

Recenzja rozprawy doktorskiej

Imię i nazwisko kandydata: Grzegorz Piotr Panek

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Application relocation in an Edge-enabled 5G-system

Promotor: dr hab. inż. Halina Tarasiuk

1. Wybór tematu pracy

Rozprawa dotyczy bardzo aktualnego problemu badawczego, jakim jest wybór obliczeniowych węzłów brzegowych, na których mają zostać uruchomione aplikacje działające w modelu edge computing. Problem wynika z rozwoju współczesnych sieci komórkowych oraz zapewnienia przez architekturę systemów 5G możliwości przetwarzania danych użytkownika nie tylko w chmurze obliczeniowej, ale także w węzłach położonych w bezpośredniej bliskości stacji bazowych, w celu minimalizacji czasu transmisji danych. Doktorant skupił się w pracy na wybranym zagadnieniu związanym z zarządzaniem aplikacjami brzegowymi - procesie relokacji, a więc przeniesieniu pomiędzy serwerami w celu zapewnienia ciągłości przetwarzania, gdy użytkownik się przemieszcza.

Temat podjęty w pracy doktorskiej jest aktualny i wynika bezpośrednio z rozszerzeń standardu 5G zaproponowanych przez organizację 3GPP i ETSI. Model przetwarzania brzegowego jest nowym wyzwaniem, z którym muszą się zmierzyć operatorzy sieci 5G. W chwili obecnej jest to tematyka, która jest intensywnie badana przez naukowców na świecie, a zagadnienia przetwarzania brzegowego w sieciach komórkowych są przedmiotem wielu projektów naukowych o zasięgu Europejskim i światowym. Badania te są bardzo istotne w celu umożliwienia użytkownikom sieci komórkowych korzystania z aplikacji wymagających niskiego opóźnienia pakietów, jak np. pojazdy autonomiczne, rzeczywistość rozszerzona (AR), czy operacje na odległość. Mają również duże znaczenie ze względu na skalę potencjalnego zastosowania – opracowane algorytmy znajdą zastosowanie w zarządzaniu serwerami obsługującymi aplikacje milionów użytkowników. Tematyka pracy została bardzo dobrze ulokowana w kontekście rozszerzeń standardu 5G, w którym opracowano architekturę i zasady migracji aplikacji pomiędzy serwerami brzegowymi, ale nie określono algorytmów decydujących o sposobie migracji, a więc rozwiązań, których dotyczy praca. Świadczy to, iż doktorat dotyczy bardzo aktualnego i istotnego problemu badawczego, mającego także duże zastosowanie praktyczne.

2. Ocena układu rozprawy

Rozprawa składa się z 9 rozdziałów oraz bibliografii. W pierwszym rozdziale doktorant przedstawił wstęp i uzasadnienie wyboru tematyki badawczej. W drugim zawarł wstęp do technologii 5G oraz standardów definiujących działanie sieci komórkowych. W rozdziale 3 opisał wyzwania związane z zastosowaniem modelu przetwarzania brzegowego. W rozdziale 4 zawarł przegląd literatury. W kolejnym rozdziale omówił demonstrator możliwości realizacji relokacji aplikacji, a w rozdziale 6 w sposób formalny zdefiniował problem badawczy. Najważniejsza część wyników pracy została zawarta w rozdziałach 7 i 8, w których doktorant zaprezentował 2 opracowane algorytmy: heurystyczny i oparty o uczenie maszynowe wraz z wynikami badania ich efektywności. Pracę zamyka zwięzłe podsumowanie w rozdziale 9.

Podział rozprawy na rozdziały jest klarowny i bardzo dobrze prowadzi czytelnika od zdefiniowania problemu, poprzez opis stanu wiedzy i opis środowiska badawczego, do propozycji nowych algorytmów opracowanych przez autora i analizy ich działania. Praca jest napisana w sposób czytelny. Należy zwrócić uwagę na bardzo dogłębną analizę i precyzyjny

opis sposobu realizacji przetwarzania brzegowego w sieciach 5G. Doktorant także bardzo klarownie opisał opracowane algorytmy, definiując każdy z nich w postaci pseudokodu. Także wyniki badań własnych doktoranta są jasno opisane. Przyjęta metoda organizacji pracy w sposób jednoznaczny pozwala na wyróżnienie wkładu własnego doktoranta od opisu stanu wiedzy. Ostatni rozdział dobrze podsumowuje uzyskanie wyniku i prezentuje je w kontekście badań w obszarze systemów przetwarzania brzegowego.

