

dr hab. inż. **Marcin Niemiec**, prof. AGH

Kraków, 07.11.2024

Instytut Telekomunikacji
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
tel. 12 617 48 03
niemiec@agh.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ WOJSKOWEGO INSTYTUTU ŁĄCZNOŚCI – PAŃSTWOWEGO INSTYTUTU BADAWCZEGO

Tytuł rozprawy: Zastosowanie mechanizmów estymacji stabilności łączy w celu poprawy efektywności funkcjonowania protokołów routingu dla sieci MANET

Autor rozprawy: mgr inż. Rafał Bryś

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozprawa doktorska dotyczy problematyki efektywnej komunikacji w mobilnych sieciach Ad-Hoc (MANET), gdzie transmisja danych pomiędzy węzłami odbywa się przy użyciu wybranych węzłów pośredniczących. Za wybór ten odpowiada protokół routingu. Jednak dynamiczne zmiany topologii sieci MANET mogą powodować zerwanie połączenia na wybranej ścieżce, co skutkuje utratą pakietów i pogorszeniem efektywności komunikacji w sieci. Stąd potrzeba badań nad mechanizmami, które pozwolą zbudować połączenia poprzez bardziej stabilne węzły pośredniczące.

Autor rozprawy postawił tezę, iż odpowiednia estymacja stabilności łączy w mobilnej sieci Ad-Hoc pozwoli opracować mechanizm decydujący o wyborze bardziej stabilnych ścieżek routingu, a następnie protokół prewencyjnie przełączy trasę, co pozwoli na bardziej efektywną transmisję danych. Dzięki predykcji czasu dostępności każdego węzła w sieci, będzie można uniknąć sytuacji, w której komunikacja odbywa się za pośrednictwem węzła tracącego możliwości transmisji. Tym samym, wcześniejsze przełączenie trasy routingu zapewni ciągłość transmisji oraz brak utraty pakietów.

Tak przedstawione zagadnienie naukowe – wraz z jednoznacznie określoną tezą rozprawy – jest jasno sformułowane przez Autora i przedstawia interesujące zagadnienie badawcze. Ponieważ dotyczy ono realnego problemu w stosowanych sieciach mobilnych Ad-Hoc, rozprawa ma charakter doświadczalny i praktyczny. Zastosowane metody badawcze również potwierdzają doświadczalny charakter badań, np. weryfikacja opracowanego mechanizmu poprzez badania symulacyjne oraz badania w rzeczywistym środowisku przy użyciu fizycznego sprzętu.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadczący o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W początkowej części rozprawy przedstawione zostały protokoły routingu stosowane w mobilnych sieciach Ad-Hoc – zarówno proaktywne jak i reaktywne. Jako przedstawiciel pierwszej grupy opisany został protokół OLSR (*Optimized Link State Routing*), który umożliwia pozyskanie i utrzymanie wiedzy o topologii całej sieci, a na jej podstawie buduje ścieżki routingu. Z kolei jako przykładowy protokół reaktywny opisany został AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*), w którym tworzenie ścieżek routingu inicjowane jest na żądanie. Wprawdzie w rozprawie odniesiono się do dokumentu opisującego jeszcze poprzednią wersję tego protokołu (najnowsza wersja nr 4 została opublikowana w marcu 2024), ale nie jest to istotne dla samej rozprawy, gdyż działanie protokołu nie zmieniło się względem wersji nr 3. Co najważniejsze – wiedza Autora na temat działania protokołów dedykowanych do sieci MANET pozwoliła zidentyfikować i opisać problem dotyczący szybkiego wykrywania zmian topologii oraz wyszukiwania alternatywnych tras routingu. Potwierdza to wiedzę Autora z tematyki poruszanej w rozprawie doktorskiej.

Rozdział 3 rozprawy jest poświęcony analizie literaturowej pod kątem zaproponowanych rozwiązań problemu straty pakietów na skutek przerwania aktualnej ścieżki routingu w mobilnych sieciach Ad-Hoc. Szczególną uwagę zwrócono na rozwiązania pozwalające na predykcję powiązań pomiędzy węzłami w takich sieciach. Przedstawiono prace polegające na monitorowaniu parametrów jakościowych transmisji (np. bitowa stopa błędów), opisano rozwiązania uwzględniające zmienność parametrów radiowych sygnałów czy mechanizmy bazujące na lokalizacji węzłów. Szkoda jedynie, że opis kolejnych metod nie jest chronologiczny – pozwoliłoby to prześledzić jak poszczególne podejścia/pomysły ewoluowały w czasie oraz jakie problemy były kolejno rozwiązywane i jakie problemy generowały nowe modyfikacje protokołów. Niemniej jednak analizę źródeł przeprowadzono w sposób właściwy, a wnioski sformułowane na jej podstawie są jasne i przekonujące. Umiejscawia to rozprawę na tle innych badań w dziedzinie oraz właściwie identyfikuje problem badawczy. Autor w bibliografii zamieścił również 10 własnych prac związanych z tematem swojej rozprawy doktorskiej.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są właściwe?

