

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI STOSOWANEJ



PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Zakład Sterowania Systemów

Zespół Złożonych Systemów

Temat: Estymacja macierzy ruchu w sieci IP.

AUTOR: inż. Krzysztof Iracki

OPIEKUN PRACY: dr inż. Mariusz Kamola

Serdeczne podziękowania dla opiekuna mojej pracy *dr inż. Mariusza Kamoli* za cierpliwość w uzupełnianiu mojej wiedzy oraz merytoryczne czuwanie nad przebiegiem prac.

Spis treści

Streszczenie	4
Abstract	4
1. Wstęp	5
1.1 Cel i założenia pracy.....	5
1.2 Opis problemu	5
1.3 Opis podstawowych elementów.....	7
1.2 Charakterystyka wykorzystanej sieci	8
2. Prezentacja rozwiązań teoretycznych	10
2.1 Wstęp.....	10
2.2 Wybór algorytmu	10
2.3 Kontekst EM.....	11
2.4 Opis działania EM.....	12
3. Prezentacja rozwiązań technicznych	14
4. Implementacja rozwiązania	16
4.1 Implementacja standardowa	16
4.2 Opis funkcji fmincon	19
4.3 Miary	21
4.4 Ulepszenia.....	23
4.5 Gravity Model	27
5. Wyniki standardowej implementacji wraz z ulepszeniami	28
5.1 Interpretacja wyników	28
5.2 Niepoissonowski rozkład próbek	29
5.3 Wybór algorytmu active-set funkcji fmincon.....	31
6. Poprawa rozkładu próbek	33
7. Eliminacja łączy	34
7.1 Sposób eliminacji łączy	34
7.2 Wyniki oraz podstawowa analiza.....	35
7.3 Analiza bazująca na eliminacji pojedynczych łączy	38
7.4 Podsumowanie wyłączenia łączy	46
8. Podsumowanie pracy	47
9. Bibliografia	48
Dodatek A – macierze pomocnicze	49
Dodatek B – opis płyty	53

Streszczenie

Celem pracy magisterskiej była implementacja algorytmu estymującego macierz ruchu. Algorytm ten miał bazować na danych statycznych – macierzy routingu oraz macierzy transferu danych na łączach. Algorytm nie mógł wykorzystywać danych zbieranych na bieżąco z sieci. Dodatkowo w pracy zostały przeprowadzone badania wyłączenia łączy z estymacji. Celem badań było określenie obszarów wrażliwych na ograniczenia w estymacji. Pierwszy rozdział to wstęp do estymacji macierzy łączy –dlaczego są one ważne, komu i w jakich sytuacjach ich znajomość może okazać się bardzo przydatna. Rozdział drugi i trzeci zawierają prezentację rozwiązań teoretycznych i technicznych. W kolejnych rozdziałach przedstawiane są szczegóły odnośnie implementacji i jej wyników, sposoby poprawy rozkładu próbek w wykorzystanej sieci. Badanie eliminacji łączy jest ostatnim rozdziałem badawczym. Podsumowanie badań wieńczy pracę.

Abstract

Topic: Estimation of traffic matrix in IP networks.

The aim of this thesis was to implement an algorithm which estimates traffic matrix. The algorithm ought to use static data – routing matrix and link loads. The algorithm could not use data dynamically collected from network. Second aim of this thesis was to conduct research of links' elimination from traffic matrix estimation. The purpose of this research was discovery of areas vulnerable to constraints in estimation. First paragraph presents basic concerning traffic matrix – why it is so important and when knowledge of traffic matrix is very required. Paragraph second and third present existing theoretical and technical solutions. In the following paragraphs details concerning standard implementation and results, solutions improving probes' distribution in used network are presented. In the last research paragraph details concerning elimination of links from estimation are presented. Summary ends this thesis.

1. Wstęp

1.1 Cel i założenia pracy

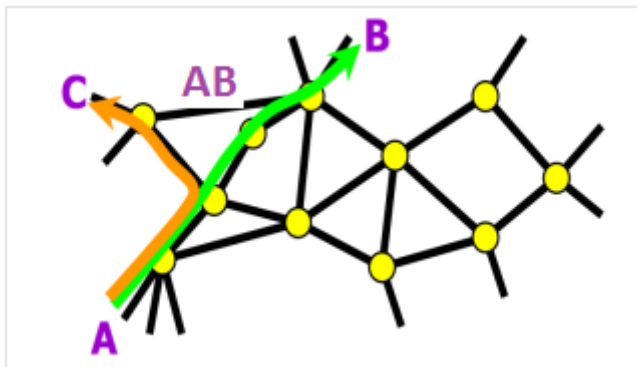
Celem pracy jest opracowanie algorytmu, który będzie estymował macierz ruchu w sieci IP. Dodatkowo algorytm ma być narzędziem służącym optymalizacji działania sieci. Funkcjonalność oferowana przez algorytm polegać będzie na możliwości wskazania węzłów sieci, których wyłączenie nie wpłynie negatywnie na działanie sieci, a równocześnie pozwoli zmniejszyć zapotrzebowanie na energię i zwiększyć utylizację węzłów.

1.2 Opis problemu

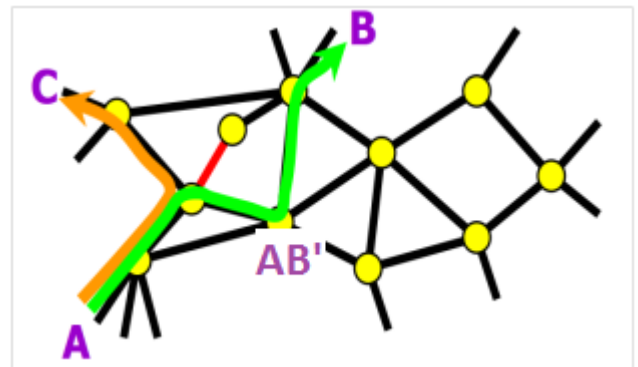
Dlaczego problem estymacji macierzy ruchu jest tak ważny? Otóż wiedza ta pozwala na:

1. Analizę niezawodności łączy:

Założmy, iż w sieci przedstawionej na rys. 1 istnieje problem z węzłem znajdującym się na łączu A – B (jest to węzeł, do którego prowadzi czerwona linia na rys. 2). Znając przepustowość dodatkowego węzła, na który skierowany jest ruch z wyłączonego, można przewidzieć problem i jeszcze przed jego wystąpieniem przygotować awaryjne połączenie. Tym samym zwiększyć niezawodność sieci w znaczący sposób.

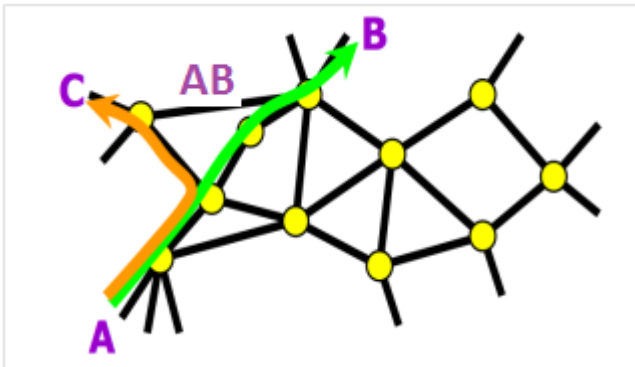


Rysunek 1 – sytuacja standardowa. Węzeł AB transferuje dane pomiędzy węzłami A i B.

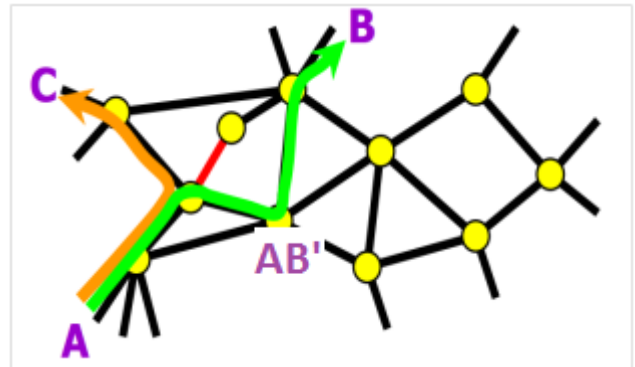


Rysunek 2 – sytuacja awaryjna. Węzeł AB nie funkcjonuje, odpowiedzialność za transfer danych przejął węzeł AB'.

2. Planowanie pojemności łączy:



Rysunek 3 – sytuacja standardowa. Węzeł AB transferuje dane pomiędzy węzłami A i B.



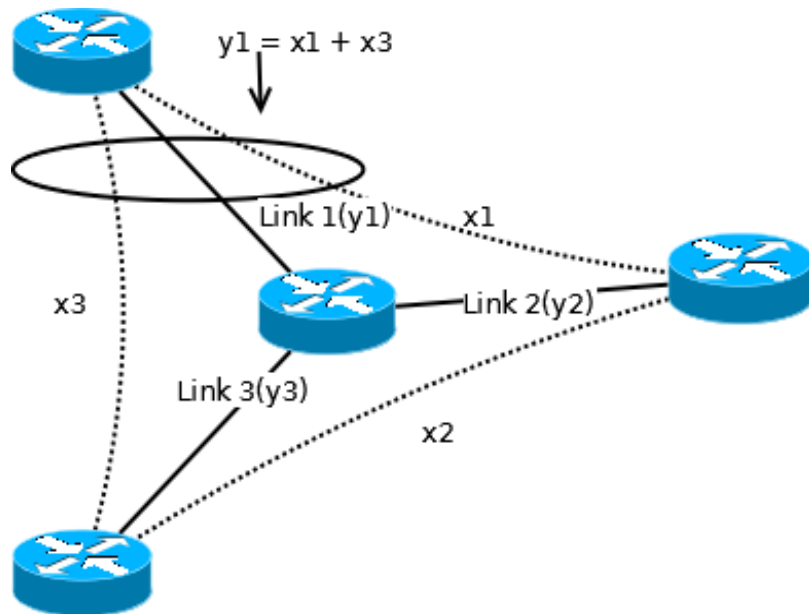
Rysunek 4 – sytuacja awaryjna. Węzeł AB nie funkcjonuje, odpowiedzialność za transfer danych przejął węzeł AB'.

Założmy, że inżynier sieciowy ma za zadanie zaplanować pojemności łączy dla nowopowstającej sieci komputerowej. Jeżeli będzie planował rozsądnie, przewidzi możliwość wystąpienia problemów z choćby pojedynczymi węzłami. W takich wypadkach musi wyznaczyć połączenie zastępcze. W związku z tym, w razie wyłączenia węzła na trasie A – B (rys. 3), ruch zostaje skierowany na nowy węzeł (rys. 4). Wiedza o postaci macierzy ruchu, a szczególnie o maksymalnych wartościach wolumenu danych przesyłanych na łączach, jest niezbędna do reagowania na sytuacje awaryjne.

Oba przedstawione przypadki wpisują się w zakres działań nazywanych inżynierią ruchu sieciowego. Wiedza ta jest bardzo przydatna administratorom i inżynierom sieci komputerowych oraz firmom zajmującym się utrzymywaniem sieci komputerowych. Wiedza dotycząca algorytmów estymacji takich macierzy jest jeszcze ważniejsza dla firm/instytucji zajmujących się opracowywaniem optymalizacji infrastruktury sieci komputerowej. Zarządcy mogą reagować podczas nagłych wypadków, optymalizować strukturę sieci w trakcie jej działania, a nawet przyczynić się do zmniejszenia zapotrzebowania na energię podczas jej działania.

1.3 Opis podstawowych elementów

Macierz ruchu jest jednym z podstawowych składników sieci komputerowej. Opisuje ona ilość danych wysłanych pomiędzy dwoma węzłami. Na rys. 5 znajduje się prosta sieć wraz z jej macierzą ruchu.



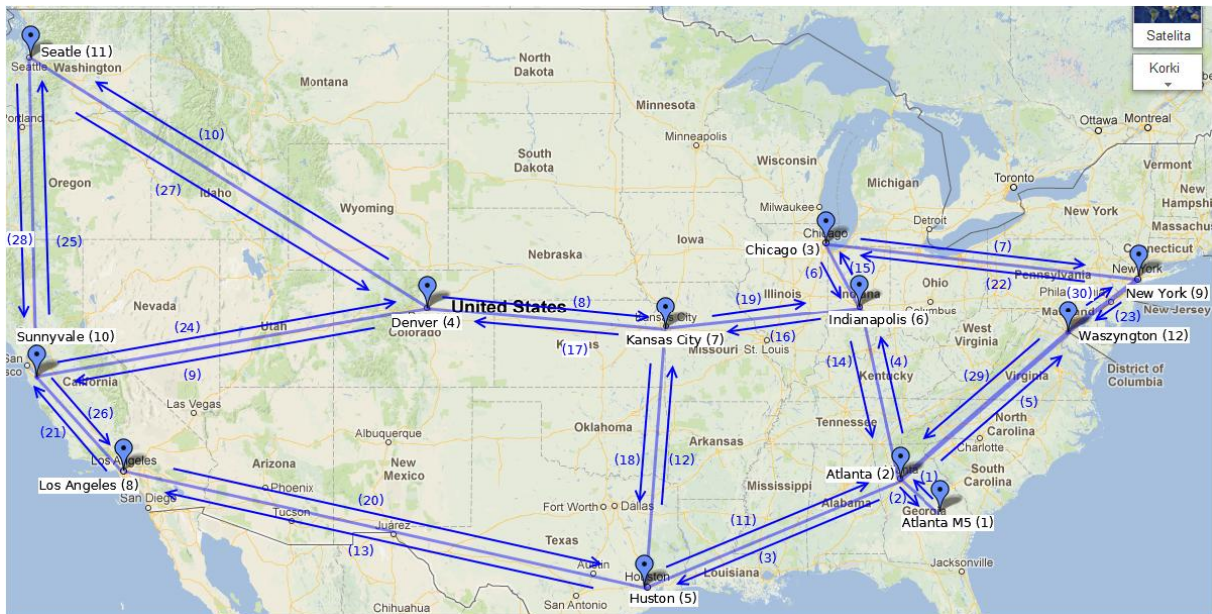
Rysunek 5 – przykładowa sieć z trzema łączami: y_1 , y_2 i y_3 , oraz trzema połączeniami: x_1 , x_2 i x_3

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

Sieć składa się z trzech węzłów – Y_1 , Y_2 i Y_3 . We wzorze 1 znajduje się jedno z podstawowych równań opisujących sieć komputerową $Y = A * X$, gdzie Y to ilość danych transferowanych na danym węźle, A to macierz routingu określająca, które łącza przechodzą przez dany węzeł, a X to właśnie ilość danych przesyłanych na danym łączu. W wyżej zaprezentowanym przypadku macierz ruchu składa się z trzech łączy X_1 , X_2 i X_3 . Macierz ta, przemnożona poprzez macierz A , daje sumaryczną macierz Y . O ile Y oraz A są na bieżąco znane, macierz ruchu pozostaje zagadką. Oczywiście takie dane można na bieżąco pozyskać z sieci, jednakże jest to problematyczne. Technika, która zajmuje się zbieraniem danych na bieżąco, nazywa się NetFlow i zostanie opisana w dalszej części pracy.

1.4 Charakterystyka wykorzystanej sieci

W pracy została wykorzystana sieć Abilene [2]. Próbki ruchu sieciowego oraz macierz routingu zostały pobrane z adresu [2].



