

Prof. dr hab. inż. Jacek Stefański  
Politechnika Gdańska  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki  
Katedra Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Gdańsk, dnia 01.06.2023 r.

Rada Naukowa Dyscypliny  
INFORMATYKA TECHNICZNA  
I TELEKOMUNIKACJA  
Sekretariat  
Data wpływu.....16.06.2023 r.....  
Numer.....

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**pt. *Adaptive Method for Indoor Positioning of Moving Objects***

**autorstwa mgr inż. Marcina Kołakowskiego, opracowana na podstawie pisma  
przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna  
i Telekomunikacja z Politechniki Warszawskiej z dnia 17 kwietnia 2023 r.**

#### **1. Tematyka rozprawy**

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej koncentruje się na problemie poprawy dokładności estymacji położenia obiektów ruchomych w środowisku wewnątrzbudynkowym z zastosowaniem ultraszerokopasmowego UWB (*Ultra-WideBand*) oraz wąskopasmowego BLE (*Bluetooth Low Energy*) interfejsu radiowego. Nowością w zaproponowanej metodzie jest adaptacyjny dobór jej parametrów na podstawie znanego rozkładu pomieszczeń oraz zarejestrowanych danych historycznych o położeniu obiektów. Metoda ta jest niezależna od stosowanych algorytmów wyznaczania położenia obiektów i może stanowić cenne uzupełnienie istniejących rozwiązań, gdyż umożliwia właściwą selekcję i korekcję wyników pomiarowych przed procesem estymacji położenia. Testy funkcjonalne poprawności działania zaproponowanej metody zostały przeprowadzone w sieciach radiowych bazujących na pomiarach różnicy czasów nadejścia sygnałów radiowych TDoA (*Time Difference of Arrival*) – w interfejsie UWB oraz mocy sygnałów odbieranych RSS (*Received Signal Strength*) – w interfejsie BLE.

Zatem tematyka poruszana w rozprawie jest ważna i aktualna, ukierunkowana na praktyczne rozwiązania w obszarze nowych technik oraz wpisuje się w tzw. wszechobecne przetwarzanie danych o położeniu obiektów (*ubiquitous positioning*), ze szczególnym uwzględnieniem środowisk wewnątrzbudynkowych.

W rozprawie Doktorant podjął się udowodnienia naukowymi metodami następującej tezy (tłumaczenie z języka angielskiego): *możliwe jest zmniejszenie błędów estymacji położenia*

*poruszających się obiektów bez modyfikowania zastosowanego algorytmu pozycjonowania, poprzez uwzględnienie rozkładu pomieszczeń w środowisku wewnątrzbudynkowym i danych historycznych opisujących ruch lokalizowanego obiektu.*

Do udowodnienia przyjętej tezy, która brzmi jednoznacznie, Autor zastosował metodę eksperymentalną, polegającą na przeprowadzeniu:

- badań symulacyjnych z uwzględnieniem właściwości ultraszerokopasmowego oraz wąskopasmowego interfejsu radiowego,
- badań pomiarowych w warunkach rzeczywistych.

Opracowana metoda ma duży potencjał aplikacyjny. Została z powodzeniem zastosowana do poprawy dokładności estymacji położenia obiektów w sieci pilotowej UWB/BLE zbudowanej w ramach projektu IONIS (*NITICSplus – Indoor and Outdoor Solution for Dementia Challenges*), który był realizowany w Instytucie Radioelektroniki i Technik Multimedialnych Politechniki Warszawskiej.

Na zakończenie tego punktu należy stwierdzić jednoznacznie, że tytuł, cel i teza rozprawy zostały przez Doktoranta sformułowane poprawnie i wystarczająco jasno.

## **2. Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Kołakowskiego została zredagowana na 129 stronach, w postaci sześciu rozdziałów, w tym wstępu i podsumowania, oraz spisu literatury zawierającego 110 pozycji, a także pięciu dodatków. W rozprawie znajduje się również wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz spis rysunków i tabel. W spisie literatury znajduje się aż 12 pozycji autorstwa i 10 współautorstwa Doktoranta oraz aktualne pozycje innych autorów z uznanych czasopism zagranicznych i konferencji o zasięgu międzynarodowym, jak również 7 odnośników do stron www. Wszystkie pozycje literaturowe są przynajmniej raz zacytowane w tekście głównym rozprawy.