Rozwiązaniem postawionego zagadnienia badawczego jest opracowany przez Autora mechanizm prewencyjnego przełączania ścieżek w sieci MANET, bazujący na estymowanym czasie dostępności łączy. Mechanizm ten został formalnie opisany (wzory 3-5), a następnie zaimplementowany w środowisku symulacyjnym OmNET++ i rzeczywistej sieci korzystającej z protokołu OLSR (algorytmy na rysunkach 7-13 oraz kody źródłowe w załączniku). Weryfikacja zaproponowanej metody bazuje zatem na badaniach symulacyjnych oraz testach rzeczywistej sieci MANET w kilku scenariuszach. Metody badawcze wybrano właściwie, a otrzymane wyniki badań w większości potwierdzają, że autorski mechanizm stanowi rozwiązanie postawionego zagadnienia. Jednak zarówno formalny opis metody jak i badania symulacyjne oraz weryfikacja nowej metody w rzeczywistej sieci zawierają pewne nieścisłości, które zostały opisane poniżej.

Analizując formalny zapis metody wyznaczania miary jakości łącza można zauważyć konflikt oznaczeń. Zarówno wzór 3 jak i wzór 4 określają wartość M , ale każdy w inny sposób. Podobnie jest w przypadku wzoru 5, gdzie wartość M_{curr} jest określana na dwa różne sposoby. Autor powinien rozróżnić oba warianty liczenia miary jakości w sposób formalny (z oraz bez odchylenia standardowego). We wzorze 5 brakuje także warunku $T \neq \mu_T$, a taka sytuacja również może mieć miejsce w praktyce. Z kolei przechodząc od formalnego modelu w kierunku jego weryfikacji, Autor rozprawy w niektórych scenariuszach zaczyna stosować wariancję

zamiast odchylenia standardowego. Prawdopodobnie nie zmienia to charakteru zaproponowanej metody, ale jednak wpływa na wartości łączy, które decydują o zachowaniu protokołu routingu (wcześniejsze lub późniejsze przełączenie tras).

W przypadku opisu implementacji nowej metody pojawiają się pewne drobne błędy w oznaczeniach, np. μ zamiast μ_T na stronie 32 czy opis $\delta_{\text{disconnection_curr}}$ jako „*poprzednia wartość odchylenia standardowego czasów połączenia*” zamiast „*aktualna wartość odchylenia standardowego czasów rozłączenia*” (strona 36). W przypadku badań symulacyjnych i testach w sieci rzeczywistej istotna jest kwestia przyjętej metodyki i odpowiedniej analizy błędów pomiarowych. Niestety niektóre z podanych wyników badań nie zawierają informacji o błędach pomiarowych – przykładowo wyniki na rysunku 15 (prawdopodobieństwo połączenia w zależności od liczby węzłów) czy rysunku 17 (prawdopodobieństwo połączenia w zależności od interwału wiadomości kontrolnych). Znajomość niepewności pomiarów zwiększyłaby wiarygodność przedstawianych wyników i wniosków, np. że „*zmniejszanie interwału dla wiadomości kontrolnych w żaden sposób nie wpływa zmniejszenie bezwładności protokołu routingu*” czy wniosek o zmniejszeniu sprawności parametru PDR_R o ok. 0,01 (rysunek 19). W większości scenariuszy badawczych podawane są informacje o warunkach testów, ale brakuje danych o metodyce pomiarów: ile pomiarów zebrano i czy są to wartości średnie (np. badania symulacyjne przedstawione na stronach 48-49, wyniki badań przedstawione na rysunku 27) lub jaka była liczba węzłów w przypadku wyników badań przedstawionych na rysunku 17.

Pomimo wspomnianych niedoskonałości zastosowanych metod badawczych, ostatecznie Autor potwierdził tezę, że estymacja stabilności łączy oraz zastosowanie na jej podstawie mechanizmu decyzyjnego realizującego prewencyjne przełączanie tras routingu zapewnia poprawę efektywności funkcjonowania protokołów routingu dedykowanych dla mobilnych sieci Ad-Hoc. Dla ścisłości należy wspomnieć, że w tezie znalazło się stwierdzenie, iż taki mechanizm jest w stanie zapewnić „*znaczącą poprawę*”. Choć jak pokazały badania, w ogólności nie zawsze występuje taka poprawa, a czasem jest ona niewielka, to jednak istnieją scenariusze, w których poprawa efektywności jest znacząca (większe sieci czy węzły ze szczególnymi modelami ruchu).

