

Wrocław, 02.09.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej

Recenzentka:

Dr hab. inż. Róża Goścień, prof. PWr

Katedra Systemów i Sieci Komputerowych

Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Politechnika Wrocławska

Recenzowana rozprawa:

Tytuł: Application Relocation in an Edge-Enabled 5G-System

Autor: mgr inż. Grzegorz Piotr Panek

Promotor: dr hab. inż. Halina Tarasiuk

1. Zawartość rozprawy

Na przełomie ostatnich kilkunastu lat, sieci teleinformatyczne stały się nieodzownym elementem codziennego życia społeczeństwa. Ułatwiają one, a czasem nawet i umożliwiają, funkcjonowanie tak kluczowych dla nas obszarów jak praca, nauka, finanse, służba zdrowia, rozrywka czy też życie społeczne. Z roku na rok obserwujemy rosnącą liczbę użytkowników sieciowych, podłączonych urządzeń oraz zainteresowanie usługami wymagającymi wysokich przepustowości, niewielkich opóźnień oraz ciągłej dostępności zasobów sieciowych. Co więcej, zauważamy rosnącą popularność sieci mobilnych, które aktualnie są źródłem i celem większości ruchu sieciowego.

Główną cechą tych sieci jest mobilność, która jest kluczowym udogodnieniem dla użytkowników końcowych. Mobilność jest równocześnie wysokim wyzwaniem dla operatorów telekomunikacyjnych, gdyż przynosi ona wiele nowych problemów związanych z zarządzaniem sieciami oraz obsługą użytkowników. Aby sprostać tak dużym wymaganiom, sieci te muszą się bardzo szybko rozwijać, w szczególności w zakresie ich architektur i systemów sterowania. Aktualnie systemy mobilne bazują głównie na technologii piątej generacji, zwanej w skrócie 5G. Aby dodatkowo usprawnić świadczenie wielu usług pożądaných przez użytkowników sieciowych (w szczególności usług wrażliwych na opóźnienia), zaproponowana została architektura z przetwarzaniem brzegowym (ang. edge computing), w której kluczowe obliczenia dla użytkownika końcowego przeniesione zostały znacznie bliżej, czyli na urządzenia brzegowe (z którymi użytkownik może się połączyć bezpośrednio lub za pośrednictwem jedynie kilku urządzeń). Rozwiązanie takie pozwala znacząco zmniejszyć opóźnienia transmisji, co jest kluczowe dla wielu popularnych usług. Aby usprawnić realizację usług wrażliwych na opóźnienia, sieci 5G można zintegrować z technologią przetwarzania brzegowego. Wymaga to jednak dodatkowych prac nad zdefiniowaniem szczegółów połączenia oraz współpracy tych dwóch rozwiązań. Dodatkowo, rozwiązanie to przynosi nowy oraz istotny problem relokacji usług, czyli przenoszenia użytkownika wraz ze świadczoną dla niego usługą pomiędzy różnymi węzłami-serwerami sieci. Kluczowym elementem tego problemu jest wybranie nowego węzła do obsługi klienta (gdy poprzedni węzeł nie jest w stanie świadczyć usług lub nie jest w stanie robić tego na odpowiednim poziomie), z uwzględnieniem wymagań realizowanych usług, obciążenia sieci oraz dostępności zasobów sieciowych. Warto zauważyć, iż problem relokacji jest problemem dynamicznym, gdyż stan sieci mobilnej i jej zasobów zmienia się bardzo szybko. Niniejsza rozprawa doktorska porusza dwa wspomniane powyżej wyzwania – zdefiniowanie architektury oraz sposobu współpracy w sieci 5G implementujące przetwarzanie brzegowe oraz efektywne rozwiązanie problemu relokacji poprzez dedykowane metody rozwiązania. Stąd też, recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w aktualne trendy i potrzeby badawcze. Należy więc zaznaczyć, iż porusza ona tematy aktualne i istotne badawczo.

Rozprawa składa się z 9 numerowanych rozdziałów uzupełnionych (na końcu rozprawy) spisem literatury, rysunków, tabel oraz akronimów. Rozprawa liczy 141 numerowanych stron i napisana jest w języku angielskim. Lista literatury składa się z 107 odpowiednio dobranych pozycji.

