

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 12.10.2021 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

pt. *Nowe metody bezprzewodowej synchronizacji w ultraszerokopasmowych systemach lokalizacyjnych* autorstwa mgr inż. Vitomira Djaja-Joško, opracowana na podstawie pisma dziekana Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej z dnia 20 września 2021 r.

1. Tematyka rozprawy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej koncentruje się na problemie synchronizacji w sieciach radiolokalizacyjnych, wykorzystujących ultraszerokopasmowy interfejs UWB (*Ultra-Wideband*) i opartych na pomiarze różnicy czasów nadejścia sygnałów radiowych TDoA (*Time Difference of Arrival*). Efektywny proces synchronizacji w tego typu sieciach wprost przekłada się na dokładność estymacji położenia obiektów (etykiet). Zatem tematyka poruszana w rozprawie jest ważna i aktualna oraz wpisuje się w stosunkowo nową dziedzinę badań, związanych z tzw. wszechobecnym przetwarzaniem danych o położeniu obiektów (*ubiquitous positioning*) i ukierunkowanych na praktyczne rozwiązania w obszarze nowych technik. Autor w rozprawie zaproponował dwie oryginalne metody bezprzewodowej synchronizacji w tego typu sieciach, to znaczy z tzw. wyzwalaną transmisją pakietów referencyjnych oraz z okresową transmisją pakietów referencyjnych. Opracowane metody synchronizacji różnią się między sobą sposobem wyzwalania transmisji pakietów synchronizacyjnych, jak i możliwą do wykorzystania liczbą węzłów referencyjnych.

W rozprawie Doktorant podjął się udowodnienia naukowymi metodami następujących tez:



- *możliwe jest bezprzewodowe synchronizowanie węzłów w ultraszerokopasmowym systemie lokalizacyjnym z wykorzystaniem węzłów referencyjnych;*
- *opracowane metody są skutecznym środkiem do synchronizacji węzłów w praktycznych realizacjach ultraszerokopasmowych systemów lokalizacyjnych.*

Do udowodnienia przyjętych tezy, które brzmią jednoznacznie, Autor zastosował przede wszystkim metodę eksperymentalną, polegającą na przeprowadzeniu:

- badań symulacyjnych w samodzielnie opracowanym środowisku programowym z uwzględnieniem reprezentatywnych zjawisk, które mogą wystąpić w warunkach rzeczywistych,
- badań pomiarowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistości.

Opracowane metody mają duży potencjał aplikacyjny. Zostały one z powodzeniem zastosowane do synchronizacji węzłów w dwóch pilotowych sieciach ultraszerokopasmowych zbudowanych w ramach projektów prowadzonych w Instytucie Radioelektroniki i Technik Multimedialnych Politechniki Warszawskiej.

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

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Vitomira Djaja-Joško została zredagowana na 151 stronach, w postaci dziesięciu rozdziałów, w tym wstępu i podsumowania, oraz spisu literatury zawierającego 98 pozycji, a także dziesięciu dodatków. W rozprawie znajduje się również wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz spis rysunków i tabel. W spisie literatury znajduje się aż 31 pozycji autorstwa lub współautorstwa Doktoranta oraz aktualne pozycje innych autorów z uznanych czasopism zagranicznych i konferencji o zasięgu międzynarodowym, jak również 10 odnośników do stron www. Dobrą praktyką jest sporządzanie spisu literatury alfabetycznie. Warto również w tego typu pracach ujednoczyć pisownię tytułów angielskich oraz przy każdej pozycji literaturowej wpisać (obecnie standard) identyfikator dokumentu elektronicznego DOI (*Digital Object Identifie*), jeżeli taki istnieje. Wszystkie pozycje literaturowe są przynajmniej raz zacytowane w tekście głównym rozprawy.

We wstępie Autor zdefiniował cel rozprawy i jej zawartość. W pierwszych akapitach tego rozdziału można znaleźć sformułowanie *błąd wyznaczania lokalizacji obiektu*. Według recenzenta jest ono nieprecyzyjne i występuje w różnych miejscach pracy. Zgodnie z przywoływanym w dalszej części rozprawy słownikiem języka polskiego

PWN lokalizacja to m.in. *umieszczenie, rozmieszczenie; ustalenie miejsca budowy jakichś obiektów ...*, czyli definicja ta sugeruje pewien proces, który prowadzi w naszym przypadku do wyznaczenia (estymacji) położenia obiektu. Zatem w myśl przytoczonej definicji poprawniej będzie *błąd wyznaczania położenia (pozycji) obiektu*. Rozdział drugi stanowi krótkie wprowadzenie do radiowych systemów lokalizacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań ultraszerokopasmowych. Także w tym rozdziale Autor nie ustrzegł się od drobnych błędów językowych. Przykładowo, posługuje się pojęciem *poziom odbieranego sygnału*, co z oczywistych względów jest mylące. W tym przypadku wynika to z błędnego tłumaczenia angielskiego odpowiednika RSS (*Received Signal Strength*), czyli jest to po prostu *moc sygnału odbieranego*. Czasami Doktorant stosuje skrót myślowe typu *estymacja kanału* – chodzi zapewne o *estymację charakterystyki kanału*.