Rysunek 6 – sieć Abilene

Na rys. 6 przedstawiona jest sieć Abilene wraz ze wszystkimi węzłami (jest ich 12), a także ze wszystkimi łączami (jest ich 30). Wartości w nawisach na rys. 5 oznaczają nr węzła bądź nr łącza. Sieć posiada dwa węzły w Atlancie – nr 1 oraz 2.

Tabela 1 – Węzły, łącza oraz ilość danych transferowanych na każdym z łączy

Nazwa węzła	Nr węzła	Nazwa łącza (źródło, cel)	Nr łącza	Ilość danych – Mb/sec
ATLA-M5	1	ATLA-M5, ATLAng	1	4.1421
ATLAng	2	ATLAng, ATLA-M5	2	6.6105
		ATLAng, HSTNng	3	207.8544
		ATLAng, IPLSng	4	50.4746
		ATLAng, WASHng	5	168.1408
CHINng	3	CHINng, IPLSng	6	636.7648
		CHINng, NYCMng	7	292.3099
DNVRng	4	DNVRng, KSCYng	8	502.8479
		DNVRng, SNVAng	9	282.0037
		DNVRng, STTLng	10	93.4310
HSTNng	5	HSTNng, ATLAng	11	150.4384
		HSTNng, KSCYng	12	22.4338
		HSTNng, LOSAng	13	114.6225
IPLSng	6	IPLSng, ATLAng	14	62.7179
		IPLSng, CHINng	15	579.1624
		IPLSng, KSCYng	16	580.0782
KSCYng	7	KSCYng, DNVRng	17	466.8008
		KSCYng, IPLSng	18	105.7737
		KSCYng, HSTNng	19	526.6154
LOSAng	8	LOSAng, HSTNng	20	160.7362
		LOSAng, SNVAng	21	285.6710
NYCMng	9	NYCMng, CHINng	22	462.5923
		NYCMng, WASHng	23	293.0186
SNVAng	10	SNVAng, DNVRng	24	250.3517
		SNVAng, LOSAng	25	330.3960
		SNVAng, STTLng	26	70.9952
STTLng	11	STTLng, DNVRng	27	81.8787
		STTLng, SNVAng	28	48.0968
WASHng	12	WASHng, ATLAng	29	309.8109
		WASHng, NYCMng	30	409.3716

Tabela 1 zawiera podstawowe informacje na temat sieci Abilene – węzły wraz z ich numeracją, łącza wraz z ich numeracją a także transferem danych.

2. Prezentacja rozwiązań teoretycznych

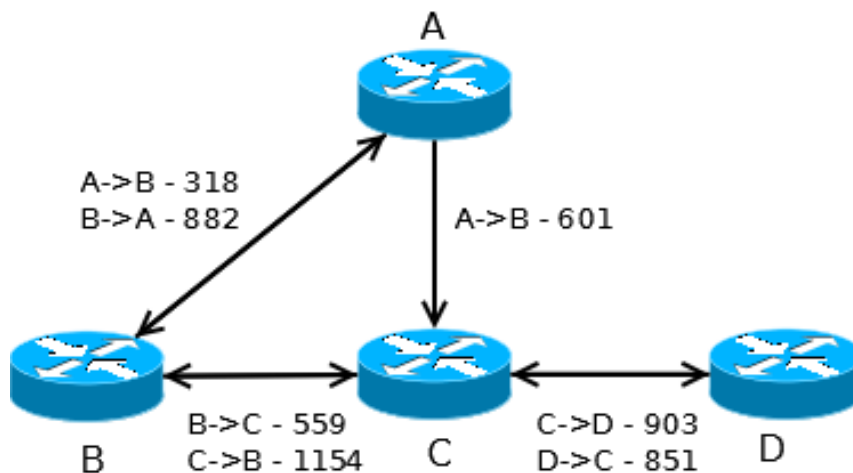
2.1 Wstęp

Rozwiązania teoretyczne bazują na bogatym aparacie matematyczny. Do poszukiwania wykorzystują znane macierze routingu oraz macierze łącz. Jako że nie wykorzystują one bieżących danych (rozumianych tutaj jako bieżące przepływy), nazywane są metodami offline. Dzielią się na dwie kategorie:

1. Metody optymalizacji – oparte na programowaniu liniowym (PL)
2. Metody statystyczne – Bayes, Expectations Maximization (EM)

2.2 Wybór algorytmu

Praca skupia się nad rozwiązaniami typu offline. Poniżej opisany został eksperyment, wykorzystujący trzy wyżej wymienione techniki, przedstawiony w artykule naukowym [3]. Jest to również eksperyment, który jasno i wyraźnie wyłonił algorytm i tłumaczy dlaczego właśnie on będzie dalej rozwijany w pracy.



Rysunek 7 – użyta w eksperymencie sieć komputerowa

Na rys. 7 znajduje się szkic sieci użytej w eksperymencie opisanym w artykule [3]. Sieć składa się z czterech węzłów oraz siedmiu łącz. Na łączach naniesione są ilości danych transferowanych od źródła do celu.

Eksperyment z artykuły naukowego [3] miał na celu wyłonienie algorytmu najlepiej estymującego macierz ruchu. Szkic sieci wykorzystanej znajduje się na rys. 7 na poprzedniej stronie. Porównanie zostało wykonane z wykorzystaniem trzech metod – dwóch metod statystycznych Bayes oraz Expectation Maximization (w skrócie EM) oraz jednej metody programowania liniowego (w skrócie PL).

Tabela 2 – Wyniki estymacji macierzy ruchu trzema metodami

Oryginalna TM(Poisson)	PL		Bayes		Oryginalna TM(Gauss)	EM	
	Estymowana TM	Błąd (%)	Estymowana TM	Błąd (%)		Estymowana TM	Błąd (%)
AB: 318	318	0	318	0	318.65	318.65	0
AC: 289	601	107	342	18	329.48	286.98	13
AD: 312	0	100	259	17	277.18	318.36	15
BA: 294	579	96	334	14	298.14	298.14	0
BC: 292	559	91	310	6	354.81	360.97	1.6
BD: 267	0	100	249	7	355.39	347.94	2
CA: 305	303	0.6	291	5	327.20	317.34	3
CB: 289	0	100	361	25	330.04	373.65	13
CD: 324	903	178	395	22	253.01	217.32	14
DA: 283	0	100	257	9	320.50	329.07	3
DB: 277	851	207	245	12	291.52	246.60	15
DC: 291	0	100	349	20	310.40	344.82	11
	Uśredniony błąd: 98%		Uśredniony błąd: 13%			Uśredniony błąd: 7.5%	

Tabela 2 zawiera wyniki eksperymentu. Z uzyskanych rezultatów wynika, iż EM wykazał się najmniejszym błędem estymacji. LP estymował z błędem rzędu 100% (niemalże podwojenie wartości), Bayes był wyraźnie dokładniejszy z błędem na poziomie 13%. Jednakże to właśnie EM wykazał się niewielkim błędem na poziomie 7.5%.

Ze względu na uzyskane wyniki to właśnie ten algorytm został wybrany.

2.3 Kontekst EM

Jako że praca skupia się na estymacji macierzy ruchu metodami offline, podstawową kwestią jest implementacja wybranego algorytmu – EM. Ze względu na brak ogólnodostępnej gotowej implementacji EM, podjęta została decyzja, aby implementacja została oparta na artykule naukowym [6] autorstwa Y. Vardiego. Wybór padł na wyżej wymienioną pozycję ze względu na dobre objaśnienie algorytmu oraz przedstawienie eksperymentu potwierdzającego poprawne działanie algorytmu.

Jednakże algorytm ten również budzi kontrowersje. Pozycje [3] oraz [4] zdecydowanie krytykują stosowanie EM w estymacji macierzy ruchu. Generalnie zarzucają EM niską dokładność oraz rozkład próbek – Poisson, niekoniecznie dobrze odwzorowujący rzeczywiste zachowanie pakietów danych.

Vardi (autor artykułu [6]) nie jest jednakże jedyną osobą widzącą potencjał w Expectation Maximization. Suyong Eum w swojej rozprawie doktorskiej [1] również przychylnie wypowiedział się na temat EM. Zaznaczył on jednak, iż punkt startowy ma duży wpływ na jakość estymacji. Źle dobrany może spowodować zatrzymanie algorytmu w minimum lokalnym.

Warto zaznaczyć, że sam problem estymacji macierzy ruchu jest niedookreślony. Wiąże się to z faktem, iż na podstawie ograniczeń oraz trzydziestu znanych wartości należy estymować przeszło sto elementów. Pomimo możliwych rozbieżności, EM pokazuje, że można to zrobić z dość dobrą skutecznością.

Reasumując, Expectation Maximization posiada zarówno zwolenników jak i przeciwników. Ponieważ metoda potwierdziła skuteczność w wyżej wymienionym eksperymencie, celem pracy będzie jej implementacja wraz z możliwymi ulepszeniami.

2.4 Opis działania EM

Algorytm jest iteracyjną metodą znajdowania maksymalnego prawdopodobieństwa estymacji (MLE) parametru Q w modelu statystycznym, gdzie model ten zależy od nieobserwowalnych zmiennych.

W EM występują dwa kroki:

1. E – krok szacowania, w którym tworzona jest funkcja estymacji danych

$$Q(Q | Q^m) = \int_{x^{(y)}} \log p(x | Q) p(x | y, Q^m) dx \quad (2)$$

Jest to tzw. Q-funkcja, która szacuje warunkowo x (pełne dane) na podstawie y

2. M – krok maksymalizacji, w którym tak operuje się parametrami, aby wygenerować

$$\hat{Q} \text{ o jak największym prawdopodobieństwie } \hat{Q}_{MLE} = \arg \max_{Q \in \Omega} p(y | Q) \quad (3)$$

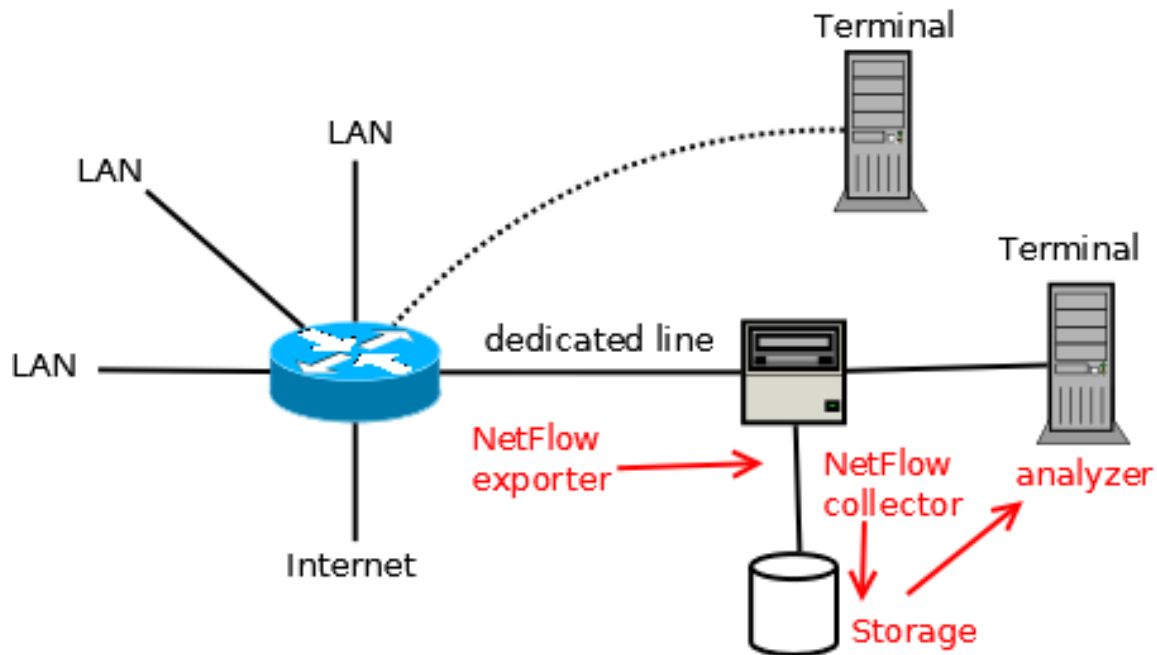
Poniższy przykład obrazuje sposób działania EM.

Założmy, iż znamy temperaturę z całego dnia, to jest $x \in \mathbb{R}^{24}$. Założmy również, że temperatura zależy od sezonu $Q \in \{\text{lato, jesień, zima, wiosna}\}$ oraz znamy sezonową dystrybucję temperatury $p(x|Q)$. Co natomiast, gdybyśmy znali tylko średnią temperaturę z danego dnia $y = \text{avg}X$ i chcieli określić co to za sezon? W takiej sytuacji poszukujemy maksymalnego prawdopodobieństwa estymacji zmiennej Q' takiej, że jej wartość maksymalizuje $p(y|Q')$. W zaistniałej sytuacji można użyć algorytmu EM do rozwiązania problemu. EM najpierw przygotowuje pełne dane x' spełniające wymóg y , a następnie znajduje Q' maksymalizujące $p(x'|Q')$. Oczywiście algorytm będzie działał iteracyjnie, w każdym wykonaniu estymując nowe dane oraz poszukując maksymalizującego Q' . Reasumując, EM stara się znaleźć maksymalne prawdopodobieństwo estymacji (MLE) Q dla danego y .

Choć należy zaznaczyć, iż EM nie gwarantuje znalezienia Q , które maksymalizuje $p(x|Q)$, jednakże algorytm dobrze się sprawdza w tego typu problemach. Czasami warto przeprowadzić próby z wieloma punktami startowymi. Źle dobrany punkt startowy spowoduje zatrzymanie algorytmu w minimum lokalnym. Natomiast dobrze dobrany daje szansę uzyskania zadowalającego wyniku estymacji.

3. Prezentacja rozwiązań technicznych

Rozwiązania techniczne służące do estymacji macierzy ruchu skupiają się generalnie na obserwacji ruchu w sieci i zliczaniu pakietów przemieszczających się ze źródła do celu. Rozwiązania takie zazwyczaj nazywane są rozwiązaniami *online*, gdyż analiza macierzy ruchu jest tutaj dokonywana na bieżąco. Rozwiązaniem typu *online* jest architektura NetFlow stworzona przez firmę Cisco. Rys. 8 prezentuje prosty przykład adaptacji oraz wykorzystania architektury NetFlow w sieci komputerowej.



Rysunek 8 - Architektura NetFlow, źródło wikipedia.com

W architekturze NetFlow wykorzystuje się stałą analizę przesyłanych pakietów. Na zamieszczonym rysunku dane przesyłane są z routera do wydzielonej sieci zajmującej się ich analizą. Zgodnie z założeniami, sieć taka składa się z jednostki odpowiedzialnej za eksport danych do bazy (exporter), jednostki przechowującej dane (collector) oraz jednostki odpowiedzialnej za analizę zebranych danych (analyzer). Zastosowanie oddzielnej sieci obserwującej badaną sieć powoduje jednak pojawienie się problemów podczas etapu projektowania nowoczesnej sieci. Generalnie, problemem okazuje się koszt dodatkowych urządzeń, koszt ich odpowiedniego zaprogramowania w celu wydajnej pracy w danej sieci a także koszt utrzymania takiego systemu. W związku z tym nierzadko projektanci decydują się na tańszą alternatywę – analizę przeprowadzaną na urządzeniu, w tym przypadku węźle, który miałby przysyłać dane do wydzielonej sieci NetFlow. Oczywiście takie rozwiązanie również pociąga za sobą pewne niedogodności: spadek szybkości pracy (spowodowane np. znacznym obciążeniem CPU), zwiększone zapotrzebowanie na energię

jak i lokalne zasoby (np. pamięć). Jeżeli chodzi o dokładności estymacji w architekturze NetFlow to okazuje się, iż pomimo bieżącej analizy mogą pojawić się pewne rozbieżności pomiędzy oryginalną macierzą ruchu a estymowaną. Różnice mogą być spowodowane zastosowaniem próbkowania pakietów, które nie gwarantuje dobrej estymacji macierzy ruchu ze względu na heterogeniczność sieci. Inni badacze również zauważają problemy architektury NetFlow [1].

