the economics of network control

RIPE51
Amsterdam

Estimating the Traffic Matrix in IP Networks

October 10th, 2005

Thomas Telkamp
telkamp@cariden.com

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])

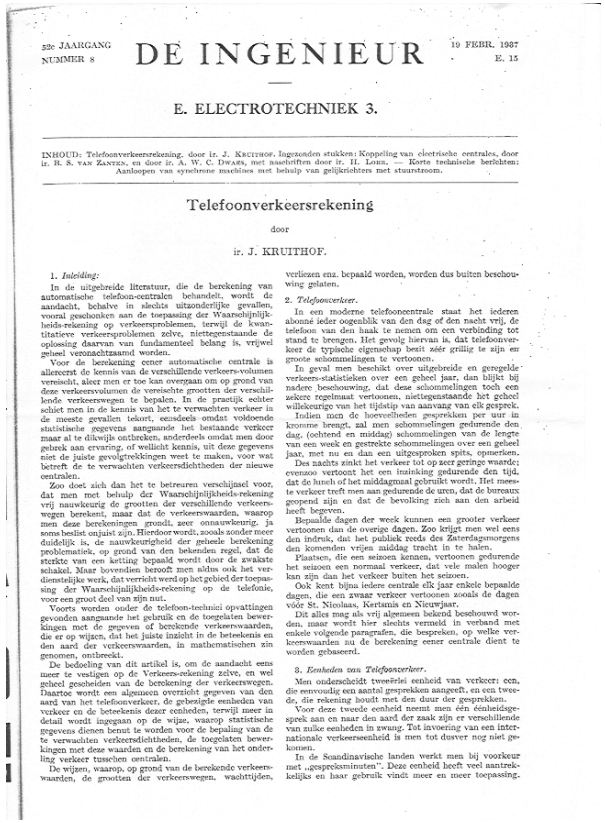
What do we want?

- 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 (!)



52e JAARGANG
NUMMER 8

DE INGENIEUR

19 FEBR. 1937
E. 15

E. ELECTROTECHNIEK 3.

INHOUD: Telefoonverkeersrekening, door ir. J. KRUITHOF. Ingezonden stukken: Koppeling van electrische centrales, door ir. B. S. VAN ZANTEN, en door ir. A. W. C. DWARS, met naschriften door ir. H. LOBR. — Korte technische berichten: Aanloopen van synchrone machines met behulp van gelijkrichters met stuurstroom.

Telefoonverkeersrekening

door

ir. J. KRUITHOF.

1. *Inleiding:*

In de uitgebreide literatuur, die de berekening van automatische telefoon-centralen behandelt, wordt de aandacht, behalve in slechts uitzonderlijke gevallen, vooral geschonken aan de toepassing der Waarschijnlijkheids-rekening op verkeersproblemen, terwijl de kwantitatieve verkeersproblemen zelve, niettegenstaande de oplossing daarvan van fundamenteel belang is, vrijwel geheel verontachtzaamd worden.

Voor de berekening eener automatische centrale is allereerst de kennis van de verschillende verkeers-volumen vereischt, aleer men er toe kan overgaan om op grond van deze verkeersvolumen de vereischte grootten der verschillende verkeerswegen te bepalen. In de practijk echter schijnt men in de kennis van het te verwachten verkeer in de meeste gevallen tekort, eensdeels omdat voldoende statistische gegevens aangaande het bestaande verkeer maar al te dikwijls ontbreken, anderdeels omdat men door gebrek aan ervaring, of wellicht kennis, uit deze gegevens niet de juiste gevolgtrekkingen weet te maken, voor wat betreft de te verwachten verkeersdichtheden der nieuwe centralen.

Zoo doet zich dan het te betreuren verschijnsel voor, dat men met behulp der Waarschijnlijkheids-rekening vrij nauwkeurig de grootten der verschillende verkeerswegen berekent, naar dat de verkeerswaarden, waarop men deze berekeningen grondt, zeer onnauwkeurig, ja soms beslist onjuist zijn. Hierdoor wordt, zooals sonder meer duidelijk is, de nauwkeurigheid der geheele berekening problematiek, op grond van den bekenden regel, dat de sterkte van een ketting bepaald wordt door de zwakste schakel. Maar bovendien berooft men aldus ook het verdienstelijke werk, dat verricht werd op het gebied der toepassing der Waarschijnlijkheids-rekening op de telefonie, voor een groot deel van zijn nut.

Voorts worden onder de telefoon-techniei opvattingen gevonden aangaande het gebruik en de toegelaten bewerkingen met de gegeven of berekende verkeerswaarden, die er op wijzen, dat het juiste inzicht in de beteekenis en den aard der verkeerswaarden, in mathemastischen zin genomen, ontbreekt.

De bedoeling van dit artikel is, om de aandacht eens meer te vestigen op de Verkeers-rekening zelve, en wel geheel gesoheiden van de berekening der verkeerswegen. Daartoe wordt een algemeen overzicht gegeven van den aard van het telefoonverkeer, de gebezigde eenheden van verkeer en de beteekenis dezer eenheden, terwijl meer in detail wordt ingegaan op de wijze, waarop statistische gegevens dienen benut te worden voor de bepaling van de te verwachten verkeersdichtheden, de toegelaten bewerkingen met deze waarden en de berekening van het onderling verkeer tusschen centralen.

De wijzen, waarop, op grond van de berekende verkeerswaarden, de grootten der verkeerswegen, wachttijden, verliezen enz. bepaald worden, worden dus buiten beschouwing gelaten.

2. *Telefoonverkeer.*

In een moderne telefooncentrale staat het iedereen abonné ieder oogenblik van den dag of den nacht vrij, de telefoon van den haak te nemen om een verbinding tot stand te brengen. Het gevolg hiervan is, dat telefoonverkeer de typische eigenschap bezit zéér grillig te zijn en groote schommelingen te vertoonen.

In geval men beschikt over uitgebreide en geregelde verkeers-statistieken over een geheel jaar, dan blijkt bij nadere beschouwing, dat deze schommelingen toch een zekere regelmaat vertoonen, niettegenstaande het geheel willekeurige van het tijdstip van aanvang van elk gesprek.

Indien men de hoeveelheden gesprekken per uur in kromme brengt, zal men schommelingen gedurende den dag, (ochtend en middag) schommelingen van de lengte van een week en gestrekte schommelingen over een geheel jaar, met nu en dan een uitgesproken spits, opmerken.

