How to Compute Accurate Traffic Matrices for Your Network in Seconds [2]

Questions?

Thomas Telkamp telkamp@cariden.com

Estimating the Traffic Matrix in IP Networks

References

- 1. A. Gunnar, M. Johansson, and T. Telkamp, "Traffic Matrix Estimation on a Large IP Backbone A Comparison on Real Data", *Internet Measurement Conference 2004.* Taormina, Italy, October 2004.
- 2. Yin Zhang, Matthew Roughan, Albert Greenberg, David Donoho, Nick Duffield, Carsten Lund, Quynh Nguyen, and David Donoho, "How to Compute Accurate Traffic Matrices for Your Network in Seconds", NANOG29, Chicago, October 2004.
- 3. AT&T Tomogravity page: http://public.research.att.com/viewProject.cfm?prjID=133/
- 4. S. Schnitter, T-Systems; M. Horneffer, T-Com. "Traffic Matrices for MPLS Networks with LDP Traffic Statistics." Proc. Networks 2004, VDE-Verlag 2004.
- 5. Y. Vardi. "Network Tomography: Estimating Source-Destination Traffic Intensities from Link Data." J.of the American Statistical Association, pages 365–377, 1996.