W trzecim rozdziale Doktorant zdefiniował pojęcie synchronizacji węzłów w sieciach radiolokalizacyjnych, opisał ogólny model węzła i przeprowadził analizę aktualnego stanu światowej literatury w tej dziedzinie. W tym rozdziale, jak i w dalszej części pracy zauważa się pewne niedociągnięcia redakcyjne w stosunku do edycji zależności i zmiennych występujących w tych zależnościach, a wymienianych w tekście głównym rozprawy. Stosowane są tu różne czcionki (najprawdopodobniej *Calibri* i *Time New Roman*), raz pisane czcionką prostą, a raz typu *Italic*. Ponadto, według recenzenta, dla przejrzystości śledzenia toku myślenia Doktoranta wzory, rysunki i tabele powinny być numerowane w odniesieniu do numeru rozdziału, a nie w sposób ciągły.

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 czwartym Autor sformułował tezy oraz zakres pracy. Ponadto, w celu udowodnienia postawionych tez sformułował kryterium jakościowe. Założył mianowicie, że bezprzewodowe synchronizowanie węzłów jest możliwe wtedy, kiedy osiągnięta jest niepewność (błąd) wyznaczania różnicy czasów przybycia pakietów (TDoA) mniejsza od 2 ns.

Rozdział piąty Doktorant poświęcił na szczegółową analizę opracowanych metod synchronizacji. Rozdział ten zawiera m.in. opisy zasad działania każdej z metod, schematy transmisji pakietów oraz zależności do wyznaczania wartości czasów TDoA. Pewne uwagi edycyjne można sformułować również i dla tego rozdziału. Doktorant

często stosuje „zagęszczanie” podpunktów bez komentarza pomiędzy nimi, np. 5; 5.1; 5.1.1.

W rozdziale szóstym Autor zamieścił analizę błędów wyznaczania wartości TDoA z wykorzystaniem opracowanych metod. Wyprowadził zależności na niepewności wyników pomiarów TDoA oraz wyznaczył ich graniczne wartości. W rozdziale tym, Doktorant często stosuje sformułowanie, że wartość danego współczynnika jest *bardzo bliska jedności*, które brzmi trochę sztucznie – wystarczy *bliska jedności*.

W rozdziale siódmym Doktorant opisał badania symulacyjne opracowanych metod. Przeprowadził analizę niepewności wyznaczania czasów TDoA, jak i badania wpływu liczby etykiet na liczbę poprawnie odebranych pakietów dla różnych scenariuszy wykorzystania opracowanych metod. Rozdział ten, bogaty w materiał analityczny, miejscami sprawia wrażenie raportu technicznego, a nie rozprawy doktorskiej. Dopiero w ostatnim podpunkcie tego rozdziału można znaleźć wnioski do otrzymanych wyników symulacyjnych. Recenzent w rozdziale tym znalazł również potoczne sformułowania, np. typu *słabych sygnałów*.

Rozdział ósmy dotyczy badań pomiarowych, mających na celu praktyczną weryfikację opracowanych metod. Doktorant opisał warunki badań oraz przeanalizował otrzymane wyniki. Tabela 9 zawiera takie same informacje jak tabela 6, zatem wystarczyło powołać się w tekście na wcześniejszą tabelę.

Z kolei, w rozdziale dziewiątym Autor porównał opracowane metody synchronizacji. Jednak rozdział ten objętościowo wyraźnie odbiega od pozostałych (liczy tylko dwie strony) i według recenzenta rozdział ten może być częścią podsumowania rozprawy, która ponad to zawiera wyszczególnienie prac zrealizowanych przez Doktoranta, także krytyczną ocenę opracowanych metod synchronizacyjnych oraz ich praktycznego zastosowania.