Des nachts zinkt het verkeer tot op zeer geringe waarde; evenzoo vertoont het een inzinking gedurende den tijd, dat de lunch of het middagmaal gebruikt wordt. Het meeste verkeer treft men aan gedurende de uren, dat de bureaux geopend zijn en dat de bevolking zich aan den arbeid heeft begeven.

Bepaalde dagen der week kunnen een grooter verkeer vertoonen dan de overige dagen. Zoo krijgt men wel eens den indruk, dat het publiek reeds des Zaterdagsmorgens den komenden vrijen middag tracht in te halen.

Plaatsen, die een seizoen kennen, vertoonen gedurende het seizoen een normaal verkeer, dat vele malen hooger kan zijn dan het verkeer buiten het seizoen.

Ook kent bijna iedere centrale elk jaar enkele bepaalde dagen, die een zwaar verkeer vertoonen zooals de dagen vóór St. Nicolaas, Kerstmis en Nieuwjaar.

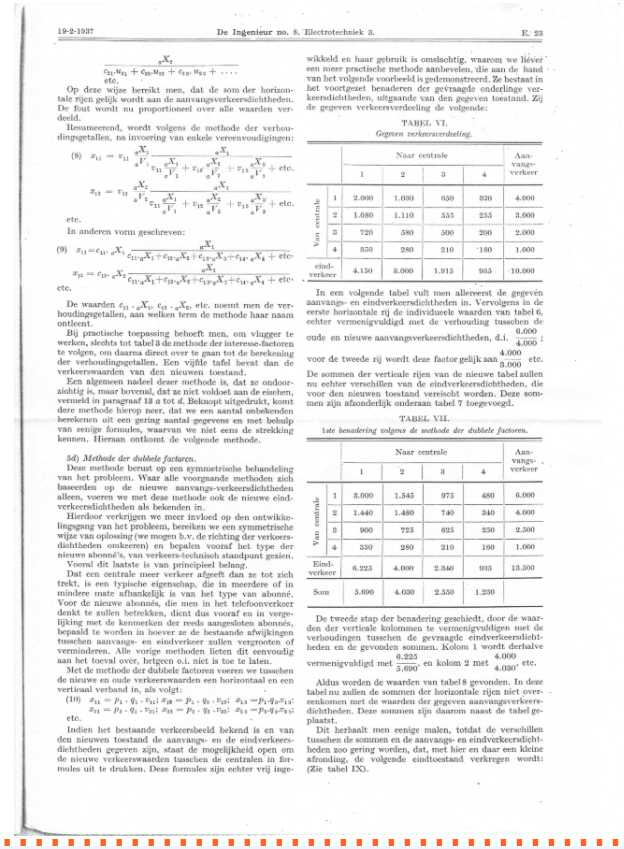
Dit alles mag als vrij algemeen bekend beschouwd worden, maar wordt hier slechts vermeld in verband met enkele volgende paragrafen, die bespreken, op welke verkeerswaarden nu de berekening eener centrale dient te worden gebaseerd.

3. *Eenheden van Telefoonverkeer.*

Men onderscheidt tweeërlei eenheid van verkeer: een, die eenvoudig een aantal gesprekken aangeeft, en een tweede, die rekening houdt met den duur der gesprekken.

Voor deze tweede eenheid neemt men één éénheidsgesprek aan en naar den aard der zaak zijn er verschillende van zulke eenheden in zwang. Tot invoering van een internationale verkeerseenheid is men tot dusver nog niet gekomen.

In de Scandinavische landen werkt men bij voorkeur met „gespreksminuten". Deze eenheid heeft veel aantrekkelijks en haar gebruik vindt meer en meer toepassing.



19-2-1937 De Ingenieur no. 8. Electrotechniek 3. E. 23

$$\frac{{}_aX_1}{c_{21}.u_{21}+c_{22}.u_{22}+c_{23}.u_{23}+\ldots}$$

etc.

Op deze wijze bereikt men, dat de som der horizontale rijen gelijk wordt aan de aanvangsverkeersdichtheden. De fout wordt nu proportioneel over alle waarden verdeeld.

Resumeerend, wordt volgens de methode der verhoudingsgetallen, na invoering van enkele vereenvoudigingen:

(8) $x_{11} = v_{11}\,{}_aX_1 \;:\; v_{11}\,{}_aX_1 + v_{12}\,{}_aX_2 + v_{13}\,{}_aX_3 + \text{etc.}$

$x_{12} = v_{12}\,{}_aX_2 \;:\; v_{11}\,{}_aX_1 + v_{12}\,{}_aX_2 + v_{13}\,{}_aX_3 + \text{etc.}$

etc.

In anderen vorm geschreven:

(9) $x_{11} = c_{11}.\,{}_aX_1 \;:\; c_{11}.\,{}_aX_1 + c_{12}.\,{}_aX_2 + c_{13}.\,{}_aX_3 + c_{14}.\,{}_aX_4 + \text{etc.}$

$x_{12} = c_{12}.\,{}_aX_2 \;:\; c_{11}.\,{}_aX_1 + c_{12}.\,{}_aX_2 + c_{13}.\,{}_aX_3 + c_{14}.\,{}_aX_4 + \text{etc.}$

etc.

De waarden $c_{11}.\,{}_aX_1$, $c_{12}.\,{}_aX_2$, etc. noemt men de verhoudingsgetallen, aan welken term de methode haar naam ontleent.

Bij practische toepassing behoeft men, om vlugger te werken, slechts tot tabel 3 de methode der interesse-factoren te volgen, om daarna direct over te gaan tot de berekening der verhoudingsgetallen. Een vijfde tafel bevat dan de verkeerswaarden van den nieuwen toestand.

Een algemeen nadeel dezer methode is, dat ze ondoorzichtig is, maar bovenal, dat ze niet voldoet aan de eischen, vermeld in paragraaf 13 o tot d. Beknopt uitgedrukt, komt deze methode hierop neer, dat we een aantal onbekenden berekenen uit een gering aantal gegevens en met behulp van eenige formules, waarvan we niet eens de strekking kennen. Hieraan ontkomt de volgende methode.

5d) *Methode der dubbele factoren.*

Deze methode berust op een symmetrische behandeling van het probleem. Waar alle voorgaande methoden zich baseerden op de nieuwe aanvangs-verkeersdichtheden alleen, voeren we met deze methode ook de nieuwe eindverkeersdichtheden als bekenden in.

Hierdoor verkrijgen we meer invloed op den ontwikkelingsgang van het probleem, bereiken we een symmetrische wijze van oplossing (we mogen b.v. de richting der verkeersdichtheden omkeeren) en bepalen vooraf het type der nieuwe abonné's, van verkeers-technisch standpunt gezien.