Oprócz rozwiązań firmy Cisco na rynku znajdują się inne rozwiązania konkurencji:

1. Jflow firmy Juniper Networks [7]
2. NetStream firmy HP [8]
3. NetStream firmy Huawei Technologies [9]
4. Cflowd firmy Alcatel-Lucent [10]
5. Rflow firmy Ericsson [11]

Oczywiście rozwiązania te bazują na tej samej idei, co NetFlow firmy Cisco. Rozwiązania alternatywne oraz opis NetFlow zostały wymienione w artykule [11].

Badania online nie są tematem rozważań tej pracy. W związku z tym zagadnienie to nie będzie poruszany w dalszej części badań. Temat został tutaj przedstawiony tylko jako wstęp do metod online, metod bazujących na innej ideologii i zasadach aniżeli metody offline choć stosowanych w tym samym celu – estymacji macierzy ruchu.

4. Implementacja rozwiązania

4.1 Implementacja standardowa

Implementacja standardowa została oparta na pracach Y. Vardiego [5]. Autor zakłada, iż próbki rozchodzą się w sieci zgodnie z rozkładem Poissona oraz są niezależne. Ponadto, zastosował metodę dwóch momentów: oprócz standardowego równania $Y = A * X$, dodał $B * X = S$, gdzie S to kowariancja.

Przyjęte przez Vardiego wzory:

$$\hat{E}(y_i) = y_i^- = \sum_{l=1}^c a_{il} x_l \quad (4) \quad i = 1, \dots, r \quad r - \text{liczba łączy w sieci}$$

Wzór 4 wylicza macierz łączy Y na podstawie A i x.

oraz

$$\hat{COV}(y_i, y_{i'}) = \sum_{l=1}^c a_{il} a_{i'l} x_l \quad (6) \quad 1 \leq i \leq i' \leq r$$

Wzór 6 wylicza kowariancję dwóch łączy na podstawie wierszy macierzy routingu i macierzy ruchu

Zastosowane przez Vardiego równanie dwóch momentów we wzorze 7:

$$\begin{pmatrix} Y^- \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} x \quad (7)$$

gdzie S opisana jest we wzorze 8:

$$S_{ii'} = \frac{1}{K} \sum_k y_i^{(k)} y_{i'}^{(k)} - y_i^- y_{i'}^- \quad (8)$$

natomiast B to iloczyn komórek w odpowiadających wierszach wyznaczonych przez S. Liczba wierszy wyznaczonych przez S to $r(r + 1)/2$.

Przykład wyznaczania B:

załóżmy, że mamy macierz A:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

oraz S:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} \\ S_{12} \\ S_{13} \\ S_{22} \\ S_{23} \\ S_{33} \end{pmatrix}$$

Dla powyższych danych, B będzie miało postać:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Dodanie dodatkowego równania $S = B * X$ ma poprawić dokładność estymacji, skupiając uwagę na łączach ze sobą związanych (posiadających wspólne przepływy). Należy dodać również, iż problem jest niedookreślony – jako że znamy n próbek, na ich podstawie musimy odtworzyć $t > n$ próbek. Ma nam w tym pomóc zastosowanie kowariancji.

Macierze z sieci Abilene zostały odpowiednio przygotowane oraz wgrane do przestrzeni roboczej, w celu uniknięcia każdorazowego przetwarzania wielu tysięcy próbek. Macierz routingu została przekształcona do postaci zero-jedynkowej. Natomiast macierz ruchu (uśredniona) została utworzona na podstawie czterdziestu tysięcy próbek macierzy ruchu.

Implementacja została wykonana w Matlabie (R2008a), z wykorzystaniem standardowych narzędzi (tzw. toolboxy). Wykorzystana została funkcja *fmincon*. Schemat wywołania funkcji *mfincon*:

```
f=@(lambda)tmeGoal(lambda,S,B,weight);
solution=fmincon(f,zeros(size(avgTMv)),[],[],A,avgY,zeros(size(avgTMv)),max(TMv,[],2));
```

Wyjaśnienie elementów:

1. *solution* – rozwiązanie funkcji, nowa macierz estymowana za pomocą EM.
2. *f* – wywołanie zmiennej przechowującej referencję do funkcji celu. Warto dodać, iż funkcja celu (*tmeGoal*) pobiera z wywołania *fmincon* jeden argument – jest to macierz punktu startowego.
3. *zeros(size(avgTMv))* – macierz wejściowa. Macierz wejściowa jest ważnym punktem w rozważaniach EM. Nad metodami jej generacji były prowadzone badania. Wyniki zostaną przedstawione w dalszej części pracy.
4. *[]* – puste ograniczenie *A*, wraz z piątym elementem stanowią równanie $A*x \leq Y$, gdzie *A* to macierz routingu, *x* to estymowana macierz ruchu, a *B* to macierz łączy.
5. *[]* – puste ograniczenie *Y*.
6. *A* – macierz routingu, wraz z siódmym elementem stanowią równanie $A*x = Y$, gdzie *B* to macierz łączy.
7. *avgY* – uśredniona macierz łączy, stanowi *Y* w równaniu $A*x=Y$ dla elementu szóstego.
8. *zeros(size(avgTMv))* – dolne ograniczenie dla estymowanej macierzy, wartości nie mogą być ujemne.
9. *max(TMv,[],2)* – górne ograniczenie dla estymowanej macierzy, wartości nie mogą być większe aniżeli maksymalna wartość z oryginalnej macierzy.

Funkcja celu:

```
f=@(lambda)tmeGoal(lambda,S,B,weight);
```

Powyższa deklaracja tworzy zmienną *f*, która jest referencją do wywołania funkcji *tmeGoal* – funkcji celu. Dodatkowo zapis *@(lambda)* wyznacza parametr funkcji celu, który ma zostać przekazany w późniejszym wywołaniu *fmincon*. Parametry:

1. *lambda* – punkt startowy algorytmu.
2. *S* – macierz kowariancji.
3. *B* – macierz iloczynu wierszy (tworzona na podstawie macierzy kowariancji).

Należy zaznaczyć, iż ograniczenia pochodzące z metody dwóch momentów zostały oddzielone – główne równanie $Y = A*x$ zostało przeniesione do ograniczeń funkcji *fmincon* (ponieważ dwóch równościowych ograniczeń nie można wprowadzić do *fmincon*), natomiast drugie ograniczenie $S = B*x$ zostało umieszczone w funkcji celu.

Prace nad określeniem postaci funkcji celu trwały dość długo. W początkowej fazie kod był często modyfikowany poprzez włączanie różnych parametrów. Badano możliwości wykorzystania logarytmu (mającego za zadanie odpowiednio pomniejszyć wartości wyników), a także różnicy kwadratowej.

Oto końcowa postać:

```
1. function f=tmeGoal(lambda,leftVector,rightVector,weight)
4. a=(abs(weight.*leftVector-(rightVector*lambda))).^2;
6. f=sum(a(weight>0));
```

Użyte są tu natomiast wagi, które będą opisane w dalszej części. Wykorzystano tu również błąd średniokwadratowy.

4.2 Opis funkcji *fmincon*

Funkcja *fmincon* znajduje minimum nieliniowej, wieloargumentowej funkcji, na którą nałożone są ograniczenia.

Wywołanie funkcji:

```
x = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)
```

Wzór 9 przedstawia ograniczenia nakładane na wywołanie funkcji:

$$\min_x f(x) \text{ ograniczenia } \begin{cases} c(x) \leq o \\ ceq(x) = 0 \\ A \times x \leq b \\ Aeq \times x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (9)$$

Główne elementy z wywołania funkcji *fmincon*:

1. *fun* – funkcja, dla której wykonuje się minimalizację,
2. *x0* – punkt startowy funkcji *fmincon*,
3. *A* i *b* – podstawowe ograniczenia, przedstawione na rysunku 8,
4. *x* – wyniki minimalizacji,
5. *nonlcon* – nieużywane w eksperymentach, ustawiany na [],
6. *options* – umożliwia ustawienie algorytmu używanego przez funkcję.

Funkcja *fmincon* operuje na czterech algorytmach:

1. `trust-region-reflective`
2. `active-set`
3. `interior-point`
4. `sqp`

Podczas badań wykorzystywany był Matlab 2008R, gdzie domyślnym algorytmem funkcji *fmincon* jest `active-set`.

Jak wyżej wspomniano – funkcja *fmincon* używa czterech algorytmów.

Dwa z nich - `interior-point` oraz `trust-region-reflective` to algorytmy *Large-Scale*. Algorytmy typu *Large-Scale* używają do obliczeń algebry liniowej oraz nie operują na pełnych macierzach – mogą je dzielić i właśnie na fragmentach dokonywać obliczeń.

Algorytm `region-reflective` bazuje na koncepcji *trust-regions*. Zakłada ona, że podczas poszukiwania punktu o niższej wartości minimalizowanej funkcji stosuje się uproszczoną funkcję, w stosunku do minimalizowanej, odzwierciedlającą jej zachowanie w tak zwanym *trust-regoin*. Przy użyciu uproszczonej funkcji algorytm poszukuje następnego punktu o obniżonej wartości minimalizowanej funkcji.

Algorytm `interior-point` bazuje na metodzie punktu wewnętrznego. Zakłada ona, iż zamiast poruszać się po wierzchołkach zbioru dopuszczalnych rozwiązań, należy wybrać drogę wewnątrz zbioru, co wyraźnie umożliwi szybkie dotarcie do wierzchołka optymalnego.

Dwa pozostałe - `active-set` oraz `sqp` to algorytmy *Medium-Scale*. Algorytmy typu *Medium-Scale*, podobnie jak algorytmy typu *Large-Scale*, używają do obliczeń algebry liniowej, lecz w przeciwieństwie do *Large-Scale* operują już na pełnych macierzach. Jeżeli problem jest duży, a pełne macierze zajmują dużo pamięci, funkcja *fmincon* może podjąć decyzję o zmianie typu algorytmu.

Algorytm `active-set` oraz `sqp` są bardzo zbliżonymi algorytmami. Bazują na idei, według której duży problem można przekształcić na wyraźnie mniejszy problem, który może być wykorzystany w iteracyjnym procesie znajdowania minimum. Algorytmy różnią się między innymi wykorzystaną algebrą liniową do rozwiązywania kwadratowych pod-problemów. Szczegóły dotyczące zastosowanej algebry dla wspomnianych wyżej algorytmów można znaleźć w artykule [12].

4.3 Miary

W pracy wykorzystywane są cztery główne miary:

1. **Binary difference** – bada, które elementy oryginalnej macierzy mają wartość zerową. Następnie sprawdza, które elementy macierzy estymowanej posiadają wartość zerową. Na koniec porównuje zerowe elementy z macierzy oryginalnej z elementami z macierzy estymowanej. Jeżeli na miejscu oryginalnych elementów zerowych nie ma zer (dla macierzy estymowanej), inkrementuje licznik. Podsumowując – informuje na ilu pozycjach estymowana macierz nie oszacowała dobrze wartości zerowych. Wzór 10 poniżej:

$$BinaryDifference = \sum_i |S_i^{\wedge} - S_i| \quad (10) \quad \text{gdzie:}$$

- a. i - liczba elementów o wartości zerowej w oryginalnej macierzy
 - b. S_i - element zerowy oryginalnej macierzy
 - c. S_i^{\wedge} - element o odpowiadającym indeksie, ale pochodzący z estymowanej macierzy
 - d. $|S_i^{\wedge} - S_i|$ - wartość zaokrąglana do jedynki, jeżeli tylko większa od zera
2. **Value difference** – podlicza różnicę w wartościach dla macierzy oryginalnej oraz estymowanej. Wzór 11 poniżej:

$$ValueDifference = \sum_i |S_i^{\wedge} - S_i| \quad (11) \quad \text{gdzie:}$$

- a. i - liczba wszystkich elementów w macierzy ruchu
- b. S_i - element oryginalnej macierzy
- c. S_i^{\wedge} - element o odpowiadającym indeksie, ale pochodzący z estymowanej macierzy

3. **Percentage difference** – określa procentową różnicę (na podstawie sumarycznej wartości) pomiędzy oryginalną a estymowaną macierzą. Wzór 12 poniżej:

$$PercentageDifference = \frac{1}{i} \sum_i |\hat{S}_i - S_i| \quad (12) \quad \text{gdzie:}$$

- i - liczba elementów o wartości zerowej w oryginalnej macierzy
- S_i - element oryginalnej macierzy
- \hat{S}_i - element o odpowiadającym indeksie, ale pochodzący z estymowanej macierzy

4. **MRE – Mean Relative Error**

Poniżej wzór 13 :

$$MRE = \frac{1}{N_T} \sum_{i: S_i > S_T} \left| \frac{\hat{S}_i - S_i}{S_i} \right| \quad (13)$$

gdzie:

- N_T - liczba przepływów, które stanowią 90% przepływu danych
- T - próg stanowiący 90% przepływu danych
- S_i - oryginalna macierz ruchu
- \hat{S}_i - estymowana macierz ruchu

Miara MRE została przedstawiona w artykule [5]. Jest dość często stosowana w ocenianiu jakości estymacji macierzy ruchu.