We wstępie Autor przedstawił motywacje zajęcia się tematyką radiolokalizowania obiektów wewnątrz budynków, jednocześnie wskazując na trzy istotne uwarunkowania, które wpływają na dokładność estymacji położenia w tym środowisku: brak bezpośredniej widoczności anten urządzeń w sieci radiolokalizacyjnej – częste występowanie warunków NLoS (*Non-Line of Sight*), niekorzystny wpływ ciała użytkownika na opóźnienie i tłumienie sygnałów radiowych oraz nieoptymalne rozmieszczenie elementów sieci związane m.in. z ograniczonym dostępem do zasilania, bezpieczeństwem użytkownika, a także względami estetycznymi. W celu minimalizacji błędów określania położenia obiektów, Doktorant



zapropował podejście adaptacyjne, które zostało rozwinięte w dalszej części niniejszej rozprawy.

Rozdział drugi zawiera opis typowej architektury wewnątrzbudynkowego systemu radiolokalizacyjnego wraz z najczęściej stosowanymi algorytmami estymacji położenia obiektów oraz przegląd, na podstawie światowej literatury, aktualnego stanu wiedzy w obszarze adaptacyjnych metod lokalizacyjnych. W rozdziale tym Autor skupił się przede wszystkim na klasyfikacji adaptacyjnych metod lokalizacyjnych, wskazując trzy główne etapy procesu estymacji położenia obiektów, w których stosowana jest adaptacja. Pierwsza grupa (*measurement results pre-processing*) obejmuje metody wstępnego przetwarzania wyników pomiarów wykonywanych przez infrastrukturę sieci radiolokalizacyjnej. Metody wykorzystują informacje o sieci i jej otoczeniu do selekcji, modyfikacji i ważenia wyników pomiarów. Druga grupa (*algorithm parameters fitting*) jest najliczniejsza i obejmuje metody modyfikacji parametrów algorytmów lokalizacyjnych w celu zwiększania efektywności ich pracy w zależności od typu środowiska i zachowania użytkowników. Zakres modyfikowanych parametrów obejmuje tzw. mapy radiowe, modele propagacyjne oraz cechy charakterystyczne ruchu użytkownika. Do ostatniej grupy (*positioning results post-processing*) należą metody, które wykorzystują informacje o środowisku w celu modyfikacji końcowych wyników estymacji położenia obiektów. Stosowane są również, chociaż nadal jeszcze rzadko, metody hybrydowe, które wykorzystują adaptację na kilku ww. etapach procesu radiolokalizowania. Autor zwrócił również uwagę na szybki rozwój algorytmów sztucznej inteligencji (*artificial intelligence*) w zastosowaniach adaptacyjnych, czego efektem są coraz liczniejsze rozwiązania opisywane w literaturze.

Materiał przedstawiony w części teoretycznej, świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w przedmiocie rozważanego problemu, zaś wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu są jasne i merytorycznie poprawne.

W rozdziale trzecim Autor sformułował tezę rozprawy oraz opisał szczegółowo zaproponowaną adaptacyjną metodę lokalizacyjną, która składa się z trzech głównych etapów. W pierwszym, następuje selekcja wyników, które posłużą do estymacji położenia użytkownika. Wyniki te są wybierane na podstawie aktualnego położenia użytkownika i najkorzystniejszych dla niego węzłów referencyjnych. W kolejnym etapie, wyniki pomiarów są korygowane pod kątem eliminacji negatywnego wpływu wysoce niepewnych wyników na podstawie prognozowanego położenia użytkownika. Położenie użytkownika w tym etapie jest przewidywane przy użyciu dedykowanego modelu uczenia maszynowego, który początkowo był trenowany na symulowanych danych, a następnie dostrajany na podstawie

zarejestrowanych trajektorii ruchu użytkownika. W ostatnim, trzecim etapie zaktualizowane wyniki pomiarów przekazywane są do algorytmu estymacji położenia obiektu. W przeprowadzonych eksperymentach Doktorant zastosował estymator najmniejszych kwadratów LS (*Least Squares estimator*) oraz rozszerzony filtr Kalmana EKF (*Extended Kalman Filter*).