Vooral dit laatste is van principieel belang.

Dat een centrale meer verkeer afgeeft dan ze tot zich trekt, is een typische eigenschap, die in meerdere of in mindere mate afhankelijk is van het type van abonné. Voor de nieuwe abonnés, die men in het telefoonverkeer denkt te zullen betrekken, dient dus vooraf en in vergelijking met de kenmerken der reeds aangesloten abonnés, bepaald te worden in hoever ze de bestaande afwijkingen tusschen aanvangs- en eindverkeer zullen vergrooten of verminderen. Alle vorige methoden lieten dit eenvoudig aan het toeval over, hetgeen o.i. niet is toe te laten.

Met de methode der dubbele factoren voeren we tusschen de nieuwe en oude verkeerswaarden een horizontaal en een vertioaal verband in, als volgt:

(10) $x_{11} = p_1 . q_1 . v_{11};\; x_{12} = p_1 . q_2 . v_{12};\; x_{13} = p_1 . q_3 . v_{13};$

$x_{21} = p_2 . q_1 . v_{21};\; x_{22} = p_2 . q_2 . v_{22};\; x_{23} = p_2 . q_3 . v_{23};$

etc.

Indien het bestaande verkeersbeeld bekend is en van den nieuwen toestand de aanvangs- en de eindverkeersdichtheden gegeven zijn, staat de mogelijkheid open om de nieuwe verkeerswaarden tusschen de centralen in formules uit te drukken. Deze formules zijn echter vrij ingewikkeld en haar gebruik is omslachtig, waarom we liever een meer practische methode aanbevelen, die aan de hand van het volgende voorbeeld is gedemonstreerd. Ze bestaat in het voortgezet benaderen der gevraagde onderlinge verkeersdichtheden, uitgaande van den gegeven toestand. Zij de gegeven verkeersverdeeling de volgende:

TABEL VI.
Gegeven verkeersverdeeling.

Van centrale	Naar centrale 1	2	3	4	Aanvangsverkeer
1	2.000	1.030	650	320	4.000
2	1.080	1.110	555	255	3.000
3	720	580	500	200	2.000
4	850	280	210	160	1.000
eindverkeer	4.150	3.000	1.915	935	10.000

In een volgende tabel vult men allereerst de gegeven aanvangs- en eindverkeersdichtheden in. Vervolgens in de eerste horizontale rij de individuele waarden van tabel 6, echter vermenigvuldigd met de verhouding tusschen de oude en nieuwe aanvangsverkeersdichtheden, d.i. $\frac{6.000}{4.000}$; voor de tweede rij wordt deze factor gelijk aan $\frac{4.000}{3.000}$ etc.

De sommen der verticale rijen van de nieuwe tabel zullen nu echter verschillen van de eindverkeersdichtheden, die voor den nieuwen toestand verschuit worden. Deze sommen zijn afzonderlijk onderaan tabel 7 toegevoegd.

TABEL VII.
1ste benadering volgens de methode der dubbele factoren.

Van centrale	Naar centrale 1	2	3	4	Aanvangsverkeer
1	3.000	1.545	975	480	6.000
2	1.440	1.480	740	340	4.000
3	900	725	625	250	2.500
4	330	280	210	160	1.000
Eindverkeer	6.225	4.000	2.340	935	13.500
Som	5.690	4.030	2.550	1.230	

De tweede stap der benadering geschiedt, door de waarden der verticale kolommen te vermenigvuldigen met de verhoudingen tusschen de gevraagde eindverkeersdichtheden en de gevonden sommen. Kolom 1 wordt derhalve vermenigvuldigd met $\frac{6.225}{5.690}$, en kolom 2 met $\frac{4.000}{4.030}$, etc.

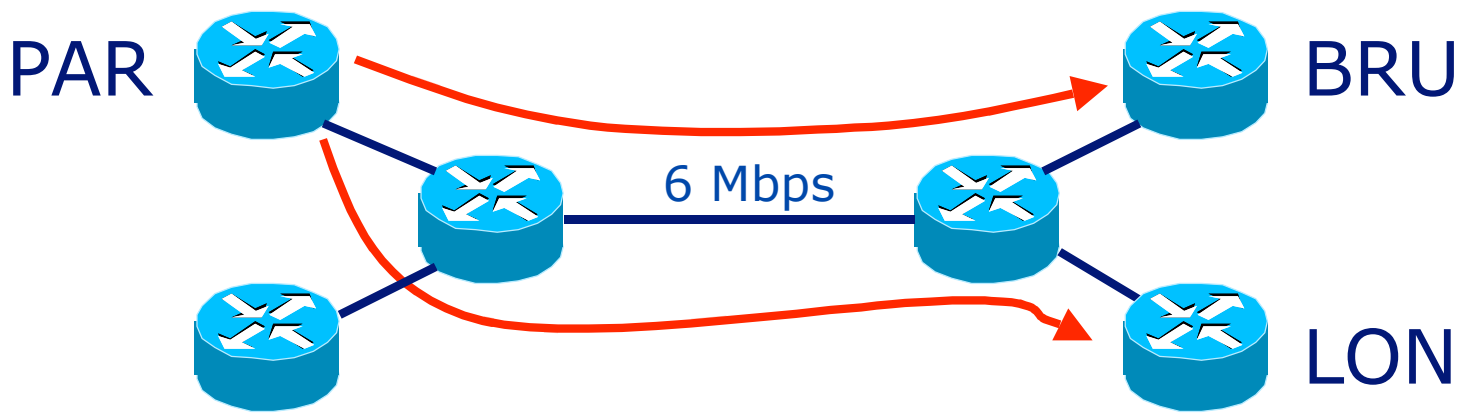
Aldus worden de waarden van tabel 8 gevonden. In deze tabel nu zullen de sommen der horizontale rijen niet overeenkomen met de waarden der gegeven aanvangsverkeersdichtheden. Deze sommen zijn daarom naast de tabel geplaatst.

Dit herhaalt men eenige malen, totdat de verschillen tusschen de sommen en de aanvangs- en eindverkeersdichtheden zoo gering worden, dat, met hier en daar een kleine afronding, de volgende eindtoestand verkregen wordt: (Zie tabel IX).