4.4 Ulepszenia

W pracy zaimplementowano następujące ulepszenia:

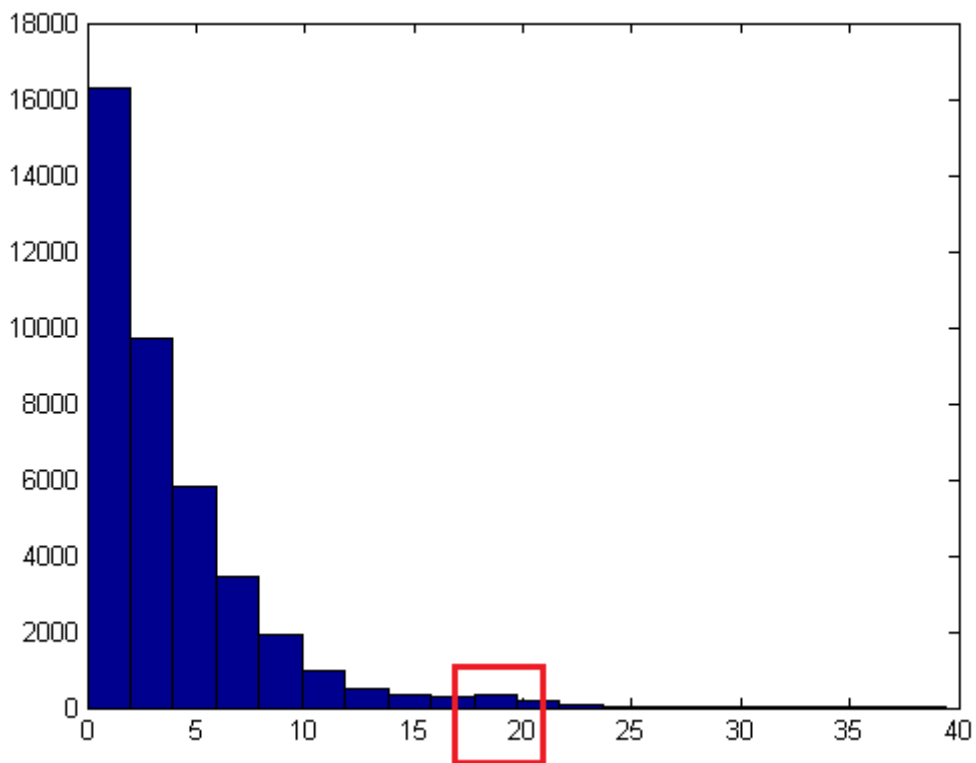
1. Eliminacja niegaussowskich próbek

Podczas badań nad danymi pochodzącymi z sieci Sndlib odkryto, iż często występują niegaussowskie próbki – leżące na ogonach rozkładu próbek. Poniższy kod jest odpowiedzialny za filtrację i eliminację tychże próbek:

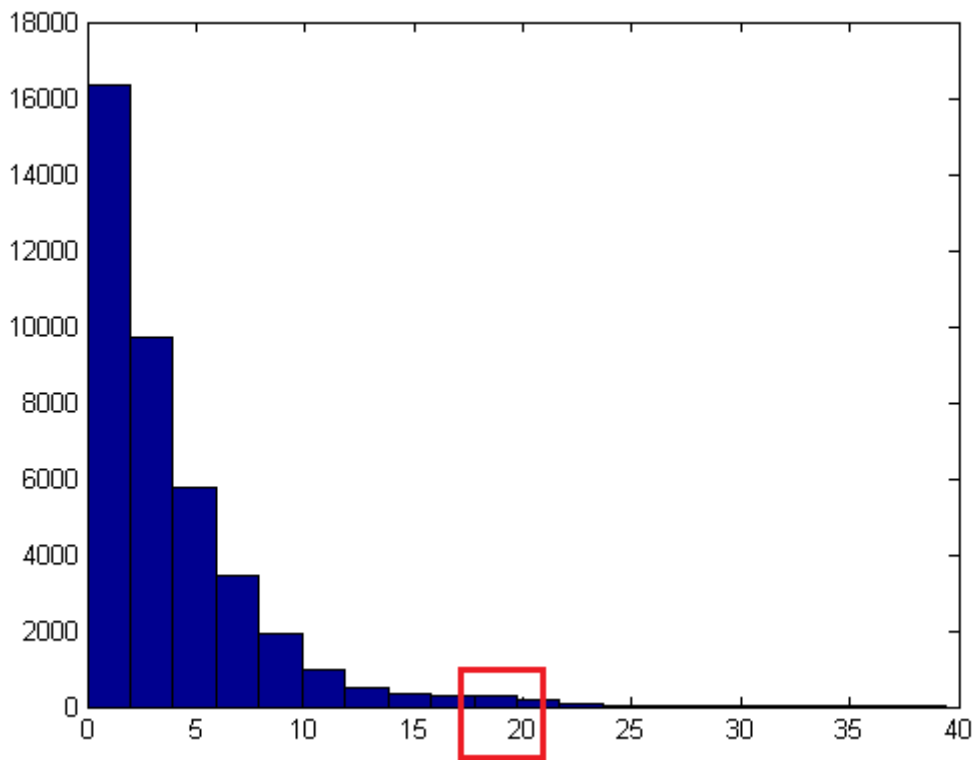
```
% eliminate not-gaussian probes
if eliminateNonGaussian
% eliminate samples lying outside six-sigma interval
burstIdx=[];
for i=1:nodeCount^2 % collect outliers flow by flow
[a,b]=normfit(TMv(i,:));
if(b<0.01), % leave constant flows
continue;
end;
burstIdx=union(...
burstIdx,find(TMv(i,*)>(a+eliminateNonGaussianNsigma*b)));
end;
for n=1:length(burstIdx)
TMv(burstIdx(n)) = 0;
end
end;
```

Eliminacja próbek jest zależna od parametru `eliminateNonGaussianNsigma`, który określa jak dalekie próbki algorytm ma usuwać. Algorytm pobiera wartości rozkładu normalnego dla danego przepływu. Następnie, jeśli odchylenie (wariancja) przekracza 0.01, następuje odczyt próbek, które należy usunąć (wykorzystując parametr `eliminateNonGaussianNsigma`). Dla znalezionych próbek odpowiednie wpisy w macierzy ruchu *TMv* są ustawiane na zero.

Na kolejnej stronie znajduje się przykład poprawy próbek. Rys. 9 to histogram dla połączenia nr 19, rys. 10 również histogram dla połączenia nr 19, lecz już po eliminacji niegaussowskich próbek. Widać na nim poprawę w stosunku do oryginału. Poprawa ta oznaczona jest czerwonym kwadratem.



Rysunek 9 Przed eliminacją nie-gaussowskich próbek



Rysunek 10 Po eliminacji nie-gaussowskich próbek

2. Eliminacja fałszywych korelacji

Fałszywe korelacje zachodzą w dwóch sytuacjach:

a. $S_{ii} < 0$ ale $\sum_l a_{il} a_{i'l} > 0$ (14)

Wzór 14 opisuje sytuację, gdy kowariancja jest ujemna, natomiast z macierzy routingu wynika, iż łącza posiadają pewną korelację

b. $S_{ii} \neq 0$ ale $\sum_l a_{il} a_{i'l} \equiv 0$ (15)

Wzór 15 opisuje sytuację, gdy kowariancja jest niezerowa, pomimo braku jakiegokolwiek korelacji pomiędzy dwoma łączami.

Poniżej znajduje się kod odpowiedzialny za eliminację fałszywych korelacji:

```
% detect infeasible equations
% all cov eq are equally important initially
weight=ones(length(S),1);
if ignoreInfeasibleEq
    infeasibleEqIdx=find((S<0).*(B*ones(nodeCount^2,1))>0);
    % find link pairs w/negative cov, while it should be positive
    if ~isempty(infeasibleEqIdx)
        weight(infeasibleEqIdx)=0;
    end
end;
% detect false identities
if ignoreFalseIdentity
    falseIdIdx=find((S~=0).*(B*ones(nodeCount^2,1))==0);
    % find pairs w/nonzero cov, which are not related by any flow
    if ~isempty(falseIdIdx)
        weight(falseIdIdx)=0;
    end
end;
eqsRemoved=union(infeasibleEqIdx, falseIdIdx);
weight(eqsRemoved)=[];
S(eqsRemoved)=[];
B(eqsRemoved,:)=[];
```

Pierwsza grupa równań (kowariancja poniżej zera) nazywana jest *infeasible equations*, druga natomiast (kowariancja niezerowa) *false identities*.

Opis przetwarzania wyżej przedstawionego kodu:

Na początku przetwarzania ustawiane są wagi – dla każdej komórki z macierzy kowariancji odpowiadająca waga ma wartość zero. Następnie sprawdzane są *infeasible equations* – czy występują kowariancje poniżej zera oraz czy mimo to łącza posiadają korelację. Jeżeli tak, to wagi dla tych kowariancji są zerowane. W następnym kroku sprawdzane są *false identities* - czy występują kowariancje niezerowe dla łączy, które nie mają żadnej korelacji. Jeżeli tak, to wagi dla tychże

kowariancji są zerowane. Na końcu zerowane są kowariancje i korelacje dla elementów zarówno z kowariancją poniżej zera, jak i z kowariancją niezerową.

3. Wagi

Wagi zostały wprowadzone ze względu na dodatkową eliminację niepoprawnych kowariancji w funkcji celu.

Poniższy kod pokazuje wykorzystanie wag:

```
weight=ones(length(S),1);  
...  
weight(eqsRemoved)=[];  
...  
f=@(lambda)tmeGoal(lambda,S,B,weight);
```

Powyższy kod najpierw przygotowuje wagi – dla każdej kowariancji (oznaczonej jako *S*) ustawia wartość 1. Następnie, po znalezieniu fałszywych kowariancji, zeruje wagi dla wybranych kowariancji (oznaczonych jako *eqsRemoved*). Następnie wagi są przekazywane do funkcji celu, aby odpowiednio wybierać dopuszczalne elementy.

4. Różne punkty startowe

Ponieważ punkt startowy jest w EM bardzo ważny (źle dobrany może spowodować zatrzymanie się algorytmu w lokalnym minimum), do badań były używane cztery punkty startowe:

- a. macierz avgTMv otrzymana wprost z sieci Sndlib,
- b. macierz avgTMv otrzymana wprost z sieci Sndlib, z dodatkowym szumem różnej mocy
- c. zerowa macierz
- d. macierz wygenerowana za pomocą Gravity Model (algorytm ten zostanie opisany w następnym podrozdziale)

Dwie pierwsze macierze pochodzą bezpośrednio z sieci Abilene, trzecia to macierz wypełniona zerami. Natomiast ostatnia to macierz wygenerowana za pomocą Gravity Model, modelu dość nowoczesnego i powszechnie stosowanego w tego typu rozwiązaniach. W kolejnym podrozdziale przedstawię podstawy Gravity Model oraz próbną macierz stworzoną za pomocą Gravity Model.

4.5 Gravity model

Gravity model często jest wykorzystywany do estymacji przepływów w różnego rodzaju sieciach. Opiera się na prostym założeniu, iż ilość danych wysyłanych z węzła A do węzła B jest wprost proporcjonalna do procentowego ruchu przesyłanego z A (stosunek ruchu przesyłanego z A do całego ruchu) oraz do procentowego ruchu przesyłanego do B (stosunek ruchu przesyłanego do B do całego ruchu).

Podstawa teoretyczna:

$t(s, d)$ - ilość danych transmitowana z s do d

$t(s)$ - ilość wszystkich danych przetransmitowana z s

$t(d)$ - ilość wszystkich danych przetransmitowana do d .

T – całkowity przetransmitowany ruch

$$t(s, d) = t(s, d) / T, t(s) = t(s) / T, t(d) = x(d) / T$$

Gravity model zakłada, że:

$$t(s, d) = \frac{1}{T} \times t(s) \times t(d),$$

co sprowadza się do:

$$p(s, d) = p(s)p(d)$$

Tabela A1 w dodatku A zawiera wygenerowaną macierz Gravity Model oraz macierz oryginalną. Z analizy otrzymanych estymat Gravity Model wynika, iż wygenerowane dane nie są dokładne – aż o 170% wzrosła sumaryczna wartość macierzy ruchu. Połączenia zerowe zostały jednakże dobrze wyestymowane. W dalszej części pracy zostaną przedstawione wyniki estymacji macierzy ruchu z wykorzystaniem Gravity Model.

5. Wyniki standardowej implementacji wraz z ulepszeniami

5.1 Interpretacja wyników

W tym rozdziale przedstawię wyniki dla implementacji wraz z wprowadzonymi ulepszeniami. Eksperymenty były przeprowadzone dla czterech macierzy wejściowych. Wykorzystano standardową funkcję *fmincon* wraz z algorytmem *active-set* (opisanym w rozdziale 4.2).

Wynik implementacji standardowej znajdują się w tabeli 3:

Tabela 3 Wyniki standardowej implementacji

	Binary difference	Value difference	Percentage difference	MRE
Oryginalna macierz	8	299	10.5%	0.6
Oryginalna macierz wraz z szumem +40%	12	493	15%	1.60
Macierz zerowa	3	1.82e+003	65%	1.8
Macierz gravity model	12	2.93e+003	102%	3.32

Interpretacja:

Eksperyment wyraźnie wyłonił macierz, która gwarantuje estymację na najwyższym poziomie – jest to oryginalna macierz. Błąd na poziomie 10% jest zbliżony do błędy uzyskanego przez Y. Vardiego – 7.5% [5]. Dodatkowo MRE jest na poziomie uzyskanym przez A. Gunnara [4]. Z obserwacji estymowanej macierzy wynika, iż algorytm bardzo źle estymuje elementy o niewielkiej wartości < 5 . Często elementy takie są estymowane na poziomie zera. Dodanie szumu spowodowało pogorszenie się jakości estymacji na akceptowalnym poziomie.

Algorytm zaczynający pracę z macierzy zerowej wykazał się ogólnie słabą estymacją. Ponownie niewielkie wartości przepływów w macierzy oryginalnej zostały oszacowane na poziomie zera. Wiele przepływów posiadało niemalże podwojone wartości. Wydaje się, że algorytm zatrzymał się w lokalnym minimum (jest to dość częste dla EM, gdy źle jest dobrany punkt startowy).

Estymacja macierzy ruchu, wykorzystująca jako punkt początkowy Gravity Model, zakończyła się z bardzo słabymi wynikami. Algorytm estymował przepływy z dwukrotnie większą wartością. Poziom błąd był nie do zaakceptowania.

5.2 Niepoissonowski rozkład próbek

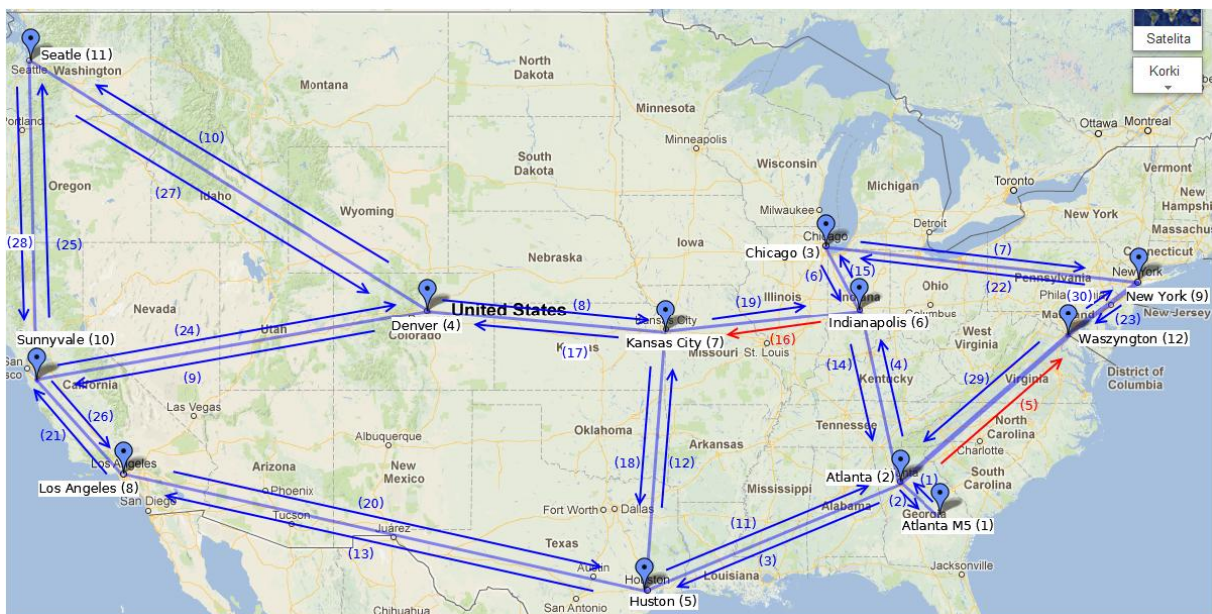
Na pytanie skąd właściwie tak duże błędy dla macierzy zerowej i Gravity Model, można postawić prostą odpowiedź – niepoissonowski rozkład próbek i ich zależność. Jako że Y. Vardi zakładał rozchodzenie się próbek zgodnie z rozkładem Poissona oraz ich niezależność, co do danych z sieci Abilene takiej pewności nie mamy. Jak wykazały poniższe badania, w sieci Abilene znajduje się sporo par łączy, które wykazują się dużą kowariancją, a nie mają żadnych wspólnych połączeń.

