



**Politechnika
Śląska**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Modelowanie dynamiki transmisji internetowych
za pomocą aproksymacji płynnej.**

Modelling the dynamics of internet transmissions
using fluid-flow approximation.

Autor: mgr inż. Monika Nycz

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Czachórski

Gliwice, 2023

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Modelowanie dynamiki transmisji internetowych za pomocą aproksymacji płynnej.

Autor: mgr inż. Monika Nycz

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Czachórski, Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej
Polskiej Akademii Nauk

Praca ma na celu opracowanie metod i narzędzi programowych pozwalających modelować rozległe i złożone (heterogeniczne) sieci komputerowe, w szczególności Internet, oraz zastosowanie ich do analizy wybranych scenariuszy dynamiki natężenia transmisji internetowych. Uzyskane rozwiązania można zastosować między innymi do opisu pracy połączeń TCP i porównania wariantów sterowania natężeniem ruchu w tym protokole. Pozwala to na dokładniejsze zrozumienie zjawisk zachodzących w sieci i ocenę mechanizmów regulacji natężenia transmisji, stosowanych dla poprawy jakości usług internetowych i zapobiegania degradacji parametrów ruchu.

Dotychczasowa literatura dotycząca stanów nieustalonych w sieciach rozległych jest stosunkowo ograniczona i nie odpowiada potrzebom szybko rozwijających się sieci telekomunikacyjnych. Istnieje pilna potrzeba opracowania zaawansowanych narzędzi i metod, które będą w stanie efektywnie analizować funkcjonowanie dużych konfiguracji sieciowych i przewidywać ich zachowanie w warunkach ekstremalnych. Tradycyjne techniki stają się tu niewystarczające.

W pracy sformułowano tezę, że metoda aproksymacji płynnej, po opracowaniu odpowiednich metod i narzędzi programowych, jest efektywnym sposobem badania sieci rozległych z uwzględnieniem występujących w nich stanów nieustalonych. Postawiono również tezę, że przetwarzanie współbieżne można zastosować do numerycznego rozwiązywania równań stanowiących model aproksymacji płynnej. Analizując sieci komputerowe o setkach tysięcy lub milionach węzłów i przepływów konieczne jest przetwarzanie dużych wolumenów danych, dlatego postawiono kolejną tezę, że możliwe jest zastosowanie technologii właściwych dla baz danych i hurtowni danych do modelowania za pomocą aproksymacji płynnej, przechowywania danych uzyskanych podczas modelowania oraz ekstrakcji wiedzy dotyczącej opisanego przez model stanu sieci komputerowej.

Zastosowanie aproksymacji płynnej w modelowaniu sieci wymagało oszacowania wielkości błędów i ograniczeń metody. W tym celu dokonano numerycznego porównania aproksymacji płynnej i alternatywnej metody, aproksymacji dyfuzyjnej dla różnych algorytmów zarządzania kolejką na przykładzie pojedynczego węzła. Wyniki wskazują, że metoda aproksymacji płynnej wprowadza większy błąd niż aproksymacja dyfuzyjna, ale jest od niej prostsza obliczeniowo. Jednocześnie wykazano, że wprowadzenie aktywnego zarządzania kolejką w węzłach oraz sterowania natężeniem transmisji poprzez mechanizm okna przeciążenia może poprawić dokładność modelu płynnego.

Realizacja pracy wymagała przeglądu literatury dotyczącej nie tylko metod, narzędzi i modeli stosowanych w ocenie pracy sieci komputerowych, ale również dostępnych rzeczywistych topologii o skali Internetu, które można zastosować do symulacji pracy projektowanych protokołów i modeli sieciowych. Struktury utworzone z wykorzystaniem generatorów topologii nie zawsze odzwierciedlają współczesny charakter sieci, która stale rośnie i ewoluuje. Topologie uzyskane z mapowania rzeczywistych sieci reprezentują rzeczywisty stan sieci w danym momencie. Badania

wykazały, że oprócz wykorzystania pełnej topologii, można również z niej wyznaczyć mniejsze fragmenty. Podczas redukcji należy jednak zachować ostrożność, aby nie zniekształcić znacząco struktury sieci. Niezależnie od metody uzyskania topologii, do przeprowadzenia modelowania wymagane jest określenie parametrów węzłów, przepływów i tras. W pracy zaproponowano metodę, która umożliwia utworzenie tras połączeń za pomocą algorytmu Dijkstry i wygenerowanie niezbędnych wartości parametrów na podstawie zalecanych wartości dla dowolnej topologii sieciowej.

Znacząca część pracy jest poświęcona przedstawieniu nowych metod wyznaczania modelu aproksymacji płynnej. Scharakteryzowane zostały sposoby dekompozycji zadania i parametrów aproksymacji zgodne z modelami programowania współbieżnego i architekturą wykorzystywanego systemu wieloprocesorowego. Aby przeprowadzić ocenę wydajności zaproponowanej metody współbieżnej, przeprowadzono szereg badań dotyczących optymalizacji rozwiązania, porównania wydajności metod w zależności od sposobu zapisywania danych wynikowych, zastosowanych bibliotek systemu operacyjnego, różnych systemów wieloprocesorowych, sposobów dystrybucji pracy do poszczególnych procesorów oraz sposobów podziału zadania. Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ dekompozycji pracy i danych na czas obliczeń. Pokazano, że skalowalność wydajności programu równoległego zależy nie tylko od wzrostu liczby procesorów, ale również od wykorzystania operacji wektorowych i aktualnej wersji systemu operacyjnego lub jego komponentów. Może przynieść poprawę wyników wydajnościowych o kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt procent.