Demand Estimation

- Underdetermined system:
  - N nodes in the network
  - O(N) links utilizations *(known)*
  - $O(N^2)$ 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

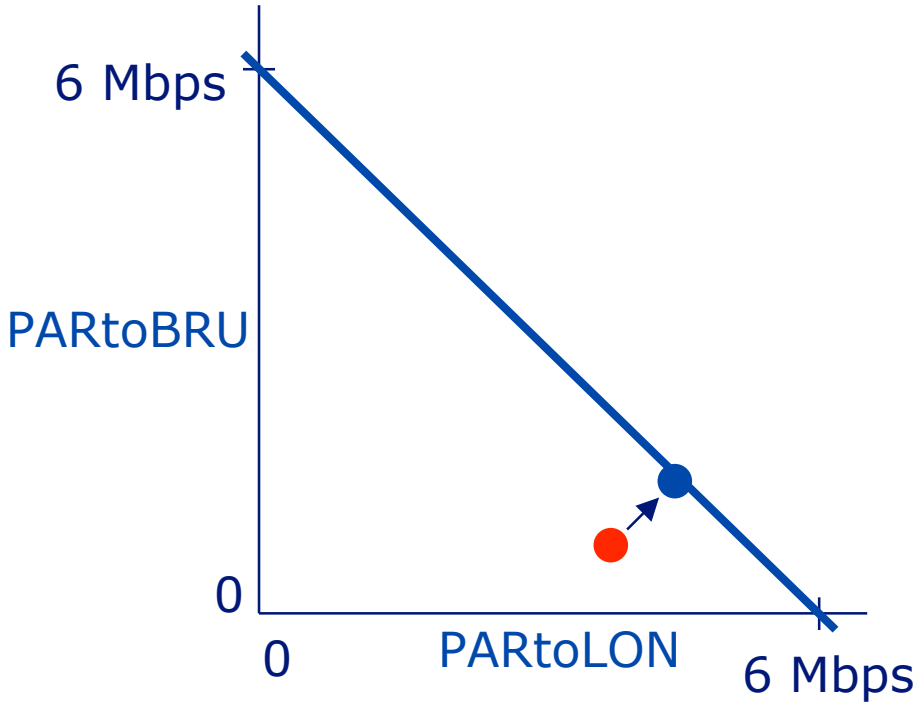


y: link utilizations
A: routing matrix
x: point-to-point demands

Solve: y = Ax
In this example: 6 = PARtoBRU + PARtoLON

Example

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



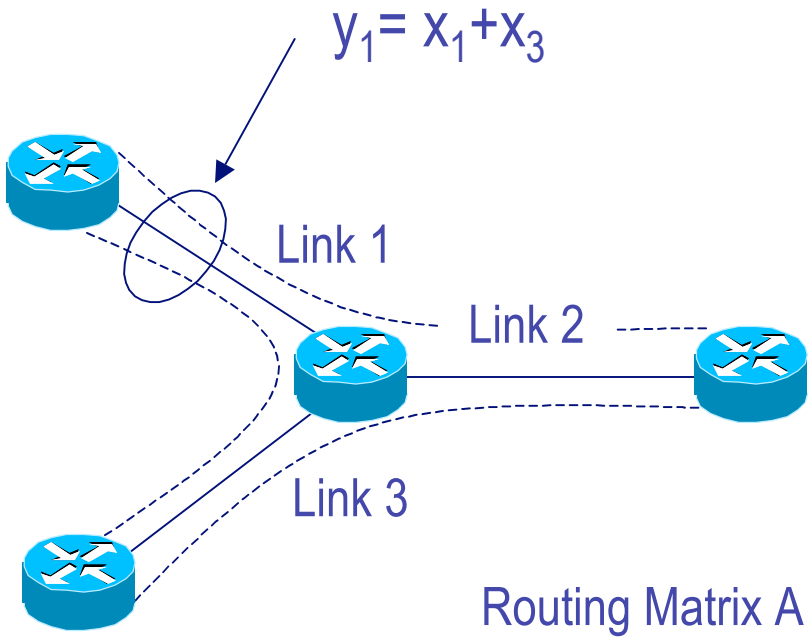
Additional information

E.g. Gravity Model (every source sends the same per-centage 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: PARtoBRU = 1.5 Mbps and PARtoLON = 4.5 Mbps

General Formulation



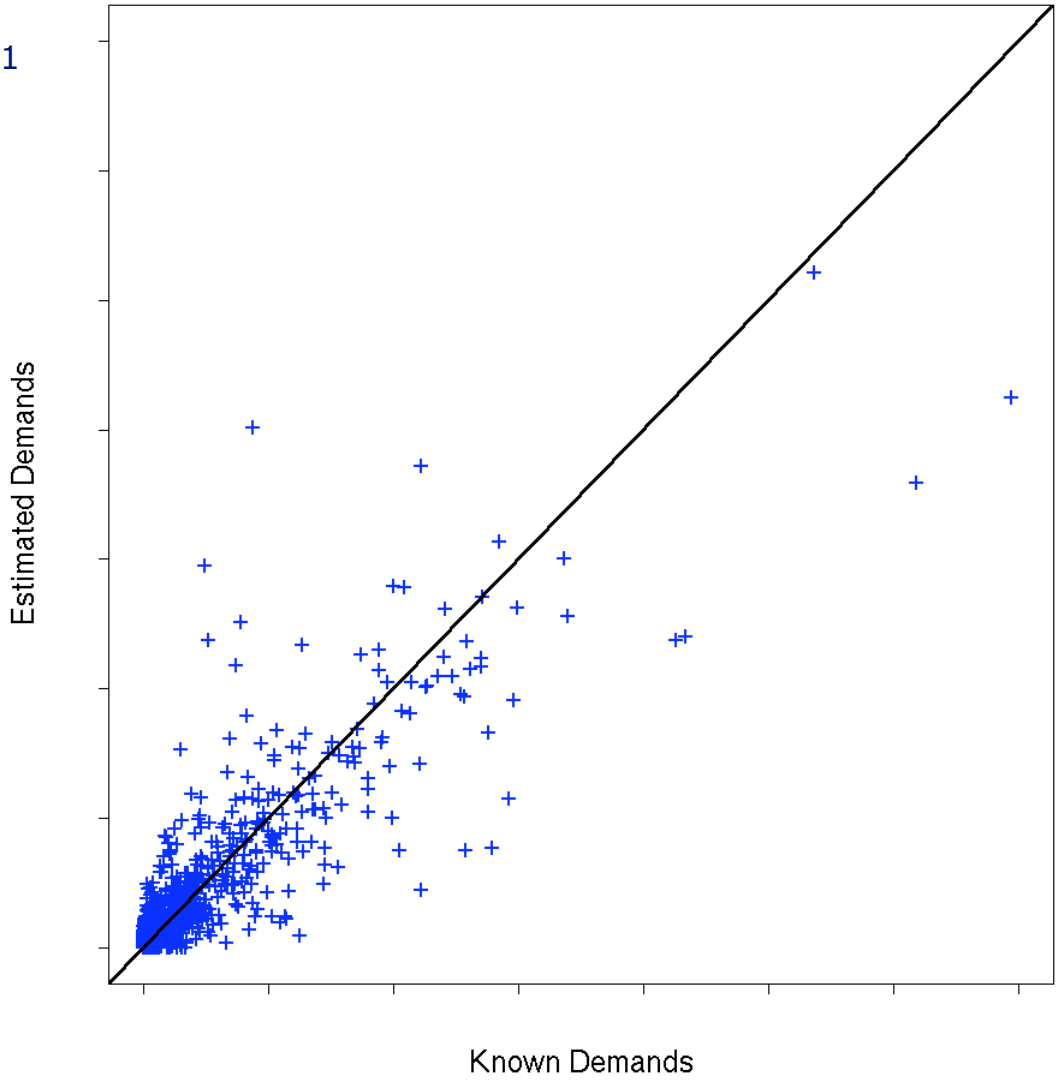
- The total traffic on each link is the sum of all the source destination flows that route over that link
- Given Y and the routing matrix A solve for X