Wyniki badań:

1. Liczba par, które nie mają wspólnych przepływów wynosi 333
2. Liczba par, które wykazują dużą kowariancję (powyżej 1000 jednostek) wynosi 172.

Tabela A2 w dodatku A zawiera listę par łączy o dużej kowariancji i braku wspólnych połączeń.

W tabeli A2 znajdują się również łączy, których kowariancja wynosi niemalże 10000 jednostek, a nie mają one żadnego wspólnego przepływu. Przykładem takiej pary, o kowariancji poprzednio wspomnianej, jest para łączy 5 i 16.

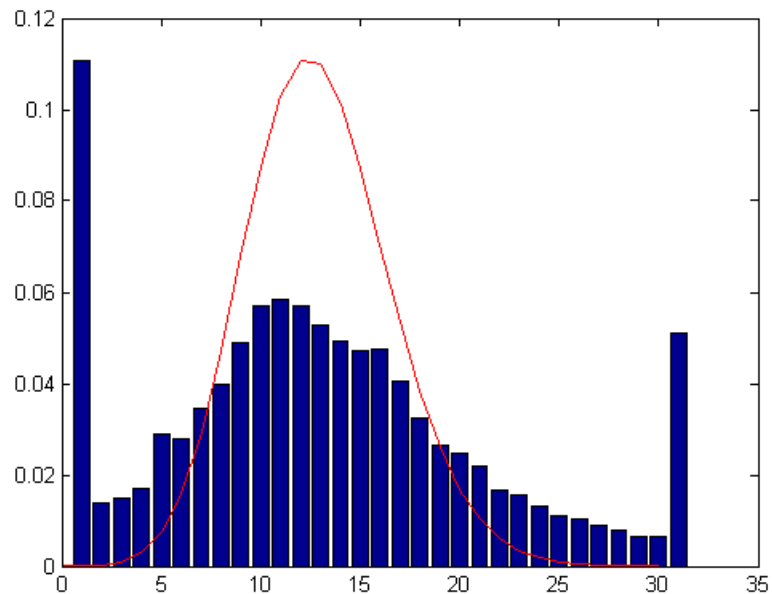


Rysunek 11 łączy posiadające dużą kowariancję lecz brak wspólnych przepływów

Na rysunku 11 na czerwono zaznaczono oba łączy. Oczywiście macierz routingu potwierdza brak połączeń na tych dwóch łączych.

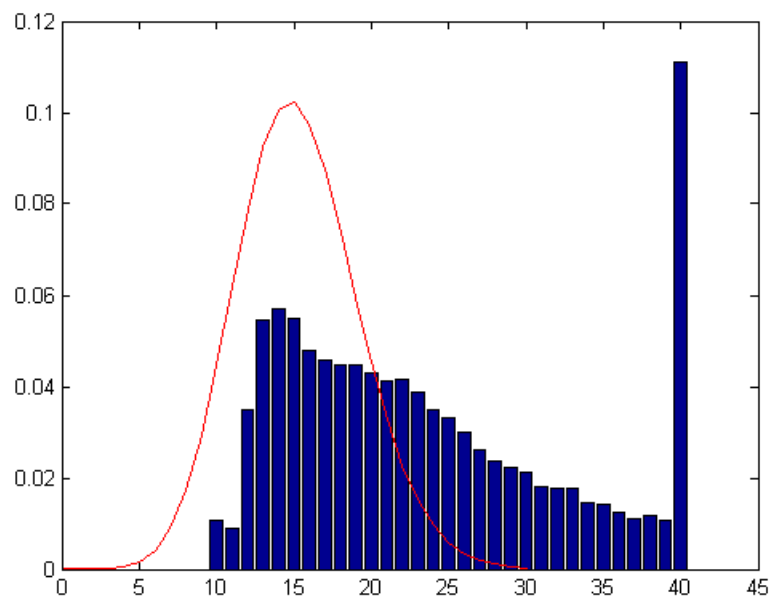
Gdyby próbki rozchodziły się zgodnie z rozkładem Poissona, kowariancja powinna być możliwie najmniejsza.

Poniżej przedstawione zostały rozkłady wybranych połączeń.



Rysunek 12 Rozkład niemalże Poissonowski

Rysunek 12 przedstawia niemalże Poissonowski rozkład połączenia. Byłby on Poissonowski, gdyby nie zmiany na brzegach - wyróżniające się słupki.



Rysunek 13 Rozkład niepoissonowski

Rysunek 13 przedstawia niepoissonowski rozkład.

W dalszej części pracy przedstawione zostanie rozwiązanie użyte do zapewnienia odpowiedniego rozkładu oraz wyniki badań przeprowadzonych na poprawionych danych.

5.3 Wybór algorytmu *active-set* funkcji *fmincon*

Funkcja *fmincon* udostępnia cztery algorytmy minimalizacji – *active-set*, *sqp*, *interior-point* i *trust-reflective-method*. W poniższej analizie zostały one wykorzystane do estymacji tej samej macierzy ruchu. Analiza będzie odnosiła się do ostatecznej wersji algorytmu oraz punktu startowego stworzonego za pomocą Gravity Model.

W tabelce 4 oraz 5 znajdują się wyniki dla *active-set* oraz *interior-point*. Pod tabelami znajdują się opisy wyników algorytmów *trust-reflective-method* oraz *sqp*.

Tabela 4 – wyniki estymacji funkcją *fmincon* i algorytmem *active-set*

	Gravity Model	Zero matrix	Oryginalna macierz	Oryginalna macierz + szum 40%
MRE	0.0329	0.3995	0.0329	0.0329
binaryDifference	10	10	9	10
valueDifference	960.0451	9.3790e+003	960.0523	960.0574
percentageDifference	0.0363	0.3661	0.0363	0.0363

Algorytm *active-set* uzyskał bardzo dobre wyniki. Zastosowanie Gravity Model jako punktu startowego nie spowodowało pogorszenia jakości estymacji macierzy ruchu. Start z macierzy zerowej nadal powoduje bardzo duży spadek jakości estymacji.

Tabela 5 – wyniki estymacji funkcją *fmincon* i algorytmem *interior-point*

	Gravity Model	Zero matrix	Oryginalna macierz	Oryginalna macierz + szum 40%
MRE	0.2965	0.9899	0.0328	0.1602
binaryDifference	0	0	0	0
valueDifference	8.4681e+003	2.5267e+004	952.8105	3.8108e+003
percentageDifference	0.3305	0.9864	0.0362	0.1482

Algorytm *interior-point* dla oryginalnej macierzy uzyskał bardzo dobre wyniki. Należy jednak pamiętać, iż oryginalna macierz nigdy nie będzie mogła zostać użyta w rzeczywistych rozwiązaniach – macierz ta nie będzie dostępna. W przypadku wprowadzenia szumu bądź zastosowania Gravity Model, jakość estymacji znacząco się pogarsza. Zastosowanie macierzy zerowej powoduje niemalże 100% pogorszenie jakości estymacji. Jest to nie do przyjęcia.

Jak się okazało, algorytm *trust-regio-reflective* nie mógł zostać zastosowany w rozwiązaniu danego problemu, co potwierdza poniższy komunikat:

Running optimization:

Warning: Trust-region-reflective method does not currently solve this type of problem, using active-set (line search) instead.

Funkcja *fmincon* automatycznie zastosowała algorytm *active-set*. Wyniki badań z algorytmem *trust-region-reflective* były identyczne dla badań z algorytmem *active-set*.

Algorytm *sqp* nie działa dla funkcji *fmincon*, co potwierdza poniższy komunikat:

Running optimization:

??? Error using ==> optimset>checkfield at 318

Invalid value for OPTIONS parameter Algorithm:

must be 'active-set', 'trust-region-reflective', or 'interior-point'.

Error in ==> optimset at 248

checkfield(Names{j,:},arg,optimtbx);

Error in ==> tmeMain at 179

options=optimset('Algorithm','sqp');

Powodem, dla którego algorytm *sqp* nie mógł zostać użyty, jest brak wsparcia algorytmu *sqp* w wykorzystanym do badań Matlabie 2008R.

Podsumowanie:

Najlepsze wyniki uzyskał algorytm *active-set*. Ponieważ z oczywistych względów nie można użyć macierzy oryginalnej w pracy (również macierz oryginalna wraz z szumem nie może zostać użyta), macierzą startową została macierz Gravity Model. Użycie tej macierzy daje bardzo dobrą estymację z błędem na poziomie 3.6%.

6. Poprawa rozkładu próbek

Ponieważ rozkład próbek był niezgodny z założeniami (rozkład Poissona oraz niezależność próbek), podjęto decyzję poprawy rozkładu. W tym celu sztucznie wygenerowano próbki zgodne z rozkładem Poissona korzystając z generatora Knutha. Poniżej kod generatora:

```
function k = tmePoisson(lambda)
% Generate Poisson sample. Use for lambda up to 500.
% Input: lambda - mean value
% Output: number of events observed (discrete)

L=exp(-lambda);
k=-1;
p=1;

while true
    k=k+1;
    p=p*rand();
    if(p<=L)
        return;
    end
end
```

Oto idea generatora losowych próbek Poissona. Czas pomiędzy próbkami w procesie Poissona ma wykładniczy rozkład. Ten czas jest wyznaczony przez zmienną L , która obliczana jest za pomocą funkcji wykładniczej bazującej na przekazanym parametrze $lambda$. Parametr ten jest uśrednieniem oryginalnej próbki z sieci Abilene. W pętli zlicza się liczbę próbek aż losowo wygenerowana próbka p będzie większa od zmiennej czasu L .

Dla tak wygenerowanych próbek liczba par nieposiadających wspólnych połączeń oraz niewielką kowariancję wynosi 333, nie ma natomiast wcale par o dużej kowariancji (powyżej 1000 jednostek). Znalezione niezerowe kowariancje są jednak niewielkie (do 10 jednostek). Kowariancje o takiej wartości są już akceptowalne.

Tabela 6 – wyniki estymacji macierzy ruchu dla nowo-wygenerowanego ruchu

	Binary difference	Value difference	Percentage difference	MRE
Oryginalna macierz	9	960.05	3.6%	0.03
Oryginalna macierz wraz z szumem + 40%	10	960.06	3.6%	0.03
Macierz zerowa	10	9.3790e+003	36%	0.40
Macierz Gravity Model	10	960.05	3.6%	0.03

Tabela 6 prezentuje wyniki estymacji dla ruchu zgodnego z założeniami Poissona. Zastosowanie macierzy Gravity Model daje bardzo dobre rezultaty – wprost tak dobre jak start z macierzy oryginalnej. Start z macierzy zerowej daje jednakże bardzo słabe wyniki. W związku z powyższym, to właśnie Gravity Model był w pracy używany.

7. Eliminacja łączy

7.1 Sposób eliminacji łączy

W ramach pracy, oprócz implementacji algorytmu estymującego macierze ruchu (wraz z badaniami potwierdzającymi jego skuteczność), zostały wykonane badania mające na celu eliminację łączy w macierzy węzłów. Przez eliminację łączy rozumiane jest tutaj wyłączenie ich z estymacji macierzy ruchu - algorytm nie posiada dla tych łączy żadnych danych w postaci kowariancji, korelacji oraz ograniczeń na dane łącze.

Prace te prowadzone były w celu określenia, które węzły mogą być wyłączone podczas estymowania macierzy ruchu, a zarazem nie wpłyną na pogorszenie estymacji. Dzięki zdobytej wiedzy będzie można skupić się na estymacji węzłów najważniejszych w sieci, mających największy wpływ na jej działanie.

Łącza były wyłączane na podstawie trzech kryteriów:

1. Wolumen przesyłanych danych
2. Jakość estymacji
3. Liczba przepływów przypadających na węzeł

Kryteria te wydają się być najbardziej znaczącymi podczas określania wykorzystania łączy w sieci. Łącza były wyłączane w następujący sposób:

1. Najmniejszy element
2. Dwa najmniejsze elementy
3. Trzy najmniejsze elementy
4. Największy element
5. Dwa największe elementy
6. Trzy największe elementy

Oznaczenia najmniejszy i największy są tu umowne. Będą one rozumiane w następujący sposób (w zależności od wybranego kryterium):

1. Wolumen przesyłanych danych:
 - a. Najmniejszy element – o najmniejszej wartości wolumenu danych
 - b. Największy element – o największej wartości wolumenu danych
2. Jakość estymacji:
 - a. Najmniejszy element – o najgorszej jakości estymacji
 - b. Największy element – o najlepszej jakości estymacji
3. Liczba przepływów przypadających na węzeł:
 - a. Najmniejszy element – o najmniejszej liczbie przepływów
 - b. Największy element – o największej liczbie przepływów

7.2 Wyniki oraz podstawowa analiza

W poniższych wynikach zostało wykorzystane skrócone oznaczenie:

1. B diff – Binary difference
2. V diff – Value difference
3. P diff – Percentage difference

Analiza poniższych tabel znajduje się w sekcjach rozpatrujących każde kryterium.

Tabela 7 Wyniki estymacji przy wyłączeniu pojedynczych elementów

Nr elementu	1	2	3	4	5	6	7	8
MRE	0,034299	0,033026	0,03739	0,038989	0,05304	0,043976	0,051222	0,037822
B diff	9	10	10	10	8	10	10	9
V diff	1009,983	999,6851	1016,322	1048,664	1468,76	1242,379	1320	1084,59
P diff	0,038336	0,037764	0,038458	0,039735	0,056281	0,047339	0,050401	0,041246
i	9	10	11	12	13	14	15	16
MRE	0,038384	0,030923	0,038412	0,034477	0,033811	0,03794	0,044546	0,038958
B diff	10	10	9	10	9	10	9	10
V diff	1028,931	1030,392	987,9449	994,5135	1058,609	1022,84	1511,545	1014,935
P diff	0,039083	0,039138	0,037345	0,037602	0,040039	0,03861	0,057669	0,038449
i	17	18	19	20	21	22	23	24
MRE	0,036608	0,030988	0,037482	0,043004	0,038842	0,046015	0,053055	0,033278
B diff	10	10	9	10	10	9	10	10
V diff	993,8328	955,2984	999,7735	1219,432	1015,003	1406,501	1808,737	967,6182
P diff	0,037704	0,036094	0,037698	0,046407	0,038194	0,053709	0,069459	0,036442
i	25	26	27	28	29	30		
MRE	0,043889	0,038883	0,044289	0,035236	0,05147	0,049878		
B diff	9	10	10	10	11	10		
V diff	1221,659	1104,738	1170,566	1005,175	1777,515	1701,211		
P diff	0,046504	0,041907	0,044721	0,038016	0,068203	0,065336		

Tabela 8 Wyniki wyłączenia łączy pod względem wolumenu danych

Nr elementu	1	1+2	1+2+12	6	6+15	6+15+16
MRE	0,034299	0,034322	0,035907	0,043976	0,078214	0,106141
B diff	9	9	9	10	9	9
V diff	1009,983	1031,315	1053,14	1242,379	2280,761	2875,731
P diff	0,038336	0,039263	0,039917	0,047339	0,087834	0,111153

Tabela 9 Wyniki wyłączenia łączy pod względem błędu estymacji

Nr elementu	18	18+28	18+28+20	4	4+17	4+17+9
MRE	0,030988	0,039416	0,052083	0,038989	0,050673	0,06171
B diff	10	10	9	10	9	10
V diff	955,2984	1119,805	1452,843	1048,664	1342,701	1414,817
P diff	0,036094	0,042519	0,055657	0,039735	0,051392	0,054175

Tabela 10 Wyniki wyłączenia łączy pod względem liczby przepływów

Nr elementu	26	26+12	26+12+3	19	19+16	19+16+17
MRE	0,038883	0,050928	0,059277	0,0374	0,05124	0,06079
B diff	10	10	10	9	10	9
V diff	1104,738	1356,419	1570,441	999,7735	1249,796	1554,657
P diff	0,041907	0,051728	0,059983	0,037698	0,04729	0,05973

Wyniki zostały uzyskane dla macierzy wejściowej (przekazanej na starcie algorytmu) Gravity Model. Gravity Model został wybrany jako punkt startowy, gdyż uzyskał lepsze wyniki estymacji w stosunku do zerowej macierzy startu. Nie została wybrana macierz wejściowa sieci Abilene (oraz jej pochodna macierz wraz z szumem), gdyż w rzeczywistych warunkach algorytm nie będzie wiedział, jak wygląda oryginalna macierz ruchu.