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalny dorobek opisany w rozprawie doktorskiej dotyczy nowej metody minimalizacji strat pakietów w sieciach MANET. Koncentruje się ona na możliwości prewencyjnego przełączania tras routingu – jeszcze przed utraceniem możliwości transmisji jednego z węzłów pośredniczących. Metoda nie polega na modyfikacji działania samego protokołu routingu, ale dodatkowym mechanizmie, który wpływa na wybór ścieżek. Routing w sieci MANET przebudowuje trasy odpowiednio wcześniej, tak aby uniknąć połączeń z węzłem tracącym możliwość komunikacji. Samodzielny wkład Autora rozprawy jest istotny oraz oryginalny w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki. Recenzent wyodrębnił cztery najważniejsze oryginalne elementy rozprawy, które zostały krótko podsumowane poniżej.

- Zaproponowano, że węzły sieci same będą budowały wiedzę o czasach połączeń i rozłączeń z sąsiednimi węzłami, dzięki czemu zyskują możliwość predykcji dostępności tych węzłów. Czasy te są zapisywane lokalnie w strukturze nazwanej lokalną bazą danych łączy (LBDŁ). Przyjęto, że na podstawie danych z LBDŁ węzeł będzie w stanie oszacować, czy i przez jaki czas sąsiedni węzeł może przekazywać dane oraz kiedy należy wykluczyć go ze ścieżki routingu i znaleźć inne połączenie. Dodatkowo zaproponowano, aby protokół routingu brał pod uwagę estymowaną wartość średnią czasu połączenia dopiero, gdy zrealizowane zostaną wielokrotne pomiary czasu połączenia. Dzięki temu unika się znaczących fluktuacji wartości średniej.

- Zaproponowano dwie miary jakości łącza (nazwane w pracy „metryką łącza”). Pierwsza to odpowiednio przeskalowana odwrotność estymowanego średniego czasu połączenia węzła (wzór 3), a druga uwzględnia dodatkowo zmienność czasów dostępności poprzez uzależnienie miary od wartości odchylenia standardowego (wzór 4). W drugim przypadku można oszacować na ile przewidywalnym zachowaniem cechuje się dany węzeł. Założono, że czym większe wartości „metryki łącza” tym jakość tego łącza jest gorsza.
- Przedstawiono mechanizm tzw. „pogarszania wartości metryki”, który wraz z upływającym czasem zwiększa wartość zaproponowanej miary jakości łącza. Powoduje to, że łącze przestaje być odpowiednie dla protokołu routingu, gdy zwiększa się prawdopodobieństwo jego niedostępności (poprzez wiedzę o średnim czasie jego dostępności). Zaproponowano także, że mechanizm taki można dodatkowo uzależnić od przewidywalności zachowania węzła poprzez uwzględnienie odchylenia standardowego (zgodnie ze wzorem 5).
- Poprzez badania symulacyjne w środowisku OmNET++ oraz badania w rzeczywistej sieci Ad-Hoc z zaimplementowanym mechanizmem prewencyjnego przełączania tras określone zostały scenariusze, w których zaproponowane rozwiązanie pozwala na znaczącą poprawę efektywności. Na podstawie zebranych wyników określono jak zmienia się efektywność przy wzroście liczby węzłów oraz jaki wpływ ma zachowanie węzłów sieci MANET (model mobilności). Rezultaty badań mogą pomóc w decyzji czy w danych warunkach protokoł routingu powinien wspierać zaproponowaną metodę prewencyjnego przełączania ścieżek.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Przede wszystkim należy podkreślić, że rozprawa doktorska jest czytelna, a przedstawione mechanizmy, szczegóły implementacyjne i badania weryfikacyjne wystarczająco jasno opisane. Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. Recenzent nie miał trudności ze zrozumieniem treści pracy. Poniżej opisano uwagi językowe, edycyjne i związane z prezentacją wyników, jednak obniżają one jakość pracy w niewielkim stopniu i nie zmieniają ogólnej pozytywnej oceny rozprawy.