Routing Matrix A

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

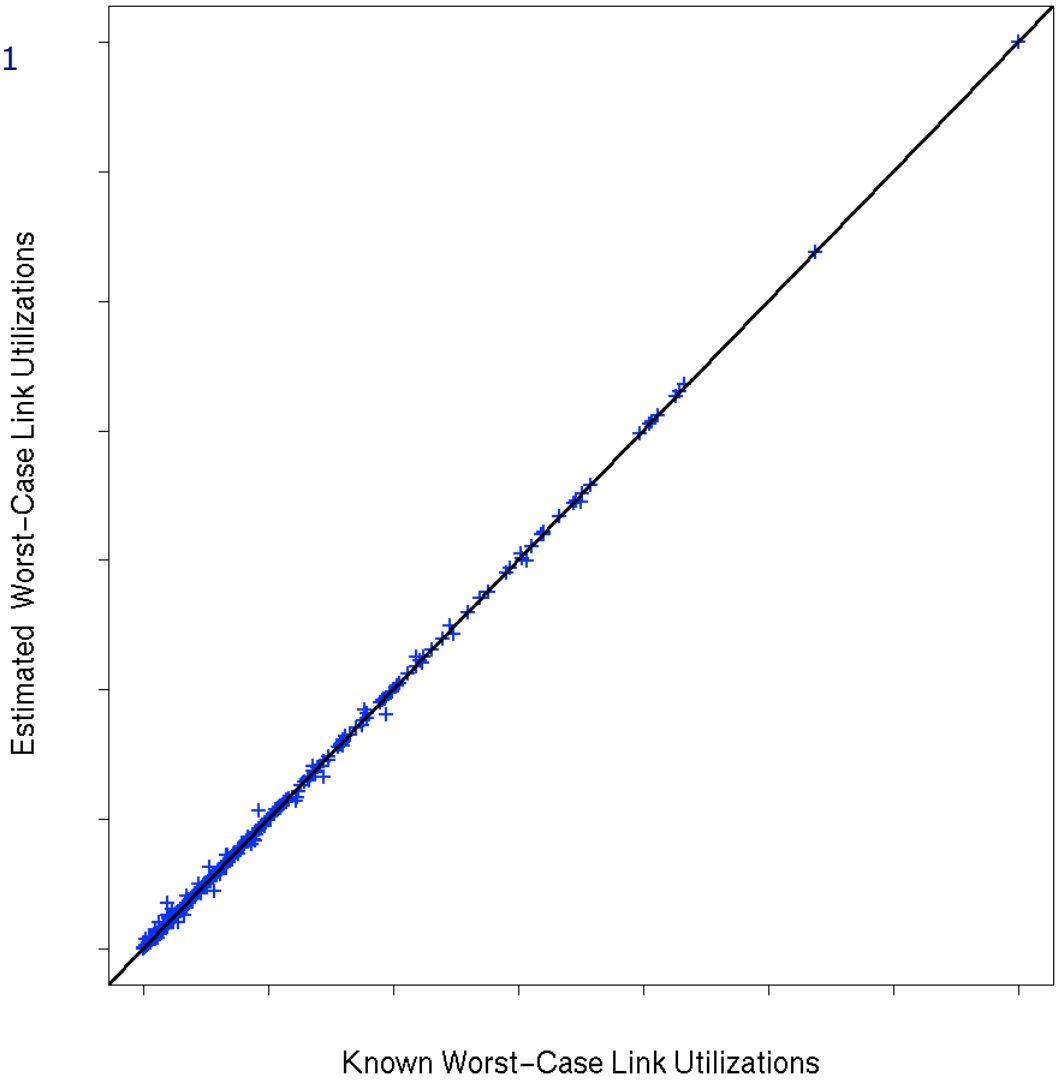
Network Results: Estimated Demands

International Tier-1
IP Backbone



Estimated Link Utilizations!