Rozdział 1 jest wprowadzeniem do rozprawy. Przedstawia krótką definicję rozważanego problemu wraz z jego motywacją, następnie cel, zakres oraz strukturę dalszej części pracy. Zawiera również skrócony opis głównego dokonania Autora (które jest podstawą rozważanej rozprawy) wraz z opisem jego dorobku publikacyjnego.

Rozdział 2 jest rozdziałem teoretycznym, wprowadzającym czytelnika w tematykę sieci 5G, mobilności w sieciach 5G oraz wynikającej z tego potrzeby relokacji usług pomiędzy węzłami sieci 5G (czyli głównego problemu optymalizacyjnego rozwiązywanego w rozprawie). W rozdziale tym Autor przedstawia również 5 przykładowych scenariuszy obsługiwanych przez sieć 5G, w których występuje konieczność relokacji usług.

Rozdział 3 jest kolejnym rozdziałem teoretycznym, w którym przedstawiana jest architektura sieci z przetwarzaniem brzegowym z uwzględnieniem powiązanych wyzwań oraz otwartych pytań badawczych.

Rozdział 4 stanowi przegląd literatury związanej z tematyką rozprawy. Rozdział ten podzielony został na trzy podrozdziały dotyczące (odpowiednio): (i) problemu relokacji usług w sieciach 5G oraz migracji usług w sieciach w architekturze z przetwarzaniem brzegowym, (ii) problemu synchronizacji przy relokacji usług w sieciach o architekturze z przetwarzaniem brzegowym, (iii) podsumowania. W pierwszej części przeanalizowane zostały metody oparte o modele programowania liniowego, heurystyki oraz metody oparte o uczenie maszynowe.

Rozdziały 5-8 prezentują dokonania Autora. W rozdziale 5 zaproponowana została architektura systemu sieci 5G z przetwarzaniem brzegowym wspierającego dynamiczną relokację usług. Architektura ta została również zaimplementowana w autorskim symulatorze, który został zintegrowany z rzeczywistym oprogramowaniem dostępnym dla węzłów sieci 5G. Rozdział 5 przedstawia w skrócie przygotowany symulator. Rozdział 6 przedstawia model matematyczny programowania liniowego dla głównego problemu optymalizacyjnego rozważanego w rozprawie – problem relokacji usług. Rozdział 7 przedstawia opis autorskiego algorytmu heurystycznego

rozwiązania problemu relokacji oraz jego porównanie z metodami referencyjnymi. Rozdział 8 przedstawia opis kolejnego algorytmu zaproponowanego przez Autora dla problemu relokacji. Jest to algorytm oparty o uczenie maszynowe, a dokładniej o uczenie ze wzmocnieniem.

Rozdział 9 jest podsumowaniem rozprawy oraz dotychczasowej pracy wykonanej przez Autora.

Zaproponowany układ pracy jest poprawny, w sposób logiczny prezentuje osiągnięcia Autora. Przedstawione rozdziały teoretyczne w sposób jasny i wystarczający przedstawiają tło oraz motywację dla rozważanych problemów oraz architektur sieciowych. Dobrze umotywowane oraz opisane są również dokonania Autora, będące podstawą rozważanej rozprawy.

2. Opinia o rozprawie

Dynamiczny rozwój sieci mobilnych oraz ich rosnąca popularność wśród społeczeństwa skutkują potrzebą opracowania nowych rozwiązań pozwalających świadczyć pożądane przez użytkowników usługi w sposób efektywny. Jednym ze zidentyfikowanych przez Autora problemów kluczowych aktualnie dla sieci mobilnych jest ich integracja z architekturą przetwarzania brzegowego oraz zagadnienie efektywnej relokacji usług świadczonych użytkownikom końcowym pomiędzy węzłami-serwerami znajdującymi się różnych strefach administracyjnych (geograficznych) sieci. Relokacja jest niezbędna aby zapewnić użytkownikom ciągłość świadczenia usług (przy przemieszczaniu się) lub usługę na odpowiednim poziomie (przy zmieniającym się obciążeniu sieci). Problem relokacji w sieciach 5G z przetwarzaniem brzegowym jest zagadnieniem nowym w literaturze i wymagane jest opracowanie dla niego dedykowanych metod rozwiązania. Właśnie ta potrzeba stała się podstawą recenzowanej rozprawy doktorskiej, w której Autor skupia się na opracowaniu szczegółów architektury pozwalającej na relokację usług w sieciach 5G z przetwarzaniem brzegowym, a następnie proponuje dedykowane algorytmy rozwiązania tego problemu. Jeden z proponowanych algorytmów wykorzystuje uczenie maszynowe, co dodatkowo odpowiada na aktualne trendy w rozwoju sieci teleinformatycznych – czyli wykorzystanie uczenia maszynowego do optymalizacji ich działania.