3. Metodologia badawcza

Doktorant w ramach realizacji pracy doktorskiej przygotował środowisko emulacyjne, złożone z serwerów maszyn wirtualnych i środowiska kubernetes pozwalającego odzwierciedlić działanie serwerów brzegowych sieci, kontrolera rdzenia sieci free5GC i symulatora części radiowej sieci 5G UERANSIM. Przygotowanie i konfiguracja tego środowiska wymagały wiele pracy, a jego działanie pozwala zweryfikować działanie narzędzi do sterowania serwerami brzegowymi i relokacji aplikacji w środowisku maksymalnie zbliżonym do docelowej sieci 5G. Środowisko to zostało wykorzystane do udowodnienia poprawności koncepcji relokacji aplikacji brzegowych, jednak w rozprawie nie zawarto pomiarów lub analiz wydajności działania takiej relokacji nawet dla prostych przypadków, co jest pewną wadą rozprawy.

Metodologia badawcza oceny wydajności opracowanych algorytmów koncentruje się na analizie efektywności działania zaproponowanych algorytmów przenoszenia aplikacji za pomocą symulacji sieci komputerowych. Doktorant przygotował środowisko, które nazwał „Edge-Enabled 5G network simulator”, składające się z symulatora zachowania użytkownika końcowego odzwierciedlającego mobilność klientów, modułu sterowania działaniem serwerów brzegowych „Edge Orchestrator” oraz emulatora sieci 5G i topologii sieci „Network and Edge Topology”. Doktorant poprawnie odzwierciedlił w modelu symulacyjnym architekturę badanej sieci oraz metody przenoszenia aplikacji pomiędzy serwerami brzegowymi. Z dużą starannością także opracował model opóźnień pomiędzy transmisjami na poziomie miasta, regionu i sieci międzynarodowej. Problem do rozwiązania został poprawnie opisany za pomocą notacji matematycznej, a przepływ komunikacji pomiędzy poszczególnymi elementami architektury został bardzo szczegółowo opisany za pomocą diagramów przepływu. Badania za pomocą modelu symulacyjnego zostały wykonane poprawnie pod względem metodologicznym. Doktorant dobrze zaplanował eksperymenty symulacyjne, dla każdego punktu pomiarowego wykreślając średnią ze 100 uruchomień symulacji i odznaczając na wykresie przedziały ufności, co pozwala oszacować zakres błędów. W rozprawie nie opisano wystarczająco precyzyjnie w jaki sposób dokonano walidacji środowiska symulacyjnego np. poprzez porównanie z pomiarami wykonanymi w środowisku emulacyjnym opisanym w rozdziale 5, jednak wyniki przedstawione w rozprawie nie wskazują na błędy w jego działaniu.

Istotnym elementem badań w pracy doktorskiej jest zastosowanie uczenia maszynowego do sterowania działaniem aplikacji w sieci brzegowej. Doktorant dobrze dobrał metodę uczenia ze wzmocnieniem, tworząc model oparty na algorytmie Proximal Policy Optimization (PPO). Wybór tego algorytmu jest adekwatny do problemu rozwiązywanego w rozprawie i doktorant rzetelnie przeanalizował sposób doboru hiper-parametrów. Metodologia doboru zbiorów

uczących i sposobu uczenia poprzez wykorzystane przez doktoranta wskaźniki KPI jest także metodologicznie poprawna.

4. Analiza źródeł i stanu wiedzy

Bibliografia rozprawy obejmuje odwołania do 107 artykułów naukowych, książek oraz standardów sieci 5G. Są to prace opisujące tło prowadzonych badań, w tym podstawowe koncepcje związane z architekturą sieci 5G, modelowaniem tych sieci oraz analizą efektywności sieci bezprzewodowych. Doktorant w rozdziałach 2 i 3 bardzo szczegółowo opisał sposób realizacji przetwarzania w modelu „edge” w ramach standardów 5G, odwołując się do dobrze dobranych prac w dziedzinie. Również tło w zakresie badań nad systemami przetwarzania brzegowego zostało dobrze oddane w rozprawie, od odniesienia się do nowych przypadków użycia dla sieci 5G proponowanych przez organizacje standaryzacyjne, po przegląd prac związanych z zastosowaniem optymalizacji do sterowania przetwarzaniem w systemach brzegowych. Cytowane prace są związane z tematem rozprawy, a odwołania zostały umieszczone adekwatnie do treści pracy. Przegląd literatury został opisany w sposób wyczerpujący i świadczy, że autor dogłębnie przeanalizował stan wiedzy i przed przystąpieniem do tworzenia własnych algorytmów dobrze zapoznał się z informacjami na temat opisanych wcześniej metod optymalizacji i sterowania działaniem aplikacji na serwerach brzegowych sieci bezprzewodowych.