International Tier-1
IP Backbone



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

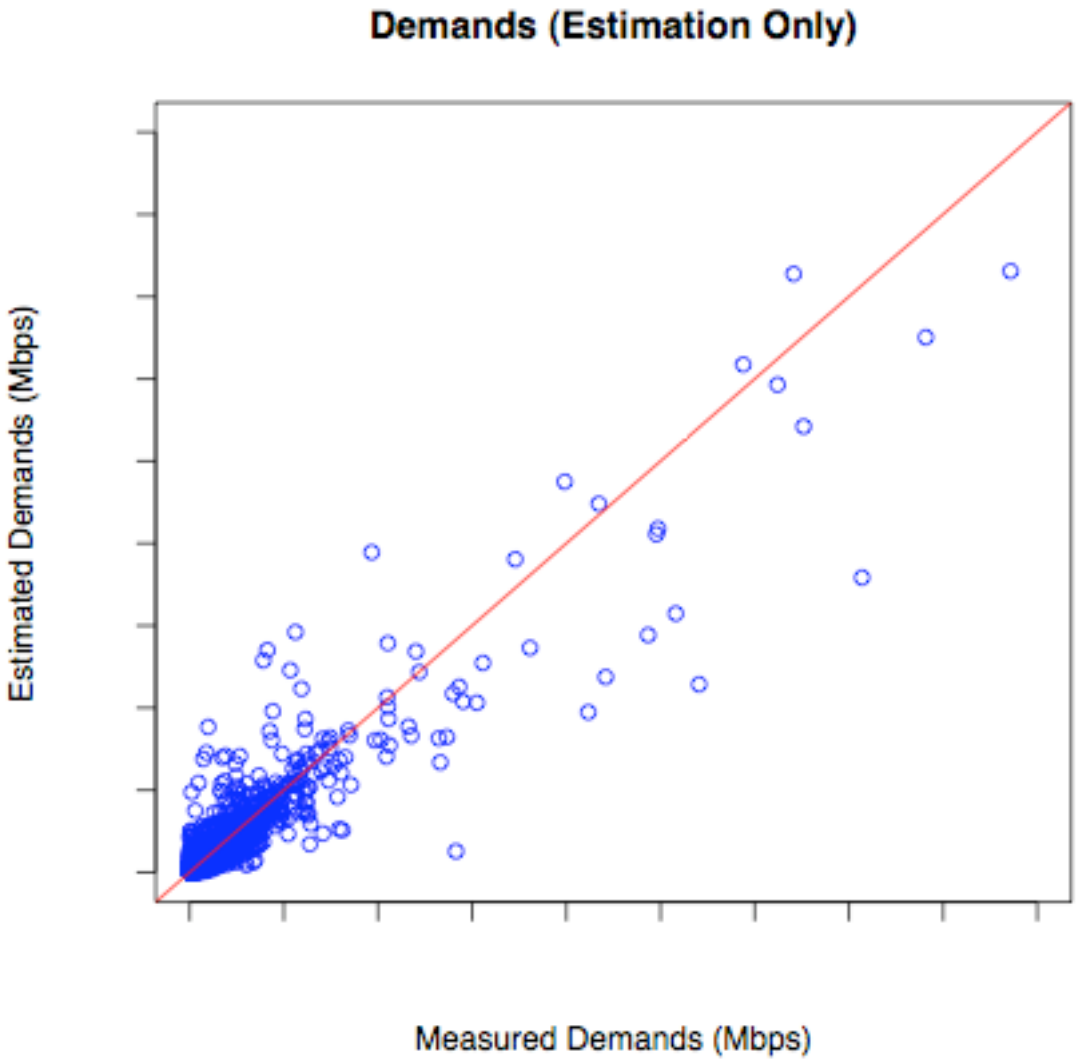
TM Estimation Deployment Case

- 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

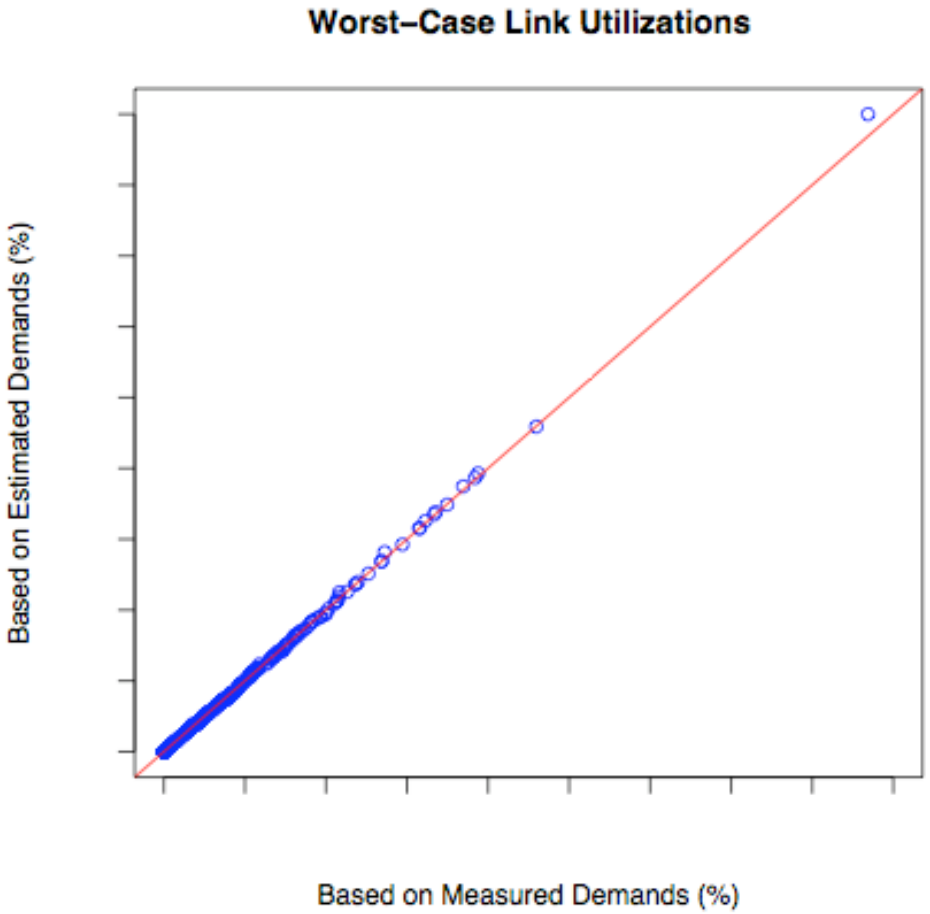
Procedure

- 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

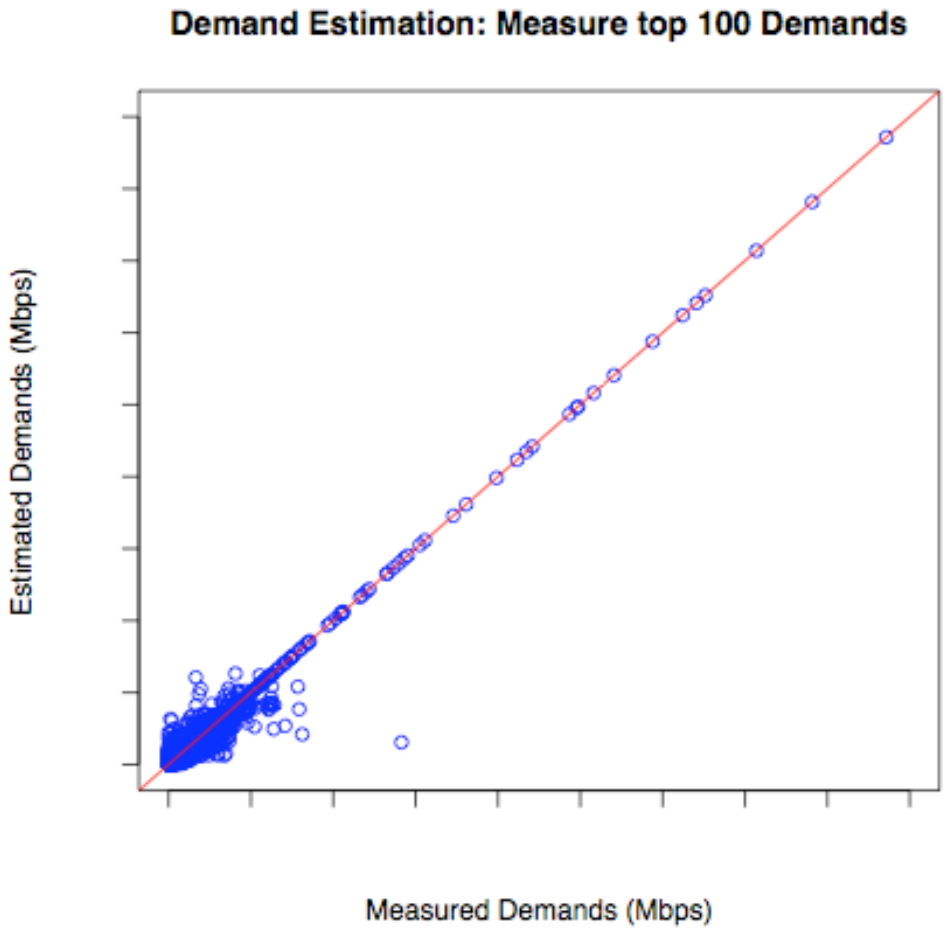


Worst-Case Link Utilization



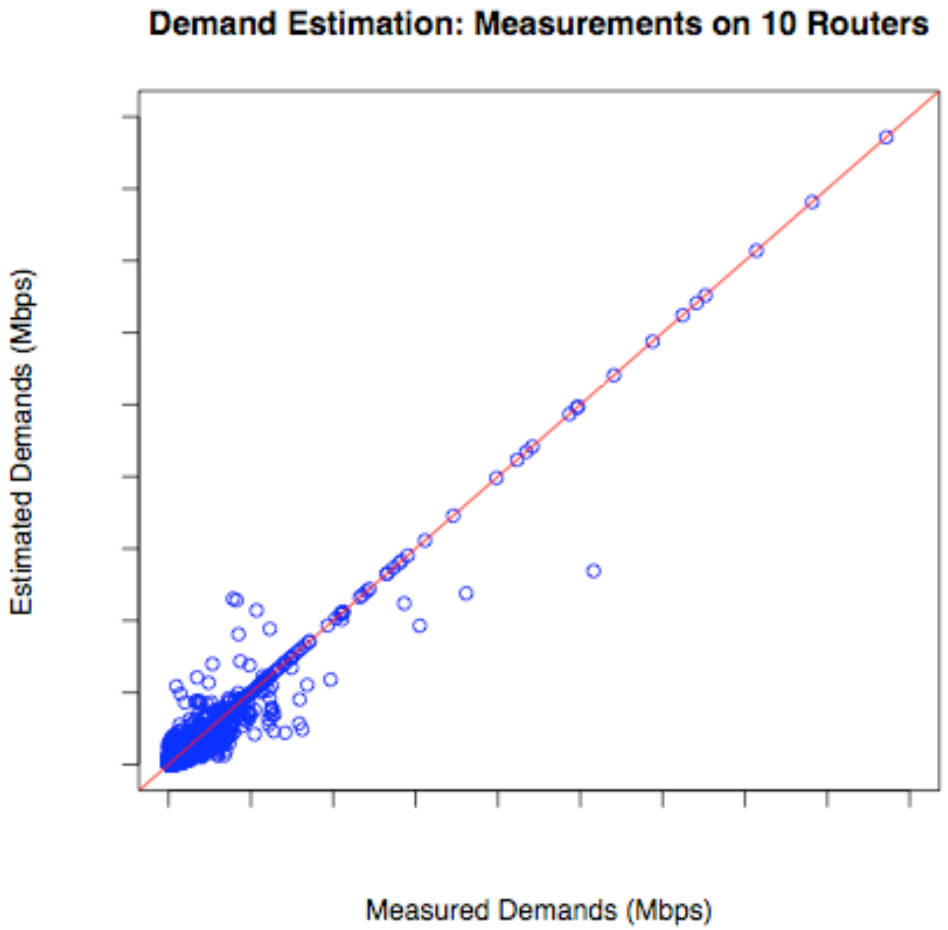
- PlanA Traffic Matrix:
  - Measured
- PlanB Traffic Matrix:
  - Estimated
- IGP Simulation
  - Circuit failures
- Compare Worst-Case Link Utilizations (in %)

Add Measurements (1)



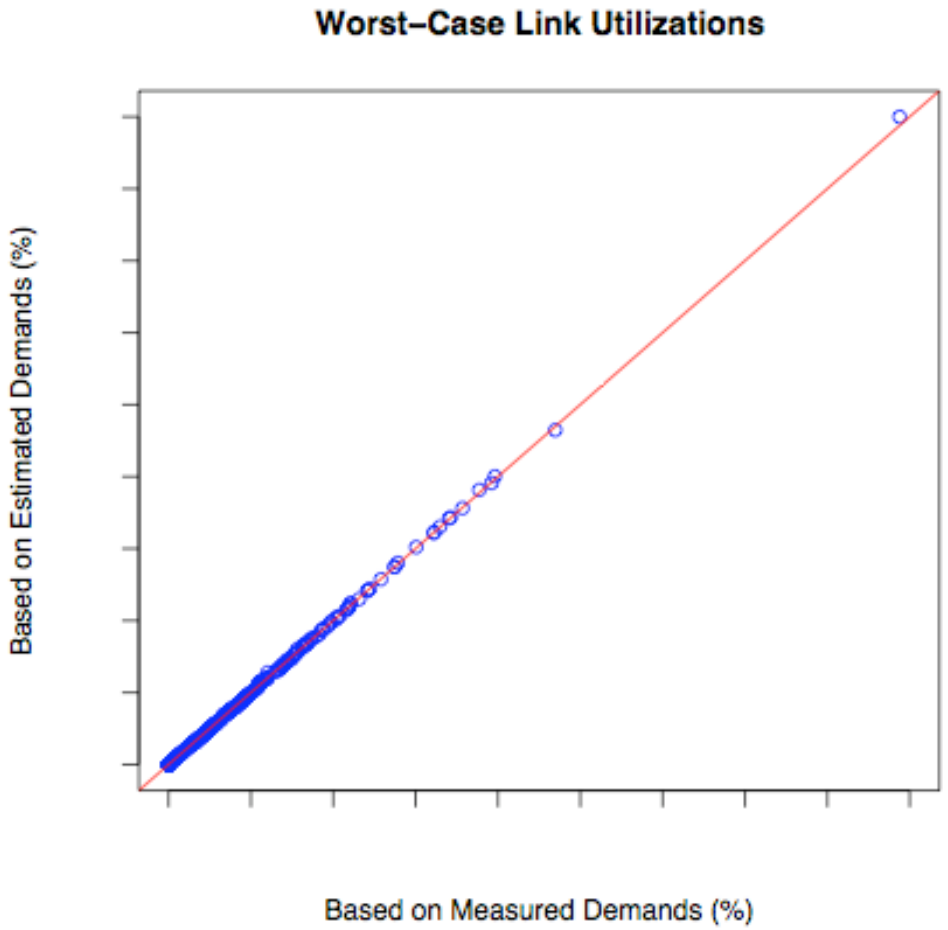
- Select the top 100 demands from the estimated traffic matrix
- Setup Juniper DCU (or equivalent) to measure these demands
  - on 23 routers
  - 38% of total traffic
- Add measured data to the TM estimation process
- (FYI: 990 demands represent 90% of total traffic)