W rozważanej rozprawie doktorskiej Autor prezentuje cztery elementy stanowiące jego główne osiągnięcie naukowe: (i) propozycję architektury sieci 5G z przetwarzaniem brzegowym wspierającej proces relokacji, (ii) definicję (wraz z modelem matematycznym) nowego problemu

optymalizacyjnego dotyczącego relokacji usług w sieciach 5G z przetwarzaniem brzegowym, (iii) algorytm heurystyczny dedykowany do rozwiązania zadanego problemu oraz analizę jego efektywności, (iv) algorytm bazujący na uczeniu maszynowym dedykowany do rozwiązania zdefiniowanego problemu oraz analizę jego efektywności.

Pierwszym elementem osiągnięcia jest zaproponowanie architektury sieci mobilnej 5G z przetwarzaniem brzegowym, jej dokładny opis oraz zaproponowanie rozwiązań pozwalających przeprowadzać w tej architekturze operacje relokacji usług. Należy podkreślić, iż jest to główny element współpracy z firmą Orange Innovation Polska, która została zawiązana celem przygotowania doktoratu wdrożeniowego.

W ramach drugiej części osiągnięcia, Autor zdefiniował nowy problem optymalizacyjny – relokacja usługi w sieci 5G z przetwarzaniem brzegowym. Funkcja celu w problemie określona jest jako średnia ważona uwzględniająca opóźnienie realizacji transmisji (klient – serwer), wykorzystanie pamięci oraz procesora przez usługę. Wśród ograniczeń problemu znalazły się warunki kontrolujące dostępność zasobów sieciowych na różnych serwerach oraz uwzględniające pozostawienie części zasobów niewykorzystywanych jako margines bezpieczeństwa przy świadczeniu usług. Problem został w rozprawie zamodelowany za pomocą techniki programowania liniowego.

Trzecia część osiągnięcia to propozycja algorytmu heurystycznego do rozwiązania zagadnienia relokacji. Algorytm bazuje na procedurze zachłannej, która iteracyjnie analizuje kolejnych kandydatów do relokacji (potencjalne węzły, które mogą obsłużyć usługę), wzbogaconej o mechanizm przeszukiwania lokalnego. Dla każdego rozważnego kandydata sprawdzana jest dostępność zasobów oraz powiązana z nim wartość funkcji celu. Zaproponowany algorytm zostaje następnie porównany z czterema metodami referencyjnym biorąc pod uwagę: liczbę żądanych zgłoszeń relokacji, liczbę nieobsłużonych relokacji, średnie wykorzystanie pamięci i procesora w sieci. Porównanie przeprowadzone zostaje dla sieci różnego poziomu (miastowe, regionalne oraz międzynarodowe), różnego typu oraz dla różnej liczby usług. Zaproponowany algorytm wypada na tle wszystkich badanych metod zadowalająco, chociaż nie wykazuje najwyższej jakości dla wszystkich badanych scenariuszy i kryteriów.