Przy uważnym czytaniu można znaleźć pojedyncze błędy językowe i literówki, np.: „*nemer*” (str. 9), „*prze co*” (str. 18), „*metropolitarny*” (str. 23). Licznie powtarza się błąd: „*nie mniej jednak*”. Czasem występują kolokwializmy i fragmenty wymagające zredagowania pod względem językowym, np.: „*szacowane z modeli matematycznych*” (lepiej brzmiałoby „*szacowane przy użyciu modeli matematycznych*”); „*mierzone z rozdzielczością w osi czasu 1 sekunda*”, czy „*ruch służbowy*” (prawdopodobnie Autorowi chodziło o ruch sygnalizacyjny w sieci). Struktura dokumentu jest w większości prawidłowa, choć niektóre fragmenty można udoskonalić, np. jednozdaniowy akapit pod rysunkiem 22 na stronie 55 powinien być zintegrowany z tekstem pierwszego akapitu. Niektóre błędy są związane ze szczegółami technicznymi, ale są łatwe do wyłapania i nie powodują niejasności (np. w akapicie nad rysunkiem 3 pojawia się nazwa protokołu OLSR, choć dotyczy protokołu AODV). Często znak minus jest stosowany jako myślnik (znak interpunkcyjny). Występują niepotrzebne spacje pomiędzy liczbą a znakiem %.

Strona edytorska pracy jest w większości poprawna. Niektóre rysunki powinny być lepszej jakości (np. wykresy na rysunku 20). Zdarzają się rysunki z błędnymi oznaczeniami (na rysunku 17 zamiast PCR powinno być RCP) czy elementami dyskusyjnymi (np. na rysunku 15 oś pionowa określająca prawdopodobieństwo ma oznaczoną wartość 1,2 czy ciągłe linie na wykresach, w których elementy stanowią zbiór liczb naturalnych – przykładowo liczba węzłów

na rysunku 16). Występują liczne problemy z odwoływaniem się do rysunków czy tabel poprzez dwukropek lub określenie „poniżej”/”powyżej” – zamiast tego Autor powinien używać odnośników do rysunków i tabel po ich numerach. Poza tym zdania z odnośnikami bywają niegramatyczne i niepotrzebne używane są duże litery, np. „*Na Rysunek 21 przedstawiona została...*”. Dodatkowo – warto byłoby oznaczyć odpowiednio numerowanymi listingami fragmenty tekstu zawierające kod źródłowy (np. skrypt na stronie 57).

Recenzent ma także uwagi do prezentacji wyników. W rozprawie incydentalnie zdarza się, że w zapisie ułamek dziesiętnego zastosowano kropkę zamiast przecinka (np. zysk w tabeli 11). Szkoda również, że zmienne w tekście nie zawsze są pisane kursywą. Ostatnia uwaga jest związana z badaniami eksperymentalnymi i dotyczy sposobu prezentacji wyników w tabelach 8-11 (sprawność realizacji usług): niepewności eksperymentalne powinny być zaokrąglane, zwykle do jednej liczby znaczącej, a z kolei ostatnia cyfra znacząca wyniku powinna być zwykle tego samego rzędu co niepewność.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

O pewnych słabych stronach rozprawy związanych z metodami badawczymi czy prezentacją wyników recenzent wspominał już w poprzednich punktach. Poniżej przedstawione zostały te, które są kluczowe dla ocenianej rozprawy doktorskiej.