Add Measurements (2)



- 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)

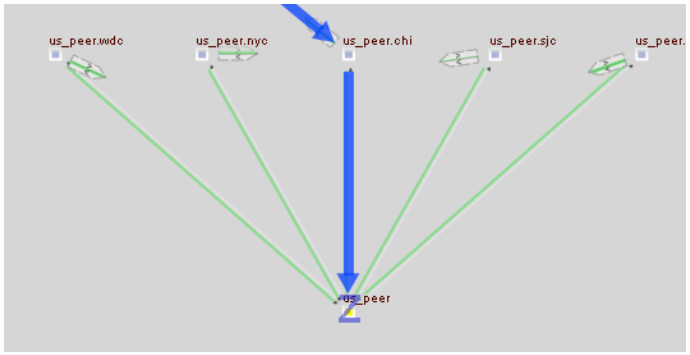


- Revisit the worst-case link utilizations, now with more accurate TM
- Similar results as before
- Hardly any room for improvement!

External/Inter-AS TM

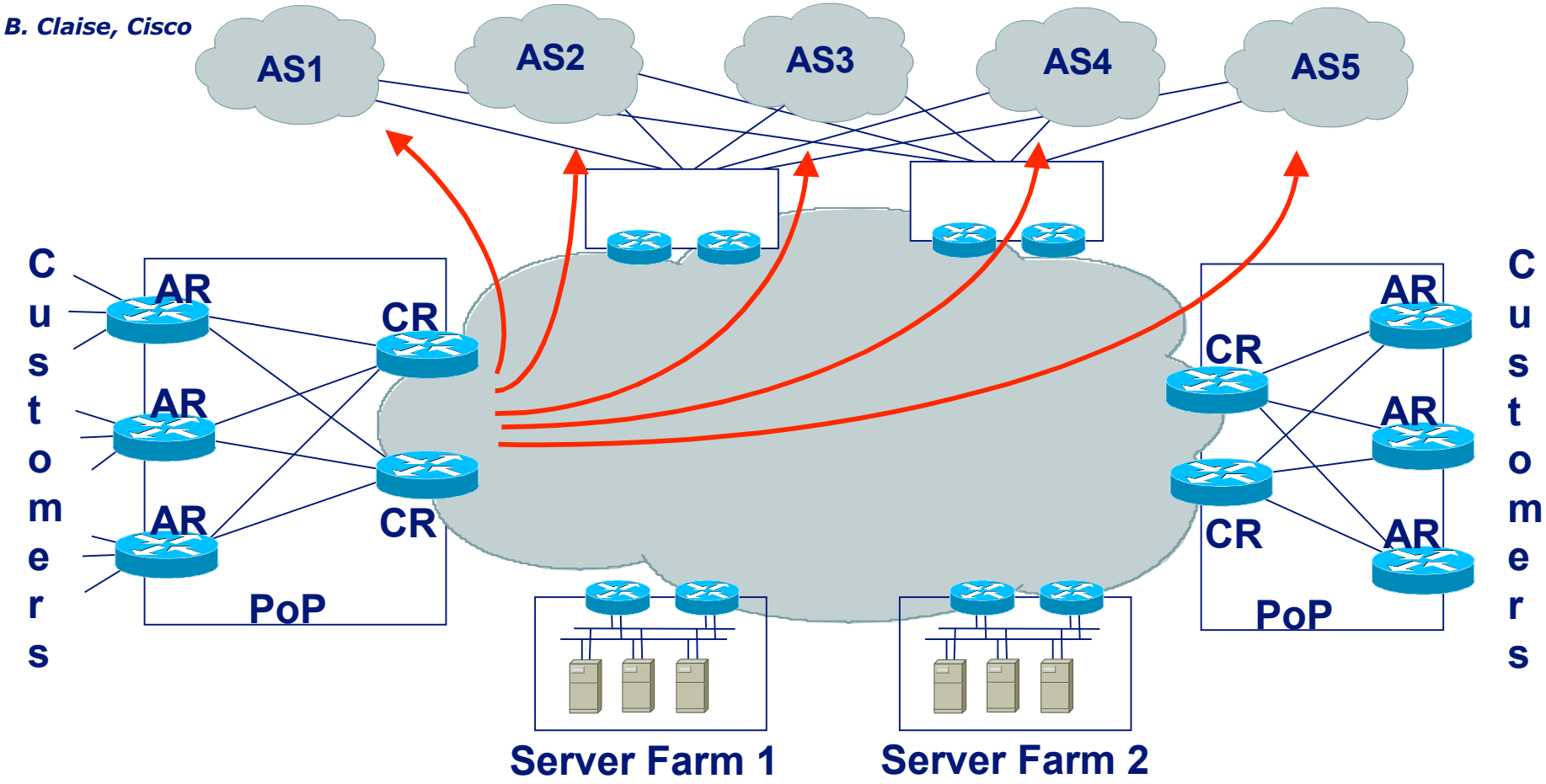
- Traffic Matrix on a network will change due to core failures (closest-exit), or peering link failures

- 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

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.