Czwarty element osiągnięcia Autora to propozycja algorytmu rozwiązania zadania relokacji bazującego na uczeniu maszynowym, a dokładniej na uczeniu ze wzmocnieniem (ang. reinforcement learning). W ramach tego osiągnięcia Autor zaproponował sposób modelowania stanu sieci oraz usługi jak również funkcję oceny akcji podejmowanych przez agenta. Następnie, zaproponowany algorytm został porównany z czterema metodami referencyjnymi oraz zaproponowanym algorytmem heurystycznym. W badaniach wykorzystane zostały te same kryteria porównania oraz scenariusze testowe, co przy analizowaniu efektywności samego algorytmu heurystycznego. Zaproponowany algorytm wypada na tle wszystkich badanych metod zadowalająco, chociaż nie wykazuje najwyższej jakości dla wszystkich badanych scenariuszy i kryteriów.

Podsumowując, osiągnięcie (oraz wszystkie jego składowe) zaproponowane w rozprawie odpowiada na ważny i aktualny problem dotyczący nowoczesnych sieci mobilnych świadczących szereg usług użytkownikom końcowym. Dodatkowo, sposób zaadresowania zagadnienia (czyli wykorzystanie uczenia maszynowego do rozwiązania zidentyfikowanego problemu optymalizacyjnego) wpisuje się w aktualne trendy rozwoju sieci teleinformatycznych oraz narzędzi optymalizacyjnych. Przedstawione w rozprawie osiągnięcie stanowi więc oryginalne rozwiązanie dla problemu integracji sieci 5G z przetwarzaniem brzegowym oraz relokacji usług w sieciach mobilnych 5G z przetwarzaniem brzegowym, stąd spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Po lektorze pracy nasuwają się następujące uwagi dyskusyjne:

- a.) Zaprezentowany model problemu opisany jest w sposób niepoprawny, przez co jest bardzo trudny w interpretacji. Pojedyncze oznaczenia (litery) zmieniają swoje znaczenie (interpretację) na przestrzeni opisu modelu. Nie ma również jednej konwencji powiązania oznaczenia z indeksami – raz używane są przypisy (dolne/górne), innym razem notacja z nawiasami. Nieznane są typy zmiennych oraz zakresy przyjmowanych przez nie wartości. Wszystkie używane oznaczenia powinny być najpierw wprowadzone z podziałem na sekcje indeksów, stałych oraz zmiennych (wskazując również ich charakter – czyli typ

- i zakres przyjmowanych wartości). Dzięki takiemu podejściu Autor uniknąłby istniejącej aktualnie kolizji oznaczeń. Model nie uwzględnia również skali czasu, która w sieci mobilnej jest niezwykle istotna (stan sieci i dostępność zasobów zmieniają się bardzo dynamicznie).
- b.) Brak analizy złożoności problemu optymalizacyjnego (np. na podstawie przedstawionego modelu matematycznego).
 - c.) Problem opisany modelem matematycznym oraz problemy rozwiązywane przez algorytmy heurystyczne nie są ze sobą tożsame (mamy przede wszystkim inne funkcje celu). Warto byłoby przedstawić model problemu rozwiązywanego przez algorytmy heurystyczne i porównać ich wyniki z wynikami optymalnymi (dostarczonymi przez metodę dokładną na bazie modelu).
 - d.) W pracy niepoprawnie używane jest określenie *optymalny*. *Optymalny* znaczy *najlepszy* (w zadanym środowisku) i jest przymiotnikiem niestopniowalnym. Natomiast Autor pisze o metodach (tutaj tłumaczenie z języka angielskiego) mniej i bardziej optymalnych. Dodatkowo, nazywa metody referencyjne metodami optymalnymi, gdzie nie istnieje żaden dowód na to, że te algorytmy są metodami optymalnymi (zwłaszcza, że wykazują często niższą efektywność niż metody zaproponowane przez Autora).
 - e.) Wątpliwości budzi również opis tuningu (czyli strojenia) metod. Strojeniu podlegają sterowalne parametry samego algorytmu (lub hiperparametry w przypadku algorytmów uczenia maszynowego), nie współczynniki funkcji celu. Tuning parametrów funkcji celu prowadzi to definiowania różnych problemów optymalizacyjnych, a co za tym idzie – do rozwiązywania przez algorytmy innych problemów. Dodatkowo, przy opisie tuningu należy zaznaczyć jakie wartości parametrów były badane (na jakiej podstawie takie zostały wybrane), jak zmieniała się efektywność metody w funkcji zmiany wartości różnych parametrów oraz jakie wartości zostają rekomendowane do badań docelowych (i na jakiej podstawie).
 - f.) W pracy brakuje szerszej analizy statystycznej otrzymanych wyników, w szczególności przy porównaniu różnych algorytmów i wnioskowania, który jest lepszy od którego. Do takiej analizy należy wybrać odpowiednie testy statystyczne i sprawdzić czy różnice efektywności są statystycznie istotne.