Próbki były niezależne oraz ich rozkład był zgodny z rozkładem Poissona.

Analiza wyników:

Wyłączenie pojedynczych elementów:

Tabela 11 Wybrane elementy powodujące największy spadek jakości estymacji

	Otrzymany błąd procentowy	Błąd estymacji	Liczba przepływów	Ilość danych
5.	0.056	0.088	7	1617.23
15.	0.057	0.001	20	5204.67
22.	0.053	0.002	13	4558.67
23.	0.069	0.016	10	2711.53
29.	0.068	0.088	7	2722.96
30.	0.065	0.016	10	1235.96

Z tabeli 7 zostały pobrane wybrane elementy. Tabela 11 składa się właśnie z sześciu łączy, które spowodowały największy spadek jakości estymacji. Średnia wartość elementów w macierzy $avgY$ to 2249,80. Jak można zauważyć, cztery na sześć prezentowanych łączy posiada wartość powyżej średniej. Niestety duża ilość transferowanych danych nie jest gwarantem dużego spadku – łącze 29 posiada niewielką ilość danych, a zarazem spory

spadek jakości estymacji, wyraźnie wyższy niż łącze 6, które jest łączem o największej ilości transferowanych danych (5650.15 MB).

Wyłączanie ze względu na wolumen danych:

Analiza oparta o tabelę 8. Wyłączanie łączy o niewielkim wolumenie danych nie wpływa znacząco na pogorszenie estymaty. Oczywiście elementy posiadające duży wolumen danych powodują znaczący spadek dokładności estymaty, choć nie jest to regułą, co zostanie pokazane w dalszej części. Przykładem łącza posiadającego bardzo duży wolumen, a nie powodującego dużego pogorszenia się spadku jakości estymacji, jest łącze szóste. Wyłączanie kilku łączy o dużym przepływie wydaje się już być dobrym gwarantem spadku jakości.

Wyłączenie ze względu na błąd estymacji:

Analiza oparta o tabelę 9. Nie wpływa znacząco na pogorszenie jakości estymacji. Utrzymuje się ona na akceptowalnym poziomie, do 5.5%. Wyłączenie elementów zarówno o dobrej jak i złej estymacji powoduje estymację na tym samym poziomie.

Wyłączenie ze względu na liczbę przepływów:

Analiza oparta o tabelę 10. Wyłączanie elementów o dużej liczbie przepływów pogarsza jakość estymacji, jednakże duża liczba przepływów na danym łączu nie jest gwarantem dużego spadku. Dobrze widoczny spadek występuje podczas eliminacji większej liczby łączy o dużej liczbie przepływów.

Tabela 12 Wyniki wyłączenia czterech łączy o największej liczbie przepływów

	łącze 19	łącze 19 i 16	łącze 19, 16 i 17	łącze 19, 16, 17 i 18
MRE	0,03748	0,05124	0,06079	0,11672
B diff	9	10	9	6
V diff	999,7735	1249,7969	1554,6579	2462,8788
B diff	0,03769	0,04729	0,05973	0,09502

Z tabeli 12 można wnioskować, iż wyłączanie łączy o największym przepływie gwarantuje powolny, lecz stabilny wzrost błędu estymacji. Jednakże zastanawiający jest błąd, który wydawać by się mogło powinien być większy. Łącza nie charakteryzowały się jednakże dużym wolumenem danych, co może tłumaczyć dość mały, jak na czteroelementowy zbiór, błąd estymacji.

Reasumując:

Wyłączanie łączy na podstawie wolumenu danych może być mylące. W dalszej pracy zostanie przedstawione podejście bazujące na analizie eliminacji łączy pojedynczych.

7.3 Analiza bazująca na eliminacji pojedynczych łączy

W analizie tej podstawowym kryterium eliminacji łączy jest wynik eliminacji pojedynczych łączy. Tabela 13 prezentuje wyniki wyłączenia pojedynczych elementów.

Tabela 13 Wyniki wyłączenia pojedynczych elementów wraz z zaznaczonymi łączy powodującymi największy spadek jakości estymacji

i	1	2	3	4	5	6	7	8
MRE	0,034299	0,033026	0,03739	0,038989	0,05304	0,043976	0,051222	0,037822
B diff	9	10	10	10	8	10	10	9
V diff	1009,983	999,6851	1016,322	1048,664	1468,76	1242,379	1320	1084,59
P diff	0,038336	0,037764	0,038458	0,039735	0,056281	0,047339	0,050401	0,041246
i	9	10	11	12	13	14	15	16
MRE	0,038384	0,030923	0,038412	0,034477	0,033811	0,03794	0,044546	0,038958
B diff	10	10	9	10	9	10	9	10
V diff	1028,931	1030,392	987,9449	994,5135	1058,609	1022,84	1511,545	1014,935
P diff	0,039083	0,039138	0,037345	0,037602	0,040039	0,03861	0,057669	0,038449
i	17	18	19	20	21	22	23	24
MRE	0,036608	0,030988	0,037482	0,043004	0,038842	0,046015	0,053055	0,033278
B diff	10	10	9	10	10	9	10	10
V diff	993,8328	955,2984	999,7735	1219,432	1015,003	1406,501	1808,737	967,6182
P diff	0,037704	0,036094	0,037698	0,046407	0,038194	0,053709	0,069459	0,036442
i	25	26	27	28	29	30		
MRE	0,043889	0,038883	0,044289	0,035236	0,05147	0,049878		
B diff	9	10	10	10	11	10		
V diff	1221,659	1104,738	1170,566	1005,175	1777,515	1701,211		
P diff	0,046504	0,041907	0,044721	0,038016	0,068203	0,065336		

Na czerwono zaznaczono łączy o największym spadku jakości estymacji.

Jak już wcześniej wspomniano, wyłączenie łączy o największym wolumenie nie gwarantuje dużego spadku jakości estymacji. Przykład to łączy nr 6, które posiada największy wolumen danych - 5650.15 MB, a spadek jakości estymacji po wyłączeniu tegoż łączy to 4.8%. Jest to wynik powyżej błędu dla Gravity Model, ale poniżej najlepszych (powodujących największy spadek). Wyraźnie poniżej łączy nr 29, którego wolumen danych wynosi 2722.96 MB.

Tabela 14 łączy powodujące największy spadek jakości estymacji

Nr łączy	Wolumen danych [MB]	Ilość przepływów na łączy	Błąd estymacji [%]	Błąd estymacji [%] po wyłączeniu łączy
5.	1617.23	7	8.8	5.6
15.	5204.67	20	0.1	5.7
22.	4558.67	13	0.2	5.4
23.	2711.53	10	1.6	6.9
29.	2722.96	7	8.8	6.8
30.	3235.96	10	1.6	6.5

Tabela 16 Wyniki estymacji z wyłączonymi elementami powodującymi najmniejszy spadek jakości estymacji

	łącze 15.	łącze 15. i 5.	łącze 15., 5. i 22.
MRE	0,0445	0,0671	0,1078
B diff	9	10	10
V diff	1511,54	2236,39	3354,60
P diff	0,0576	0,0861	0,1298

Tabela 16 przedstawia wyniki wyłączenia łączy. Zgodnie z przypuszczeniami wyłączenie elementów powodujących najmniejszy spadek (trzech łączy wśród sześciu wybranych) spowodowało zwiększenie błędu jakości estymacji. Jednakże spadek ten jest wyraźnie mniejszy aniżeli spadek dla trzech największych elementów.

Reasumując - wyłączanie łączy o największych spadkach jakości estymacji spowodowało gorszą estymację aniżeli wyłączenie łączy o mniejszym spadku jakości estymacji.

Poniżej wyniki wyłączania czterech sąsiadujących łączy – w tabelach 17, 18 i 19.

Tabela 17 Wyniki wyłączania łączy 23, 29, 30 i 5

	łącze 23	łącze 23 i 29	łącze 23, 29 i 30	łącze 23, 29, 30 i 5
MRE	0,0530	0,0776	0,1101	0,1441
B diff	10	10	12	12
V diff	1808,73	2713,16	3887,24	4753,93
P diff	0,0694	0,1048	0,1509	0,1849

Sumaryczna wartość wolumenu na wyłączonych łącach wynosi 10287,68 MB.

Tabela 18 Wyniki wyłączania łączy 23, 30, 22 i 7

	łącze 23	łącze 23 i 30	łącze 23, 30 i 22	łącze 23, 30, 22 i 7
MRE	0,0530	0,0860	0,1356	0,1631
B diff	10	11	12	12
V diff	1808,73	2917,26	4784,04	5176,71
P diff	0,0694	0,1128	0,1859	0,2011

Sumaryczna wartość wolumenu na wyłączonych łącach wynosi 13528,5 MB.

Tabela 19 Wyniki wyłączania łączy 15, 22, 7 i 6

	łącze 15	łącze 15 i 22	łącze 15, 22 i 7	łącze 15, 22, 7 i 6
MRE	0,0445	0,0957	0,1580	0,2216
B diff	9	10	7	10
V diff	1511,54	2895,50	4148,01	5672,69
P diff	0,0576	0,1117	0,1607	0,2204

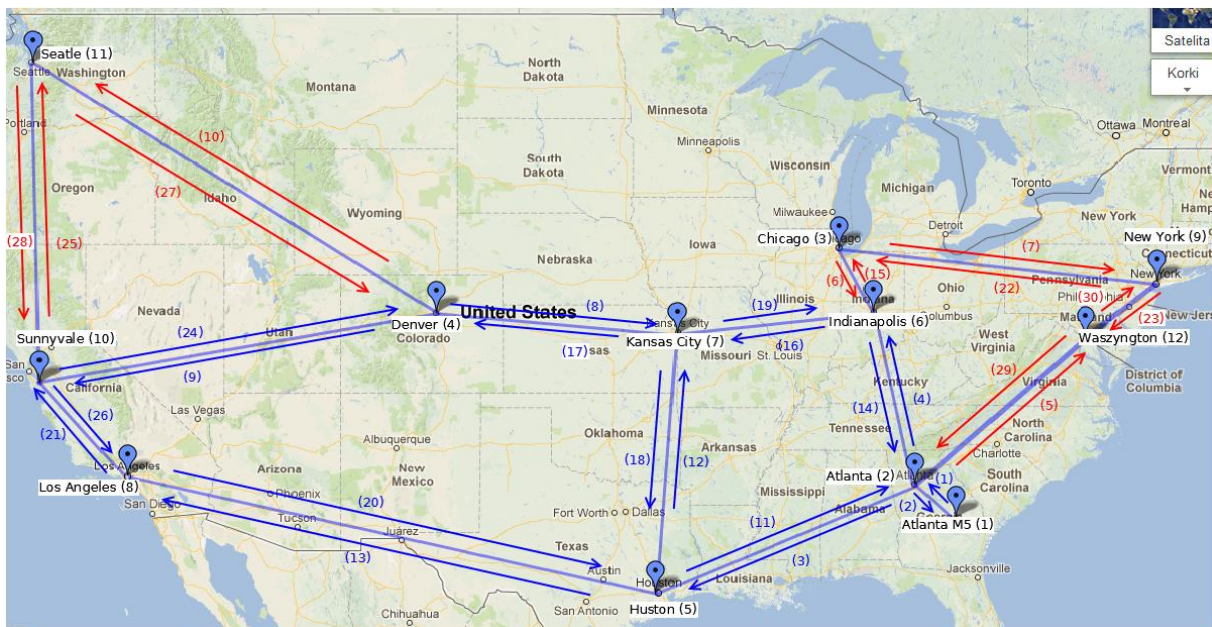
Sumaryczna wartość wolumenu na wyłączonych łącach wynosi 18340,79 MB.

Analiza wyłączenia dwóch sąsiadujących par łączy – oparta na tabelach 17, 18 i 19.

Badania potwierdziły przypuszczenie, iż sumaryczny błąd będzie się zwiększał dla wyłączonych łączy o większym wolumenie danych. I choć pomiędzy pierwszą grupą (łącza 23, 29, 30 i 5), a drugą grupą (łącza 15, 22, 7 i 6) przyrost wolumenu danych jest o 80%, to wzrost błędu jest już na poziomie 4%. Nie jest to duży przyrost. Wynik utwierdza w przekonaniu, że wolumen danych niekoniecznie jest najlepszym kryterium w kwestii wyłączenia łączy.

Poniżej zostaną przedstawione badania, które porównują prawy róg (składający się głównie z łączy powodujących największy spadek jakości estymacji) z trzema wybranymi obszarami.

Poniżej porównanie dwóch obszarów – znanego prawego rogu oraz nowego lewego rogu. Wyłączone łącza przedstawione są czerwonym kolorem na rysunku 15.



Rysunek 15 Prawy róg sieci oraz nowy obszar – lewy obszar sieci Abilene

Charakterystyka obszarów:

1. Prawy trójkąt jest obszarem o bardzo dużym wolumenie danych - 28628,47 MB. Jest to obszar, gdzie występują również łącza o największym wolumenie danych, a także łącza powodujące największy spadek jakości estymacji. Obszar składa się z ośmiu łączy.
2. Lewy trójkąt to obszar o wyraźnie niższym wolumenie danych - 4820,13 MB. Jest to niemalże sześć i pół razy mniejsza ilość danych aniżeli w prawym trójkącie. Obszar składa się z czterech łączy.

Obszary zostały wybrane, aby zobrazować różnicę pomiędzy niewielkim obszarem (zarówno jeżeli chodzi o ilość łączy jak i wolumen danych), a wyraźnie dominującym obszarem.

Tabela 10 Wyniki wyłączenia łączy w lewym rogu

Łącze	25	25 i 27	25, 27 i 10	25, 27, 10 i 28
MRE	0,0438	0,0481	0,0490	0,0722
B diff	9	10	9	11
V diff	1221,65	1380,64	1509,14	2065,39
P diff	0,0465	0,0529	0,0579	0,0799

Z analizy tabeli 20 można jednoznacznie wywnioskować, iż wzrost błędu estymacji był stabilny. Ostatecznie błąd zatrzymał się na poziomie 8%, co nie jest czymś szczególnym dla czterech wyłączonych elementów (wyłączenie czterech łączy o największej liczbie przepływów skutkowało błędem na poziomie 9.5%).