W rozdziale czwartym Doktorant opisał rezultaty badań symulacyjnych zaproponowanej metody adaptacyjnej. Symulator został opracowany w języku programowania Python i uwzględnia istotne zjawiska występujące w kanale radiowym, takie jak opóźnienie i tłumienie propagacyjne oraz warunki NLoS pomiędzy węzłami referencyjnymi i lokalizowanym użytkownikiem. Obszar środowiska wewnątrzbudynkowego został ograniczony do mieszkania o powierzchni użytkowej 50 m<sup>2</sup>, które podzielono na sześć stref oddzielonych ścianami. Na całej powierzchni tego środowiska rozlokowano również typowe wyposażenie mieszkalne oraz zaproponowano rozmieszczenie sześciu stacji referencyjnych. Ponadto, podczas testowania efektywności pracy adaptacyjnej metody lokalizacyjnej przyjęto, że poszczególne stacje referencyjne realizują pomiary z częstotliwością kilku herców. Głównym wynikiem przeprowadzonych badań symulacyjnych były rodziny krzywych estymat dystrybuanty błędu bezwzględnego położenia użytkownika dla różnych parametrów systemowych. Z otrzymanych rezultatów jednoznacznie wynika poprawa dokładności lokalizowania użytkowników w środowisku wewnątrzbudynkowym stosując metodę adaptacyjną, zaproponowaną przez Doktoranta, w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi.

Rozdział piąty dotyczy badań pomiarowych, mających na celu praktyczną weryfikację opracowanej metody adaptacyjnej. Środowisko pomiarowe było identyczne z przyjętym modelem do badań symulacyjnych. Badania pomiarowe zostały zrealizowane w ramach projektu IONIS, w którym testom poddawano dwa rozwiązania systemu radiolokalizacyjnego, bazującego na pomiarach TDoA i mocy sygnałów odbieranych RSS. W każdym z tych przypadków dokładność estymacji położenia użytkowników była większa dla metody adaptacyjnej w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi, co ostatecznie potwierdziło wyniki badań symulacyjnych. Na zakończenie tego rozdziału Doktorant na podstawie wybranych pozycji literaturowych przeprowadził analizę porównawczą dokładności estymacji położenia użytkowników w różnych wewnątrzbudynkowych systemach radiolokalizacyjnych na tle opracowanej metody adaptacyjnej. Z punktu widzenia recenzenta, z uwagi na brak możliwości odniesienia się do jednoznacznie przyjętych założeń systemowych we wszystkich analizowanych rozwiązaniach, porównanie to ma jedynie wartość pogładową.



W dodatkach do rozprawy, Autor zdefiniował m.in. parametry jakościowe przy ocenie efektywności pracy metod lokalizacyjnych, w tym błąd bezwzględny położenia użytkownika oraz tzw. błąd trajektorii ruchu użytkownika, a także szczegóły implementacyjne środowiska do badań symulacyjnych, skróconą analizę wpływu środowiska i ciała użytkownika na wyniki pomiarów oraz podstawowe informacje o systemie radiolokalizacyjnym, opracowanym w ramach projektu IONIS.

### 3. Uwagi ogólne i szczegółowe

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kołakowskiego jest napisana w języku angielskim w dobrym stylu. Całość stanowi interesującą, zwięzłą lekturę naukową, przystępną dla czytelnika. Wyciągane przez Doktoranta wnioski na podstawie zgromadzonego materiału badawczego (symulacyjnego i pomiarowego) są prawidłowe i jednoznaczne.

Do realizacji predykcji położenia użytkownika, Autor zaproponował architekturę sieci głębokiego uczenia składającą się z trzech sekcji: sieci spłotowej 1D, sieci rekurencyjnej z komórkami pamięci oraz warstwy w pełni połączonej. Warto zauważyć, iż zgodnie z opisem, poprawnie dobrano poszczególne sekcje architektury, które mają na celu kolejno wyekstrahować cechy charakterystyczne zmian położenia użytkownika, a następnie na podstawie tychże cech dokonać predykcji estymaty położenia użytkownika, wykorzystując zarówno informacje o zmianach krótkookresowych jak i długookresowych – co umożliwiają sieci LSTM (*Long-Short Term Memory networks*). W tym miejscu warto podkreślić, że zaproponowana kaskadowa architektura sieci spłotowej oraz sieci rekurencyjnej jest znana w literaturze, jednak sposób jej zastosowania w niniejszej dysertacji należy uznać za wartość dodaną w kontekście rozważań radiolokalizacyjnych. Po lekturze tej części rozprawy doktorskiej odczuwa się pewien niedosyt związany przede wszystkim z:

- brakiem informacji dotyczących metodyki wyboru architektury sieci oraz wyników procesu uczenia sieci, na podstawie których dana architektura została wybrana, a co za tym idzie jaka jest zależność wielkości poszczególnych elementów architektury względem rozmiaru analizowanych danych historycznych;
- brakiem wyjaśnienia parametru *None* w strukturze sieci, który odnosi się prawdopodobnie do wielkości zbiorów danych wejściowych (*batch*);
- brakiem wyjaśnienia jak warstwa normalizująca (*Flatten*) wpływa na sposób przetwarzania danych w pierwszej warstwie LSTM, ponieważ rozmiary danych wyjściowych nadal stanowią tablicę dwuwymiarową, a nie wektor i są takie same jak rozmiar macierzy wejściowej;

- brakiem określenia wrażliwości modelu na lukę w danych o położeniu użytkownika (z uwagi na możliwość wystąpienia nieciągłości danych lokalizacyjnych, Autor rozwiązał problem poprzez uzupełnianie macierzy wejściowej danymi z ostatniego poprawnego pomiaru), czyli zależności efektywności opracowanego modelu jako funkcji liczby kolejno brakujących estymat.

Forma redakcyjna rozprawy jest na wysokim poziomie, nie znaleziono również istotnych niedociągnięć natury językowej i pojęciowych.

#### **4. Osiągnięcia zawarte w rozprawie**

Oryginalny wkład Autora rozprawy w rozwój systemów radiolokalizacyjnych został opisany w rozdziałach od trzeciego do piątego. W rozdziale trzecim Doktorant szczegółowo opisał adaptacyjną metodę lokalizacyjną, która bazuje na oryginalnej strukturze sieci głębokiego uczenia do prognozowania położenia użytkownika. W kolejnych dwóch rozdziałach opracowana metoda została poddana wnikliwym badaniom symulacyjnym i pomiarowym. W każdym z tych badań jednoznacznie wynika, że stosowanie metody adaptacyjnej zwiększa efektywność estymacji położenia użytkowników w środowisku wewnątrzbudynkowym w porównaniu z rozwiązaniami, które przyjęto nazywać klasycznymi. Przykładowo, z przeprowadzonych pomiarów wynika, że dla dwóch testowanych interfejsów radiowych UWB i BLE poprawa ta sięga nawet 20 %.

Podsumowując, Autor rozwiązał postawione zadanie przy użyciu właściwych metod (symulacyjnej i pomiarowej), stosując przy tym uzasadnione założenia.

#### **5. Wniosek końcowy**

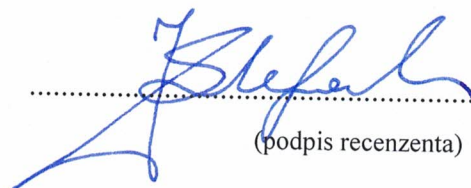
Na podstawie niniejszej recenzji można stwierdzić, że mgr inż. Marcin Kołakowski:

- przedłożył do oceny rozprawę doktorską pt. *Adaptive Method for Indoor Positioning of Moving Objects*, spełniającą wymagania stawiane tego typu pracom;
- podjął ważną, ciekawą i aktualną tematykę badawczą o dużym znaczeniu użytkowym, związaną z zagadnieniami lokalizowania obiektów w środowisku wewnątrzbudynkowym;
- opracował, zaimplementował oraz przetestował w warunkach rzeczywistych adaptacyjną metodę estymacji położenia obiektów ruchomych, przeznaczoną do stosowania w ultraszerokopasmowym oraz wąskopasmowym interfejsie radiowym.

Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić jednoznacznie, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na

wysoki poziom wiedzy teoretycznej z dyscypliny *informatyka techniczna i telekomunikacja*, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta. Zatem **opiniowana praca mgr inż. Marcina Kołakowskiego spełnia wymagania ustawowe i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Ponadto, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny rozprawy, a także aktywność naukową Doktoranta, wyrażającą się m.in. licznymi i samodzielnymi publikacjami w prestiżowych czasopismach i prezentacjami referatów na renomowanych konferencjach międzynarodowych w tematyce ściśle powiązanej z rozprawą, **wnoszę o jej wyróżnienie.**

  
.....  
(podpis recenzenta)