5. Poprawność redakcyjna rozprawy

Rozprawa została przygotowana w sposób bardzo staranny i nie zawiera znaczących błędów językowych lub redakcyjnych. Rozprawa jest napisana w sposób czytelny i zrozumiały. Sposób organizacji treści w pracy nie budzi zastrzeżeń.

Za niewielką wadę redakcyjną rozprawy można jedynie uznać sposób przygotowania części z rysunków, w których umieszczono część z opisów w sposób nieczytelny lub mało zrozumiały. Np. diagram przepływu wiadomości na rycinie 4.1 zawiera nazwy (np. „4. Nudr_DM_Notify”) które nie zostały omówione w pracy i pochodzą wprost ze standardu, z którego został zaczerpnięty, a jego zrozumienie wymaga sięgnięcia do dokumentu źródłowego. Opis części obiektów na rysunku 8.3 jest tak mały, że odczytanie liter jest możliwe jedynie przy użyciu lupy. W/w drobne wady jednak nie umniejszają wysokiego poziomu redakcyjnego całości rozprawy.

6. Wartość naukowa rozprawy

Praca dotyczy bardzo aktualnej tematyki naukowej i stanowi istotny wkład w rozwiązanie problemu efektywnego doboru węzłów brzegowych do realizacji przetwarzania w modelu Edge Computing oraz opracowania algorytmów sterujących migracją aplikacji. Doktorant dobrze zidentyfikował niszę w prowadzonych badaniach nad systemami przetwarzania brzegowego. Koncentrując się na algorytmach sterujących relokacją aplikacji podjął badania o

nowatorskim charakterze, w obszarze, w którym liczba dostępnych metod opisanych w literaturze jest niewielka. Praca doktorska nie jest prostą adaptacją znanych rozwiązań do nieznacznie zmodyfikowanego problemu, lecz stanowi odpowiedź na realną potrzebę badawczą. Analiza literatury naukowej zawarta w pracy potwierdza, że doktorat stanowi nowe rozwiązania problemu naukowego.

Doktorant w rozprawie przedstawił 2 metody rozwiązania problemu relokacji aplikacji brzegowych w odpowiedzi na mobilność użytkowników: klasyczny algorytm heurystyczny (zaimplementowany w kilku wersjach) oraz metodę opartą na uczeniu ze wzmocnieniem. Potwierdza to, że doktorant dysponuje odpowiednim warsztatem naukowym i jest w stanie opracować algorytmy o różnym charakterze. Analiza wydajności dla wszystkich algorytmów została przeprowadzona bardzo rzetelnie. Doktorant przeprowadził badania dla różnych parametrów związanych z opóźnieniem transmisji i dla różnych wielkości sieci oraz ocenił skalowalność opracowanych metod w zależności od liczby aplikacji. W doktoracie także oszacowano złożoność obliczeniową (czas wykonania) poszczególnych algorytmów, co pozwala oszacować wpływ realizacji obliczeń na wydłużenie procesu relokacji. Wszystkie te elementy świadczą o dużej rzetelności prowadzonych badań oraz wiarygodności przedstawionych w rozprawie wyników.

Prace przedstawione w rozprawie doktorskiej były elementem 3 publikacji naukowych, w tym jednej opublikowanej w renomowanym czasopiśmie IEEE Communication Magazine oraz 2 artykułach opublikowanych w materiałach konferencyjnych uznanych konferencji międzynarodowych: IEEE International Conference on Communications (ICC) i IEEE Global Communications Conference (Globecom). Świadczy to o wysokiej jakości prowadzonych badań.

7. Możliwość praktycznego zastosowania wyników badań

Wyniki badań zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej mają bezpośrednie zastosowanie w praktycznym zarządzaniu sieciami komórkowymi 5 generacji. Istotny aspekt praktyczny mają algorytmy relokacji aplikacji w systemie przetwarzania brzegowego, które można wdrożyć w systemach zarządzania węzłami brzegowymi. Wyniki analizy porównawczej algorytmów w wersjach kładących nacisk na opóźnienie, równoważenie obciążenia lub metod opartych o uczenie maszynowe pozwalają dopasować algorytm do specyfiki zastosowania danej sieci i dobrać odpowiednią metodę pod kątem minimalizacji prawdopodobieństwa odmowy przełączenia aplikacji lub pod kątem minimalizacji częstości przełączeń. Bardzo istotny aspekt praktyczny ma także opracowane przez autora i opisane w rozdziale 5 rozprawy środowisko „proof of concept”, w którym można uruchomić i przetestować w warunkach laboratoryjnych działanie metody przenoszenia aplikacji pomiędzy serwerami brzegowymi. Operator sieci 5G może wykorzystać opisaną w pracy metodę budowania środowiska emulacyjnego do weryfikacji i przetestowania funkcji przetwarzania brzegowego przed ich wdrożeniem w całej sieci.