Tabela 11A Wyniki wyłączenia łączy 23, 29, 30 i 15

Łącze	23	23 i 29	23, 29 i 30	23, 29, 30 i 15
MRE	0,0530	0,0776	0,1101	0,1574
B diff	10	10	12	12
V diff	1808,73	2713,16	3887,24	5124,33
P diff	0,0694	0,1048	0,1509	0,1991

Tabela 21B Wyniki wyłączenia łączy 23, 29, 30, 15, 5, 22, 7 i 6

Łącze	23, 29, 30, 15 i 5	23, 29, 30, 15, 5 i 22	23, 29, 30, 15, 5, 22 i 7	23, 29, 30, 15, 5, 22, 7 i 6
MRE	0,1587	0,2551	0,3425	0,4135
B diff	12	12	11	11
V diff	5351,78	8164,37	9891,32	11452,72
P diff	0,2079	0,3177	0,3855	0,4465

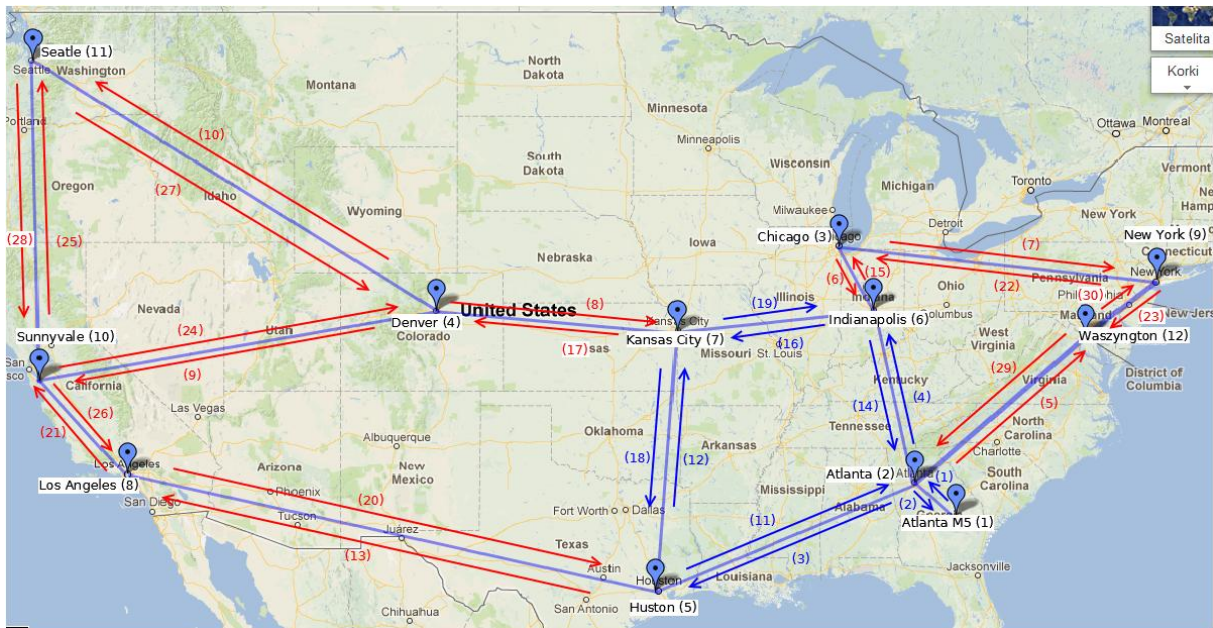
Tabele 21A oraz 21B prezentują wyniki wyłączenia wszystkich ośmiu łączy znajdujących się w prawym trójkącie. Już dla pierwszych czterech elementów widać ogromną różnicę w błędzie estymacji. W prawym trójkącie błąd wynosi niemalże 20%, podczas gdy dla tej samej liczby elementów w lewym trójkącie błąd wynosił 8% - zwiększenie błędu o niemalże 150%.

W przypadku wyłącznie ośmiu łączy w prawym górnym rogu błąd estymacji wynosi już 45%, niemalże połowę całego ruchu w sieci. Jest to około siedem i pół razy większy błąd w stosunku do lewego trójkąta.

Porównanie to pokazuje, jak duże błędy mogą występować w obszarze, w którym występują łącza o dużym wolumenie danych i łącza powodujące duży spadek jakości estymacji. Szczególnie w stosunku do obszaru niepowodującego dużych błędów estymacji.

Aby zaprezentować jak ważne są łącza w prawym trójkącie, poniżej przedstawiony został eksperyment, w którym lewy trójkąt z czterech węzłów powiększył się trzykrotnie. Prawy pozostał bez zmian. Warto zwrócić uwagę na wielkość wolumenu danych w nowym, powiększonym lewym trójkącie w stosunku do oryginalnego prawego trójkąta.

Poniżej porównanie dwóch obszarów – znanego prawego rogu oraz powiększonego lewego rogu. Wyłączone łącza przedstawione są czerwonym kolorem na rysunku 16.



Rysunek 16 Prawy róg sieci oraz powiększony lewy obszar sieci Abilene

Teren lewego, powiększonego trójkąta to 23041,08 MB wolumenu danych (wartość dość zbliżona do wolumenu danych transferowanych w prawym trójkącie - 28628,47 MB). Wyłączonych zostanie 12 łączy (prawy obszar to 8 łączy). Na wyłączonym obszarze znajdują się dwa łącza mające jedną z największych liczb przepływów – łącza nr 8 i 17 posiadają po 26 przepływów każde. W prawym górnym rogu nie ma łączy o tak dużej liczbie przepływów, najwięcej przepływów posiada łącza nr 6 i 15 – po 20 przepływów każde.

Tabela 22A Wyniki wyłączenia łączy 25, 20, 27 i 2

łącze	25	25 i 20	25, 20 i 27	25, 20, 27 i 26
MRE	0,0438	0,0652	0,0630	0,0819
B diff	9	9	10	11
V diff	1221,65	1741,36	1811,07	2233,02
P diff	0,0465	0,0668	0,0698	0,0862

Tabela 22B Wyniki wyłączenia łączy 25, 20, 27, 26, 8, 13, 10 i 9

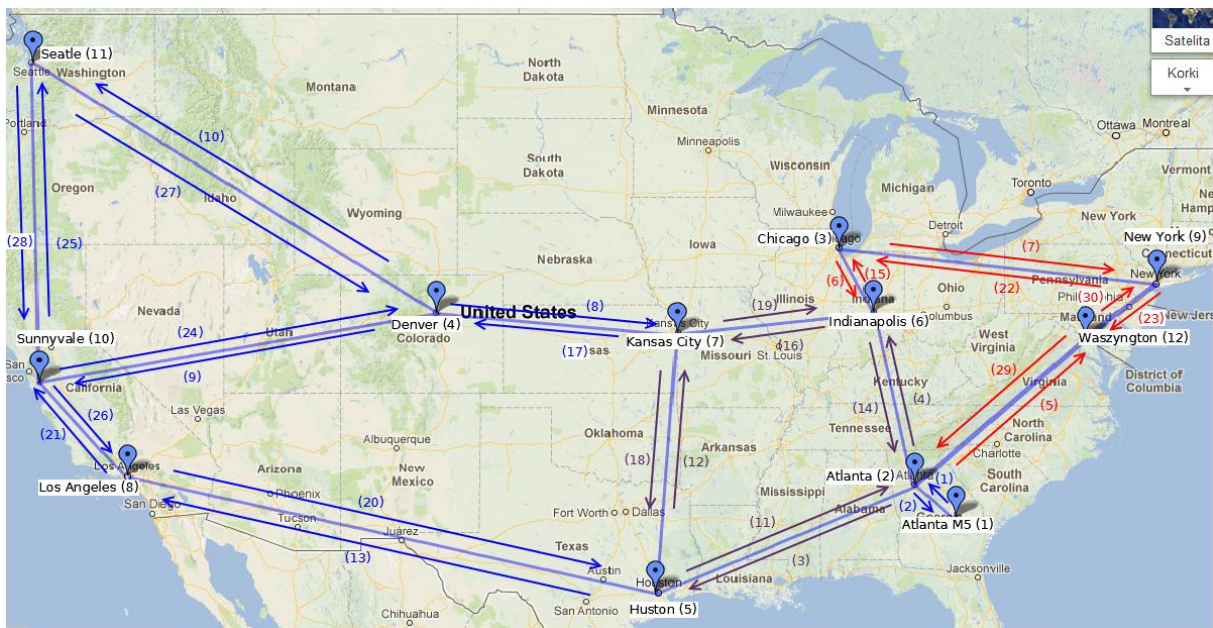
Łącze	25, 20, 27, 26 i 8	25, 20, 27, 26, 8 i 13	25, 20, 27, 26, 8, 13 i 10	25, 20, 27, 26, 8, 13, 10 i 9
MRE	0,1193	0,1102	0,1412	0,1578
B diff	12	12	11	13
V diff	3008,28	2883,46	3534,81	3771,05
P diff	0,1165	0,1115	0,1372	0,1463

Tabela 22C Wyniki wyłączenia łączy 25, 20, 27, 26, 8, 13, 10, 9, 21, 28, 17 i 24

Łącze	25, 20, 27, 26, 8, 13, 10, 9 i 21	25, 20, 27, 26, 8, 13, 10, 9, 21 i 28	25, 20, 27, 26, 8, 13, 10, 9, 21, 28 i 17	25, 20, 27, 26, 8, 13, 10, 9, 21, 28, 17 i 24
MRE	0,2108	0,2486	0,2701	0,2889
B diff	12	16	16	14
V diff	4956,48	5892,32	6155,26	6657,01
P diff	0,1928	0,2294	0,2395	0,2593

Wyniki wyłączenia łączy lewego trójkąta znajdują się w trzech tabelach 22A, 22B i 22C. Wyłączenie aż 12 łączy w lewym rogu spowodowało błąd estymacji na poziomie 26%. Wyłączenie 8 łączy w prawym rogu błąd aż 45%. Tej 20 procentowej różnicy nie tłumaczy już bardzo duża różnica w wolumenie danych pomiędzy dwoma obszarami – prawy jest trochę większy pod względem transferu danych w stosunku do lewego. Podkreśla to rolę, jaką odgrywa prawy trójkąt w całej sieci. Nie należy zapominać, iż mówimy tu o grupowym wyłączeniu łączy, skupionych w specyficznym, mało odpornym na wyłączenie obszarze.

Poniżej ostatnie badania. Porównanie prawego rogu i środkowego obszaru.



Rysunek 17 Prawy róg sieci oraz centralny obszar sieci Abilene

Obszary zostały przedstawione na rysunku 17. Wyłączany centralny obszar to oczywiście łącza ciemnofioletowe, prawy róg to dobrze już znane czerwone łącza.

Obszar środkowy składa się z ośmiu łączy (podobnie jak prawy trójkąt), lecz dwa z nich charakteryzują się największą liczbą przepływów w całej sieci (łącza nr 19 i nr 16 – każde po 29 przepływów). Łączny wolumen danych transferowanych na środkowym obszarze to 15716,65 MB, co stanowi 23% wolumenu danych transferowanych w całej sieci.

Wyniki estymacji:

Tabela 23A Wyniki wyłączania łączy 4, 14, 3 i 19

łącze	4	4 i 15	4, 14 i 3	4, 14, 3 i 19
MRE	0,0389	0,0628	0,0587	0,0941
B diff	10	10	9	8
V diff	1048,66	1891,24	1682,53	2505,02
P diff	0,0397	0,0726	0,0644	0,0964

Tabela 23B Wyniki wyłączania łączy 4, 14, 3, 19, 16, 12, 11 i 18

łącze	4, 14, 3, 19 i 16	4, 14, 3, 19, 16 i 12	4, 14, 3, 19, 16, 12 i 11	4, 14, 3, 19, 16, 12, 11 i 18
MRE	0,1410	0,1365	0,1165	0,1504
B diff	8	9	8	7
V diff	3528,72	3441,07	3056,66	3636,74
P diff	0,1367	0,1332	0,1180	0,1408

Wyniki wyłączania łączy centralnego obszaru znajdują się w tabelach 23A i 23B. Zgodnie z przeprowadzonymi, łączny błąd estymacji nie przekroczył błędu dla prawego rogu (45%), a nawet błędu dla powiększonego lewego rogu (26%) – błąd wyniósł 14%. Wolumen nie jest duży dla środkowego obszaru – wyraźnie mniejszy dla prawego trójkąta (28628,47 MB) oraz lewego trójkąta (23041,08 MB). Przeprowadzone badania podkreślają znaczenie prawego rogu. Jest to obszar najbardziej wrażliwy.

7.4 Podsumowanie wyłączenia łączy

Powyższe badania udowodniły, iż analiza oparta o wyłączenie pojedynczych elementów sprawdza się w praktyce. Wyłączając poszczególne łącza można określić obszar, który bardzo prawdopodobnie, jest niezwykle czuły na brak ograniczeń podczas estymacji. Wyłączenie łączy jedynie pod względem wolumenu danych jest złudne i może prowadzić do nieprzyjemnych rozczarowań. Nawet obszary o zbliżonym wolumenie danych nie muszą powodować jednakowego spadku jakości estymacji. Wymagana jest analiza pojedynczych łączy jako kierunkowskaz dalszych rozważań.

Odnosnie prawego rogu - obszar ten został w pełni zidentyfikowany dzięki analizie wyłączenia pojedynczych łączy. Tak naprawdę, prawy róg stanowi 42% ruchu w sieci. Cały wolumen danych transferowanych wynosi 67386,2 MB wraz z 28 łączyami, wyżej wspomniany obszar to transfer danych na poziomie 4820,13 MB wraz z 8 łączyami. Jest to obszar charakteryzujący się wybitnym, na tle powiększonego lewego rogu oraz obszaru centralnego, spadkiem jakości estymacji, obszar, który nie może zostać pominięty podczas estymacji macierzy ruchu.

Podsumowanie pracy

Praca prezentuje implementację algorytmu estymacji macierzy ruchu w sieci IP. Użyty algorytm to Expectation Maximization (EM) dobrze opisany w artykule naukowym [6]. Jako funkcji estymującej została użyta funkcja *fmincon* wywołana z algorytmem *active-set*. Macierz startowa została utworzona za pomocą Gravity Model. Zaimplementowany algorytm dobrze sprawdził się w praktyce, osiągając błąd na poziomie 3.6% w stosunku do oryginalnej macierzy. Jest to wynik co najmniej zadowalający. Wynik ten również potwierdził, iż stosowanie EM do estymacji macierzy ruchu jest możliwe. Co więcej algorytm ten daje dobre rezultaty. Jednakże, aby uzyskać wyniki na zadowalającym poziomie, algorytm wymaga spełnienia następujących warunków:

1. Rozkład próbek w sieci zgodny z rozkładem Poissona,
2. Odpowiednia macierz startowa.

W wykorzystanej sieci niestety próbki nie rozchodziły się zgodnie z rozkładem Poissona. Powodowało to znaczne pogorszenie jakości estymacji. W związku z tym próbki zostały sztucznie wygenerowane. Nowe próbki, których generacja została oparta o uśrednione wartości oryginalnych próbek, miały rozkład Poissona. Miało to odzwierciedlenie w wynikach, wyraźnie lepszych aniżeli przed poprawą próbek. Również prowadzone były badania nad wykorzystaniem różnych macierzy startu. Standardowo bardzo dobre wyniki dawała macierz oryginalna, lecz ta oczywiście nie mogła zostać użyta (w rzeczywistych warunkach estymacji macierzy ruchu algorytm nie będzie posiadał wiedzy na jej temat). Wykorzystanie macierzy zerowej zawsze dawało bardzo słabe wyniki – niezależnie czy ruch był zgodny z rozkładem Poissona czy nie. Ostatecznie podjęto decyzję o wykorzystaniu Gravity Model do estymacji macierzy wejściowej. Choć tak przygotowana macierz nadal była wyraźnie niedokładna (w stosunku do oryginału wzrost sumarycznej wartości macierzy o 170%), to jednak start z niej dawał bardzo dobre wyniki. Gravity Model został wybrany jako oficjalny algorytm estymacji macierzy wejściowej.