- g.) Wątpliwości budzi również użycie określenia *reliability* (i *reliable*) do opisu stworzonego systemu. Określenie to kojarzone jest przede wszystkim z metodami ochrony sieci (jej elementów) przed różnego rodzaju atakami i awariami bądź metodami podnoszącymi wiarygodność systemu. Jednak zaproponowany system nie posiada takich mechanizmów. Określenie *reliability* wprowadza więc czytelnika w błąd.
- h.) Przegląd literaturowy dotyczący metod relokacji zdaje się być opisany bardzo pokrótce. Powiązanych prac jest dużo więcej, zwłaszcza że problem relokacji (nie dokładnie w takiej formie, ale podobnej) rozważany jest nie tylko w sieciach 5G.
- i.) W pracy doktorskiej brak jest tezy badawczej.

W rozprawie zauważono liczne błędy edytorskie, które nie uniemożliwiają jednak odbioru pracy:

- Błędy językowego. W szczególności: niepoprawnie stosowane (lub brak zastosowania) przedimków *a/an/the*, niepoprawne stosowanie czasów (niepoprawna odmiana czasowników) oraz brak konsekwencji stosowania tego samego czasu w opisie.
- Umieszczenie rysunków zbyt daleko od miejsca odwołania się do nich (w szczególności odwoływanie się w rozdziale *x* do rysunku zamieszczonego w rozdziale *x+1*).
- Brak konsekwencji w oznaczaniu operacji mnożenia. Operacja mnożenia raz oznaczana za pomocą znaku „*x*”, raz ze znakiem „*o*”, a raz bez żadnego oznaczenia.
- Niekompletne opisy tabel i rysunków. Np. tytuł Tabeli 7.2 to „czas zbieżności”, natomiast w tabeli przedstawione są również inne dane (poza czasem).

4. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska potwierdza szeroką wiedzę teoretyczną mgr inż. Grzegorza Panka w zakresie sieci mobilnych 5G oraz sieci z przetwarzaniem brzegowym. Rozprawa realizowana było jako doktorat wdrożeniowy i należy podkreślić, iż dokonania Autora mają charakter mocno aplikacyjny oraz odpowiadający na potrzeby rynku telekomunikacyjnego. W ramach rozprawy zaimplementowany został autorski symulator, wykorzystujący rozwiązania i algorytmy używane przez rzeczywistych operatorów. Do rozwiązywania problemu relokacji usług zaimplementowane zostały natomiast autorskie propozycje Autora. Dokonanie Autora oraz

przygotowane publikacje naukowe potwierdzają również jego umiejętność prowadzenia samodzielnych badań naukowych na wysokim poziomie (o czym świadczy również dorobek publikacyjny Autora, w którym znajdują się prace opublikowane w tak prestiżowym czasopiśmie jak *IEEE Communications Magazine* oraz podczas renomowanych konferencji jak *IEEE Global Communications Conference (GlobeCom)* oraz *IEEE International Conference on Communications (ICC)*). Zaprezentowane w rozprawie osiągnięcia i propozycje Autora stanowią oryginalne rozwiązania dla istotnego oraz aktualnego problemu badawczego, a uzyskane wyniki badań (w tym opracowany symulator) są rozwojem wiedzy pozwalającym ulepszać istniejące lub projektować nowe protokoły sieciowe, algorytmy i mechanizmy sterowania sieciami mobilnymi.

Praca spełnia więc ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, stąd wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Dodatkowo, praca ma charakter aplikacyjny, a w ramach jej realizacji powstał system (autorski symulator), który może zostać bezpośrednio wykorzystany do zarządzania węzłami sieci 5G. Stąd też, praca spełnia wymagania stawiane doktoratom wdrożeniowym.

Gosier