Badania wskazały również, że system operacyjny stara się maksymalizować wykorzystanie procesorów, równoważąc obciążenia dostępnych rdzeni. Wraz ze wzrostem liczby procesorów okazuje się, że bardziej opłacalne może być sięganie po dane rozmieszczone na innych węzłach systemu (pamięci zdalne) niż przełączanie kontekstu wielu wątków na tym samym procesorze. Reguły dystrybucji pracy są najbardziej przydatne dla systemu wieloprocesorowego o co najmniej kilku węzłach. Jeżeli dostępny system jest mniejszy, korzystanie z mechanizmów dystrybucji pracy nie przyniesie oczekiwanych korzyści. Stwierdzono, że najlepszą metodą dystrybucji wątków jest reguła przypisywania wątków do wybranych węzłów systemu wieloprocesorowego z rozmieszczaniem ich za pomocą algorytmu karuzelowego sterowana z poziomu programu numactl.

Znacznie lepsze rezultaty uzyskuje się poprzez dekompozycję danych. Badania pokazały, że z powodu konieczności stosowania wielokrotnej synchronizacji wątków oraz zależności zarówno parametrycznych, jak i numerycznych (krokowość algorytmu) można osiągnąć tylko częściowe przyspieszenie czasu modelowania, a efektywność rozwiązania współbieżnego maleje wraz ze wzrostem liczby wątków, na których algorytm jest uruchamiany. Najlepszym znalezionym rozwiązaniem okazał się podział wektorów danych jedno- i dwuwymiarowych po jednym elemencie na wątek zgodnie z algorytmem karuzelowym. Zaletą tego podejścia jest brak konieczności rozważania rozmiaru i sposobu podziału danych. Jest to jednocześnie rozwiązanie w danych warunkach najlepsze i rekomendowane w modelu aproksymacji płynnej, ponieważ daje rozwiązanie ponad dwukrotnie szybciej niż wynosi wewnętrzny czas symulacji. Pozwala zatem analizować zjawiska w sieci szybciej niż występują w rzeczywistości. Jeżeli możliwe jest modelowanie sieci szybciej niż rzeczywisty upływ czasu, to oprócz analizy wstecznej, można próbować przewidywać stan sieci, wcześniej wykrywać zatory i nadmierne obciążenie.

Jako alternatywne metody wyznaczania modelu aproksymacji płynnej zaproponowano wykorzystanie technologii baz danych, które umożliwiają wydajne gromadzenie i przechowywanie danych. Technologie nie są przeznaczone do generowania wyników numerycznych, ale zgodnie z paradygmatem przenoszenia kodu jak najbliżej danych, intensywne i kosztowne obliczenia powinny

być wykonywane w warstwie bazodanowej. Jak dotąd nie opracowano, jednakże metody, która pozwoliłaby zdefiniować i zapisać problem aproksymacji płynnej w języku zrozumiałym dla systemów baz danych lub hurtowni danych.

Niezależnie jednak od zdolności modelowania, bazy danych i hurtownie danych mogą wspomagać analizy sieciowe jako magazyny danych, które można przeszukiwać w celu uzyskania odpowiedzi na pytania dotyczące kondycji sieci: globalnej, szczegółowej, chwilowej i średniej. Analiza zarówno ogólnego obrazu, jak i konkretnego fragmentu, pozwala na lepsze i dokładniejsze wnioskowanie dotyczące zjawisk zachodzących w sieci, ich momentów, przyczyn i skutków. Opracowane na przykładzie platformy SAP HANA modele danych i metody umożliwiły modelowanie, składowanie i przetwarzanie danych aproksymacji płynnej w bazie danych. Wybrana platforma miała wspierać budowanie rozwiązań w oparciu o procedury bazodanowe, proces zasilający bazę danych (ETL), przetwarzanie strumieniowe i grafowe. Badania wykazały, że niestety nie wszystkie technologie mogły być wykorzystane w całkowitym zakresie. W kontekście wydajności modelowania wszystkie alternatywne metody modelowania pozostawały zdecydowanie wolniejsze niż metoda współbieżna. Zaletą rozwiązania bazodanowego jest natomiast prostota modyfikacji algorytmów zapisanych w postaci procedur bazodanowych oraz szybkość ekstrakcji wiedzy o stanie sieci komputerowej. Praca wykazała słuszność zastosowania baz danych, ale wymaga dalszych poszukiwań technologii, które pozwolą osiągnąć zadowalający czas modelowania.