- Miarę jakości łącza nazwano w rozprawie metryką. Niestety, nie zweryfikowano czy spełnia ona formalne cechy charakteryzujące metrykę w zbiorze. Autor powinien wcześniej udowodnić, że w tym przypadku mamy do czynienia z przestrzenią metryczną, a dopiero później użyć tego określenia jako miary jakości łącza. Dodatkowo warto byłoby zadbać o konsekwentne stosowanie tego pojęcia, gdyż w tekście zdarza się, że jako metryka rozumiana jest zarówno miara jak i wartość tej miary.
- Wyznaczając miarę jakości łącza jako odwrotność estymowanej wartości średniej czasu połączenia, Autor przyjął także pewną liczbę, aby przeskalać wartości. We wzorach 3-5 wartość ta wynosi 1000. Brak jednak wyjaśnienia dlaczego przyjęto taką właśnie wartość a nie inną oraz jak zmiana tej wartości wpływa na działanie protokołów routingu. Szczególnie, że podczas implementacji najprawdopodobniej wybrano inną skalę: w formule zaprezentowanej na stronie 39 widnieje wartość 1000000.
- Opisując mechanizmy wyznaczania wartości średniej i odchylenia standardowego (strona 36) Autor używa wielkości *times_count*. Niestety w rozprawie brak szczegółowych informacji o tej wielkości oraz dyskusji na jej temat. Jest to o tyle istotne, że w przypadku opisywanej metody najprawdopodobniej pod uwagę brane są przede wszystkim dwie wielkości: obecnie wyznaczony i poprzedni czas. Zatem nie jest jasne czy wielkość *times_count* w opisywanej metodzie wynosi zawsze 2, czy może zostały przewidziane jakieś mechanizmy pozwalające na zwiększenie liczby historycznych próbek i wielkość ta może być znacznie większa.
- Analiza wyników i błędów pomiarowych w rozprawie powinna być bardziej staranna – zarówno w przypadku badań symulacyjnych jak i eksperymentów w rzeczywistej sieci Ad-Hoc. W niektórych scenariuszach brakuje także istotnych szczegółów co do zastosowanej metodyki lub przyjętych warunków testowych. Na szczęście w kluczowych eksperymentach informacje te są dostępne i pozwoliły udowodnić tezę rozprawy. Autor rozprawy powinien jednak bardziej uważać podczas interpretacji uzyskanych wyników. Podczas podsumowania badań w sieci rzeczywistej, poprawnie stwierdzono, że sprawności realizacji usługi dla zmodyfikowanego protokołu jest większa niż dla oryginalnego protokołu. Jednak Autor wyciągnął zbyt daleko idące wnioski co do obu modyfikacji, stwierdzając: „*Wbrew przekonaniu, iż uwzględnienie wariancji powinno pozytywnie wpłynąć na poprawę jakości usług transmisji widać, że spowodowała ona*

poprawę, jednak w mniejszym stopniu niż przy jej nieuwzględnianiu”. Niestety – biorąc pod uwagę niepewności wartości PDR widoczne na wykresie (rysunek 28) – otrzymane wyniki nie pozwalają na taki wniosek.

- W rozprawie niejako zamiennie stosuje się pojęcia: odchylenie standardowe oraz wariancja. Z jednej strony wzory 4-5 zakładają wyznaczenie miary jakości łączy poprzez odchylenie standardowe, ale już wyniki z rysunku 6 bazują na zastosowanie wariancji. Również testy weryfikacyjne nie są pod tym względem spójne – na stronie 37 podano informację, że w implementacji rzeczywistej zastosowano wariancję zamiast odchylenia standardowego. Wpływa to na możliwość przeprowadzenia wiarygodnej analizy porównawczej wyników symulacyjnych i pomiarów rzeczywistych. Być może któraś wielkość jest lepsza do wyznaczenia jakości łączy, a może się to zmienia w zależności od warunków. Prawdopodobnie jest to potencjalny kierunek dalszych badań.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Recenzent wysoko ocenia przydatność ocenianej rozprawy doktorskiej dla nauk technicznych. Jak już wspomniano – rozprawa dotyczy realnego problemu we współczesnych sieciach MANET. Autor zaproponował i udowodnił, że metoda estymacji łączy i prewencyjnego przełączania tras może zwiększyć efektywność komunikacji w mobilnych sieciach Ad-Hoc. W związku z tym wyniki mają praktyczne zastosowanie. Szczególnie, że weryfikacja działania metody odbyła się również w realnej sieci przy wykorzystaniu fizycznych urządzeń. Opracowane rozwiązanie może być zastosowane w sieciach MANET budowanych do celów wojskowych czy jednostek reagowania kryzysowego. Warto także zauważyć, że w ramach realizacji rozprawy doktorskiej powstała modyfikacja istniejącej implementacji protokołu routingu OLSR, która wspiera funkcjonalność zaproponowanego mechanizmu prewencyjnego przełączania tras. W związku z tym opracowany kod źródłowy może zostać wykorzystany w sprzętowej implementacji istniejących urządzeń radiowych.

8. Konkluzja – do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- ~~a) niespełniająca wymagań stawianych rozprawom przez obowiązujące przepisy~~
- ~~b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania~~
- c) spełniająca wymagania**
- ~~d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem~~
- ~~e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie~~

9. Uzasadnienie

Biorąc po uwagę wszystkie wspomniane aspekty rozprawy doktorskiej, moja końcowa konkluzja jest jednoznacznie pozytywna. Autor zaprezentował w rozprawie ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie i przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego – metodę estymacji stabilności łączy w mobilnych sieciach Ad-Hoc, umożliwiającą prewencyjne przełączanie tras routingu i tym samym zwiększenie efektywności przesyłania danych w takich środowiskach. Rozwiązanie to zostało zweryfikowane poprzez badania symulacyjne i testy w rzeczywistym środowisku. Tym samym Autor rozprawy potwierdził umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia wymagania *Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* oraz wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr. inż. Rafała Brysia do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