Możliwość praktycznego zastosowania wyników badań została potwierdzona licznymi prezentacjami wyników pracy doktoranta na konferencjach branżowych, m.in.: KubeCon 2022 w Valencji, "Telco at Edge Days" podczas konferencji KubeCon 2023 w Amsterdamie oraz podczas Orange Open Tech Days w Paryżu w 2023 roku. Należy zwrócić uwagę, że doktorat został opracowany we współpracy z jednym z największych operatorów sieci komórkowych w Polsce – firmą Orange, a jego tematyka jest bezpośrednio powiązana z nowymi usługami rozwijanymi w sieciach komórkowych przyszłości. Dlatego istnieje bardzo duża szansa, że wyniki prac doktoranta zostaną w praktyce zastosowane w sieciach obsługujących miliony użytkowników.

8. Uwagi krytyczne

Istotna część badań efektywności algorytmów przeniesienia aplikacji pomiędzy serwerami brzegowymi zależy od przyjętego sposobu odwzorowania mobilności użytkowników. W środowisku symulacyjnym opisanym w rozdziale 6 rozprawy wskazano, że zaimplementowano jedynie prosty model mobilności użytkowników zakładający, że mogą oni przemieszczać się pomiędzy sąsiednimi komórkami z równomiernym prawdopodobieństwem. Może to prowadzić do nierównomiernego obciążenia komórek, z większym prawdopodobieństwem przełączenia użytkownika do komórek znajdujących się w centrum sieci, podobnie jak ma to miejsce w modelu „Random Waypoint”. Czy zweryfikowano równomierność obciążenia sieci i czy ma to wpływ na wyniki przeprowadzonej analizy np. prawdopodobieństwa odmowy przełączenia aplikacji?

Doktorant używa modelu symulacyjnego w znacznej mierze bazującego na opracowanych samodzielnie elementach. W jaki sposób zweryfikowano poprawność działania symulatora i czy spróbowano porównać działanie modelu symulacyjnego dla prostych topologii z działaniem środowiska „proof of concept” opisanego w rozdziale 5?

W przeprowadzonych analizach skoncentrowano się na algorytmach dokonujących próby przełączenia jedynie pojedynczej aplikacji, a parametrem użytym do oceny jakości działania algorytmu jest współczynnik odrzuconych prób przeniesienia (ang. relocation rejection rate). Naturalną odpowiedzią na ten problem wydaje się przeniesienie innych aplikacji w celu zwolnienia miejsca na serwerach brzegowych położonych w miejscu docelowym, lub równoważenie obciążenia poprzez przełączenia aplikacji realizowane nie tylko w odpowiedzi na mobilność użytkowników, ale także w sposób proaktywny, np. poprzez okresowe uruchomienie w celu przeniesienia aplikacji możliwych do przeniesienia do serwerów o niższym obciążeniu. Dlaczego w planach dalszych prac w rozdziale 9.2 skoncentrowano się na praktycznych aspektach (np. wsparcie migracji aplikacji stanowych), a pominięto aspekt możliwej poprawy metody zarządzania migracją aplikacji poprzez w/w rozszerzenia?

9. Podsumowanie i ocena końcowa

Praca doktorska pt. „Application relocation in an Edge-enabled 5G-system” została przygotowana przez Pana magistra Grzegorza Piotra Panek rzetelnie i wykazuje zdolność kandydata do prowadzenia pracy naukowej w sposób samodzielny. Praca jest poprawna pod względem metodologicznym, a opracowane algorytmy relokacji aplikacji pomiędzy węzłami brzegowymi w odpowiedzi na mobilność użytkowników są nowatorskie i zostały rzetelnie przeanalizowane. Badania w zakresie zastosowania uczenia maszynowego ze wzmocnieniem do optymalizacji przełączeń aplikacji w systemie przetwarzania brzegowego sieci 5G wykraczają poza stan wiedzy, ale mają także bezpośrednie zastosowanie praktyczne. Badania zostały poprawnie zaplanowane i zrealizowane, a ich wyniki szczegółowo i precyzyjnie opisane. Praca tym samym potwierdza, iż kandydat posiada wymaganą wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana Grzegorza Panek spełnia warunki określone w art. 187 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 r., poz. 1668 z późn. zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana Magistra Grzegorza Panka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

25.09.2024

.....
data sporządzenia recenzji

.....
podpis recenzenta