Przystawione rozwiązania umożliwiły przeprowadzenie ilościowej analizy stanów przejściowych w sieci składającej się z ponad stu tysięcy węzłów i kilkudziesięciu tysięcy przepływów dla nowych modeli aproksymacji płynnej: modelu uszczegóławiającego model klasyczny, modelu z dynamicznym przełączaniem parametrów węzłów sieci w zależności od natężenia transmisji oraz modelu energooszczędnego węzła w aproksymacji płynnej. Zaproponowane nowatorskie podejścia pozwoliły na przeprowadzenie analiz wybranych scenariuszy sieciowych w celu oceny lokalnego i globalnego wpływu poszczególnych parametrów węzłów i przepływów na stan sieci o skali Internetu. Praca, której efektem jest model sieci o niespotykanym dotąd rozmiarze, otwiera nowe możliwości w dziedzinie modelowania i oceny efektywności sieci rozległych.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane w następujących recenzowanych czasopismach i materiałach konferencyjnych:

1. T. Nycz, T. Czachórski, M. Nycz. Diffusion model of preemptive-resume priority systems and its application to performance evaluation of SDN switches. *Sensors*, 21(15), 5042, 2021
2. M. Nycz, T. Nycz, T. Czachórski. Fluid-Flow Approximation in the Analysis of Vast Energy-Aware Networks. *Mathematics*, 9(24), 3279, 2021.
3. M. Nycz, T. Czachórski. Modelling transient TCP flows with the use of fluid flow approximation - a numerical study. W: *Proceedings of the VIth International Conference of Computer Science and Information Technologies (CSIT 2011)*, Lviv, Ukraine, 2011.
4. M. Nycz, T. Czachórski. Modelowanie dynamiki natężenia przesyłów TCP/IP. W: *Zastosowania internetu* (red. P. Pikiwicz), str. 15-37, Wydawnictwo WSB w Dąbrowie Górniczej, Dąbrowa Górnicza, 2012.
5. T. Czachórski, M. Nycz, T. Nycz, F. Pekergin. Transient states of flows and router queues – a discussion of modelling methods. W: *Proceedings of International Conference on Networking and Future Internet (ICNFI 2012)*, Istanbul, Turkey, 2012.

6. M. Nycz, T. Czachórski. Modelowanie dynamiki przesyłów TCP/IP z uwzględnieniem mechanizmu RED. *Studia Informatica*, vol. 33, nr 3A (107), str. 49-62, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
7. T. Czachórski, M. Nycz, T. Nycz, F. Pekergin. Analytical and numerical means to model transient states in computer networks. W: A. Kwiecień, P. Gaj, P. Stera (red.) *Computer Networks. Communication in Computer and Information Science*, vol. 370, str. 426-435, Springer, 2013.
8. T. Czachórski, M. Nycz, T. Nycz. Modelling transient states in queueing models of computer networks: a few practical issues. W: V. Vishnevsky, D. Kozyrev, A. Larionov (red.) *Distributed Computer and Communication Networks. Communications in Computer and Information Science*, vol. 279, str. 58-72, Springer, 2014.
9. T. Nycz, M. Nycz, T. Czachórski. A numerical comparison of diffusion and fluid-flow approximations used in modelling transient states of TCP/IP networks. W: A. Kwiecień, P. Gaj, P. Stera (red.) *Computer Network. Communications in Computer and Information Science*, vol. 431, str. 213-222, Springer, 2014.
10. T. Czachórski, T. Nycz, M. Nycz, F. Pekergin. Traffic engineering: Erlang and Engset models revisited with diffusion approximation. W: T. Czachórski, E. Gelenbe, R. Lent (red.) *Information Sciences and Systems 2014: ISCS 29th Annual Symposium, Lecture Notes on Electrical Engineering*, str. 249-256, Springer, 2014.
11. M. Nycz, T. Nycz, T. Czachórski. An analysis of the extracted parts of Opte Internet Topology. W: P. Gaj, A. Kwiecień, P. Stera (red.) *Computer Network. Communications in Computer and Information Science*, vol. 522, str. 371-381, Springer, 2015.
12. M. Nycz, T. Nycz, T. Czachórski. Modelling dynamics of TCP flows in very large network topologies. *Information Sciences and Systems 2015*, vol. 363, LNEE, str. 251-259, Springer, 2015.
13. T. Czachórski, M. Nycz, T. Nycz. Modelling wide area networks using SAP HANA in-memory database. *Proceedings 2015 of HPI Future SOC Lab, Universität Potsdam*, 2017.
14. M. Nycz, T. Nycz, T. Czachórski. Performance modelling of transmissions in very large network topologies. W: V. Vishnevsky, D. Kozyrev, A. Larionov (red.) *Distributed Computer and Communication Networks. Communications in Computer and Information Science*, vol. 700, str. 49-62 Springer, 2017.
15. T. Czachórski, M. Nycz, T. Nycz. Fluid-Flow Approximation using ETL Process and SAP HANA Platform. *Proceedings 2016 of HPI Future SOC Lab, Universität Potsdam*, 2018.
16. M. Nycz. Modeling of Computer Networks Using SAP HANA Smart Data Streaming. W: P. Gaj, M. Sawicki, A. Kwiecień (red.) *Computer Network. Communications in Computer and Information Science*, vol. 1039, str. 48-61, Springer, 2019.