W pracy zostały również przeprowadzone badania możliwości wyłączenia z estymacji łączy. Celem było określenie, które obszary są najbardziej wrażliwe na brak ograniczeń podczas estymacji. Łącza wyłączało biorąc pod uwagę wolumen danych, ilość przepływów oraz jakość estymacji. Żaden z powyższych kryteriów nie dało jednoznacznej odpowiedzi. Dopiero analiza wyłączenia pojedynczych łączy pomogła określić obszar niezwykle podatny na brak ograniczeń. Porównanie odkrytego obszaru z innymi obszarami w sieci dało bardzo dobre wyniki – osiągając 45% spadek jakości wyraźnie dominował na tle konkurentów – 26% i 14%. Należy zaznaczyć, iż żaden z dwóch dodatkowych obszarów nie posiadał pojedynczych łączy, które wykazywałyby największy spadek jakości estymacji. Reasumując, to właśnie analiza wyłączenia pojedynczych łączy jest wstępem do dalszego poszukiwania obszaru podatnego na spadek jakości estymacji. Jest to krok niezbędny i czasami mówiący dużo na temat umiejscowienia poszukiwanego obszaru.

9. Bibliografia

- [1] Sieć Abilene: <http://sndlib.zib.de/>, data pobrania danych: 24.09.2012
- [2] Traffic Matrix Estimation In IP Networks, Suyong Eum
- [3] Traffic Matrix Estimation: Existing Techniques and New Directions, A. Medina ,N. Taft, K. Salamatian, S. Bhattacharyya,C. Diot
- [4] Traffic Matrix Estimation, Ilmari Juva
- [5] Traffic Matrix Estimation on a Large IP Backbone – A Comparison on Real Data, Anders Gunnar, Mikael Johansson, Thomas Telkamp
- [6] Network Tomography: Estimating Source-Destination Traffic Intensities From Link Data, Y. Vardi
- [7] Jflow firmy Juniper Networks:
<http://www.juniper.net/us/en/local/pdf/app-notes/3500204-en.pdf>
- [8] NetStream firmy HP:
http://h18000.www1.hp.com/products/quickspecs/14258_na/14258_na.PDF
- [9] NetStream firmy Huawei Technologies
http://bemsel.de/external-collect/Technical_White_Paper_for_NetStream.pdf
- [10] Cflowd firmy Alcatel-Lucent
<https://infoproducts.alcatel-lucent.com/html/93-0103-08-04-H/7450%20Router%20Config%20Guide/wwhelp/wwhimpl/common/html/wwhelp.htm#href=Cflowd-Intro.19.1.html&single=true>
- [11] Opis NetFlow wraz z listą rozwiązań konkurencyjnych: en.wikipedia.org/wiki/NetFlow
- [12] Algorytmy funkcji fmincon: <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html#brnox0o>

Dodatek A – macierze pomocnicze

Tabela A1 – przykładowa macierz wygenerowana za pomocą Gravity Model wraz z oryginałem

	Gravity model	Oryginał		Gravity model	Oryginał
1	0	0	73	9,58	2,68
2	2,97	2,96	74	698,42	40,96
3	6,01	6,17	75	1411,04	226,68
4	4,15	0,95	76	975,5	105,2
5	2,84	3,69	77	669,31	69,89
6	6,71	4,02	78	1575,83	139,81
7	6,04	2,39	79	0	0
8	1,11	3,23	80	261,32	56,03
9	3,79	4,83	81	890,74	61,17
10	3,02	0,35	82	710,15	17,12
11	2,16	1,14	83	508,39	31,95
12	2,66	11,77	84	625,61	123,29
13	4,14	3,97	85	3,8	6,73
14	0	0	86	277,59	253,84
15	610,27	152,41	87	560,82	745,22
16	421,91	50,68	88	387,72	173,03
17	289,48	177,51	89	266,02	420,72
18	681,55	194,34	90	626,32	249,53
19	613,54	38,25	91	563,83	65,37
20	113,02	205,15	92	0	0
21	385,24	101,17	93	354,03	577,94
22	307,14	8,63	94	282,25	189,58
23	219,88	46,26	95	202,06	307,63
24	270,57	469,88	96	248,65	745,24
25	8,42	6,06	97	7,14	10,54
26	614,14	197,44	98	520,54	313,96
27	0	0	99	1051,67	514,64
28	857,78	181,93	100	727,05	322,53
29	588,55	567,44	101	498,85	316,25
30	1385,67	417,76	102	1174,49	376,97
31	1247,42	131,63	103	1057,3	137,27
32	229,79	745,33	104	194,77	611,67
33	783,25	249,21	105	0	0
34	624,45	27,12	106	529,28	44,5
35	447,04	76,75	107	378,91	218,92
36	550,11	332,06	108	466,27	745,37
37	7,4	2,34	109	5,17	0,47
38	540,04	76,96	110	377,56	9,66
39	1091,06	579,16	111	762,8	11,27
40	0	0	112	527,35	79,69
41	517,53	231,95	113	361,82	14,8
42	1218,48	311,4	114	851,88	15,34

43	1096,91	194,11	115	766,89	4,61
44	202,06	144,35	116	141,27	353,98
45	688,74	196,44	117	481,52	39,96
46	549,11	131,01	118	0	0
47	393,1	129,08	119	274,83	381,86
48	483,74	423,15	120	338,2	8,22
49	2,71	14,67	121	1,27	1,93
50	197,79	135,12	122	93,25	102,44
51	399,6	145,94	123	188,39	246,54
52	276,25	20,03	124	130,24	55,57
53	0	0	125	89,36	101,85
54	446,27	37,04	126	210,39	84,67
55	401,74	22,02	127	189,4	42,24
56	74,01	118,23	128	34,89	306,08
57	252,25	52,58	129	118,92	136,36
58	201,11	4,2	130	94,81	73,53
59	143,97	21,24	131	0	0
60	177,17	231,73	132	83,52	151,12
61	10,72	3,95	133	5,85	12,9
62	781,5	183,18	134	426,65	745,45
63	1578,89	745,23	135	861,98	745,38
64	1091,54	131,91	136	595,92	505,64
65	748,93	188,97	137	408,87	578,47
66	0	0	138	962,65	513,86
67	1587,36	96,7	139	866,6	201,31
68	292,41	248,01	140	159,64	745,37
69	996,7	340,79	141	544,14	745,23
70	794,62	21,12	142	433,82	43,16
71	568,86	108,68	143	310,57	322,74
72	700,03	287,53	144	0	0

Tabela A2 – lista par o dużej kowariancji i braku wspólnych przepływów

Nr pary	Kowarinacja	Pierwsze łącze	Drugie łącze	Nr pary	Kowarinacja	Pierwsze łącze	Drugie łącze
1	1270,68232	3	4	87	3001,87259	10	19
2	6595,795847	3	5	88	2367,52424	10	21
3	19055,53797	3	6	89	2316,54248	10	24
4	6079,444536	3	7	90	1364,64142	11	14
5	1992,970633	3	9	91	4891,1151	11	15
6	7205,001196	3	11	92	10304,3286	11	16
7	1569,060842	3	14	93	8854,35303	11	18
8	4370,321049	3	15	94	1750,89748	11	22
9	17226,21107	3	16	95	8947,56456	11	23
10	16292,65824	3	18	96	4041,85853	11	25
11	11001,9003	3	20	97	1412,62102	11	28
12	2813,193222	3	22	98	8337,07988	11	29
13	4634,832991	3	25	99	1011,91461	12	21
14	2002,289664	3	28	100	1185,33581	12	22
15	2141,296074	3	30	101	1102,86717	12	24
16	1072,936229	4	5	102	5710,90692	13	17
17	2818,419017	4	6	103	3481,93816	13	19
18	1403,081366	4	7	104	2672,22281	13	22
19	1392,622635	4	8	105	3482,11601	13	24
20	1611,285771	4	18	106	2827,14452	13	25
21	1615,422705	4	19	107	2823,03673	14	15
22	1290,890625	4	20	108	2911,63468	14	16
23	1742,242567	4	22	109	2330,15928	14	18
24	2081,8676	4	23	110	1886,4366	14	20
25	1737,436403	4	29	111	1701,21366	14	22
26	1508,139859	4	30	112	2907,69898	14	23
27	11497,43212	5	6	113	2185,50766	14	29
28	7067,891145	5	7	114	1444,62267	14	30
29	2230,997478	5	8	115	25314,9097	15	16
30	1792,485724	5	9	116	17372,6333	15	17
31	1477,930211	5	14	117	5541,2238	15	18
32	7666,549755	5	15	118	6635,60302	15	20
33	9858,631517	5	16	119	13770,9832	15	22
34	8696,594899	5	18	120	14282,5946	15	25
35	2569,994563	5	19	121	1300,43687	15	26
36	2213,097819	5	22	122	8332,3228	15	29
37	10099,61568	5	23	123	10633,7111	15	30
38	3151,224744	5	25	124	16996,1962	16	19
39	1312,509869	5	28	125	13743,4275	16	20
40	8073,788815	5	29	126	13120,5019	16	21
41	16981,09633	6	7	127	15995,92	16	23
42	18422,64638	6	8	128	13035,8308	16	24
43	11859,67385	6	11	129	2076,29384	16	26
44	28589,84868	6	15	130	2259,39456	16	28
45	18981,81819	6	19	131	20506,587	16	29
46	15907,86776	6	20	132	18873,049	17	19

47	13923,76605	6	21	133	17747,6811	17	21
48	19264,49076	6	23	134	17333,3704	17	24
49	13897,23939	6	24	135	1432,57201	17	26
50	2223,86481	6	26	136	1685,53219	17	29
51	2472,238583	6	28	137	14937,4913	18	20
52	23139,81932	6	29	138	15158,6731	18	23
53	5633,218126	7	9	139	2310,75591	18	28
54	6309,608012	7	11	140	17567,3712	18	29
55	1970,137943	7	14	141	2082,47213	18	30
56	14568,22017	7	16	142	13561,4457	19	22
57	4219,587126	7	17	143	12783,0119	19	25
58	9511,481449	7	18	144	1596,20105	19	29
59	8812,896891	7	20	145	9330,25315	19	30
60	3544,694028	7	22	146	1623,08505	20	22
61	6813,978133	7	25	147	13277,5477	20	23
62	1060,433119	7	28	148	12275,4878	20	29
63	8006,598022	7	29	149	1882,85706	20	30
64	3790,785322	7	30	150	8957,08532	21	22
65	13556,63199	8	9	151	1803,7625	21	23
66	2741,105342	8	10	152	12584,899	21	25
67	1471,816534	8	12	153	1407,94087	21	27
68	3119,50928	8	13	154	5121,47504	21	30
69	16617,24461	8	16	155	4760,69181	22	23
70	18005,33425	8	17	156	8472,4969	22	24
71	12137,12122	8	22	157	1038,80201	22	26
72	12580,25289	8	25	158	2459,67284	22	27
73	1489,148324	8	29	159	5863,39051	22	29
74	8470,222119	8	30	160	3086,49978	23	25
75	1662,304581	9	10	161	1022,50506	23	26
76	2365,402681	9	11	162	1994,89042	23	28
77	3447,461431	9	13	163	4053,33751	23	30
78	14271,64722	9	15	164	12863,8008	24	25
79	13939,25112	9	19	165	1516,50315	24	27
80	13554,73317	9	21	166	4911,00089	24	30
81	1239,132991	9	23	167	1369,15952	25	26
82	13585,88654	9	24	168	5303,55119	25	29
83	1188,189591	9	26	169	2872,5786	25	30
84	2925,882228	9	29	170	2195,88123	27	30
85	1891,540769	10	13	171	1991,83309	28	29
86	1048,991894	10	15	172	4840,92646	29	30

Dodatek B – opis płyty

Algorytm Matlab – folder zawiera pliki środowiska Matlab użyte podczas eksperymentów:

1. *A.txt* – uproszczona macierz routingu, zbudowana na podstawie oryginalnej macierzy ruchu *A_abilene.txt*.
2. *A_abilene.txt* – oryginalna macierz routingu sieci Abilene
3. *artificialPoissonTMs.mat* – plik zawierający sztucznie wygenerowane próbki macierzy ruchu zgodne z rozkładem Poissona
4. *assessQualityOfLinkEstimation.m* – plik ocenia jakość estymacji łączy na podstawie oryginalnej macierzy ruchu oraz estymowanej
5. *avgTMs.mat* – plik zawiera uśrednione oryginalne próbki sieci Abilene. Uśrednienie zostało dokonane dla 40k próbek.
6. *binaryLinkAnalyzer.m* – plik ocenia czy połączenia binarne są dobrze estymowane
7. *calculatePathsNumberPerLink.m* – plik oblicza liczbę połączeń dla danego łącza
8. *eliminateOneByOne.m* – plik wyłącza łącza jedno za drugim, dla każdego wyłączonego łącza przeprowadzana jest estymacja macierzy ruchu
9. *eliminateFewElements.m* – plik wyłącza kilka łączy i przeprowadza dla nich estymację macierzy ruchu
10. *GravityModel.m* - plik generuje macierz ruchu (wejściową dla estymacji) na podstawie Gravity Model
11. *percentageLinkAnalyzer.m* – plik oblicza procentową różnicę pomiędzy estymowaną macierzą a oryginalną. Procentowa różnica oparta jest na sumarycznej wartości macierzy ruchu.
12. *poissonProbesGenerator.m* – plik generuje próbki zgodne z rozkładem Poissona. Przygotowuje oryginalne próbki z sieci Abilene, a następnie wywołuje algorytm Knutha odpowiedzialny za właściwą generację - plik *tmePoisson.m*.
13. *tmePoisson.m* – algorytm Knutha generujący próbki zgodne z rozkładem Poissona
14. *tmeGoal.m* – plik zawiera funkcję celu dla funkcji *fmincon*
15. *tmeLoadAbileneTmSamples.m* – plik ładuje uśrednioną macierz ruchu dla sieci Abilene. Uśrednienie odbywa się dla 40k próbek.
16. *tmeMain.m* – algorytm EM
17. *valueLinkAnalyzer.m* – plik oblicza różnicę wartość estymowanej macierzy ruchu a oryginalnej macierzy ruchu
18. *TMs.mat* – plik zawiera 40k próbek sieci Abilene

Praca Magisterska – folder zawiera dwa pliki z pracą magisterską:

1. *Estymacja macierzy ruchu w sieci IP.docx* – edytowalny plik programu Word
2. *Estymacja macierzy ruchu w sieci IP.pdf* – nieedytowalny plik w formacie PDF.