W dodatkach do rozprawy, Autor przedstawił wybrane rozszerzenia wyników badań, skrótowy opis standardu IEEE 802.15.4a oraz opisy systemów radiolokalizacyjnych wykorzystanych podczas badań pomiarowych. W dodatku H, Doktorant użył potoczne wyrażenia typu: *prędkości transmisji* (z oczywistych względów powinno być *szybkości transmisji*), *sterowanie mocą nadawania* (lepiej brzmi *sterowanie mocą sygnałów nadawanych*), będące najprawdopodobniej skutkiem pobieżnego tłumaczenia z języka angielskiego.

3. Uwagi ogólne i szczegółowe

Rozprawa doktorska mgr inż. Vitomira Djaja-Joško jest napisana w języku polskim. Całość stanowi interesującą, zwięzłą lekturę naukową, przystępną dla czytelnika. Wyciągane przez Doktoranta wnioski na podstawie zgromadzonego materiału badawczego są prawidłowe i jednoznaczne.

Jednak po lekturze rozprawy doktorskiej odczuwa się pewien niedosyt związany przede wszystkim z brakiem analizy porównawczej opracowanych metod synchronizacji węzłów z innymi metodami znanymi w literaturze. Doktorant zdaje sobie z tego sprawę, że nie dokonał takiej analizy, przytaczając wiele słusznych argumentów, które przemawiają za jej brakiem. Niemniej jednak, Autor rozprawy był współwykonawcą dwóch projektów o akronimach NITICS i IONIS, w których zostały zaimplementowane opracowane metody bezprzewodowej synchronizacji węzłów. Także była testowana metoda przewodowa¹, która mogła stanowić punkt odniesienia dla prac badawczych prowadzonych przez Doktoranta.

Do dyskusji podczas publicznej obrony doktoratu mgr inż. Vitomira Djaja-Joško pozostawiam dwie główne kwestie:

1. Na stronie 31, Autor założył, że bezprzewodowe synchronizowanie węzłów jest możliwe wtedy, kiedy osiągnięta jest niepewność (*błąd*) wyznaczania różnicy czasu przybycia pakietów (TDoA) mniejsza od **2 ns**. Natomiast na stronie 93, Doktorant analizując otrzymane wyniki pomiarów TDoA stwierdza, że wszystkie z proponowanych metod synchronizacji umożliwiają wyznaczenie wartości TDoA ze średnim błędem nieprzekraczającym **3 ns**. W świetle tego, jak należy interpretować te dwie różne wartości niepewności. Ponadto, warto w opisie otrzymanych rezultatów podać czas trwania całego cyklu pomiarowego, na podstawie którego otrzymano przytoczone wyniki.
2. Na stronie 100, Autor opisuje przykładowe wyniki estymacji położenia etykiet na podstawie pomiarów TDoA wykonanych przez węzły zsynchronizowane przy pomocy opracowanych metod. Do wyznaczenia położenia etykiet zastosowano filtr Kalmana, a błąd położenia nie przekraczał **0,5 m**, co przy wykazaniu we

¹ Badawika A., Kołakowski J., *UWB Positioning System Architecture Based on Paired Anchor Nodes*, 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON), 16-18 June 2014, Gdańsk, Poland, DOI: 10.1109/MIKON.2014.6899973

wcześniejszych badaniach pomiarowych, że niepewność pomiarów czasów TDoA jest nie gorsza niż 3 ns (**0,9 m**), wydaje się zbyt optymistyczną dokładnością. Dodatkowo, warto wyjaśnić sposób wyznaczania parametrów rozkładu normalnego podczas dopasowania tego rozkładu do histogramów z rys. 31, rys. 34 i rys. 36. W trakcie analizy otrzymanej do recenzji rozprawy zauważono nieznaczne uchybienia redakcyjne, do których można zaliczyć m.in.:

- niewłaściwa edycja spisu treści – nachodzenie się numerów stron z tytułami rozdziałów/podrozdziałów;
- strona 13, wiersz 5 od góry: ... *nawet o rząd o wielkości* ...;
- strona 27, wiersz 10 od dołu: ... *pakiety synchronizacyjne które są odbierane* ... (brakuje przecinka);
- przed pojawieniem się pojedynczej zależności na końcu zdania poprzedzającego znajduje się niczym nieuzasadniony znak „:” (dwukropka);
- strona 50, wiersz 3 od góry: przed słowem *oraz* brakuje spacji;
- strona 72, pierwszy wiersz od góry: ... *wynikającego np. z przystaniania* ... (z przystaniania, czego ?);
- strona 82, wiersz 11 od dołu: ... *dla metody z wywalaną transmisją* ...;
- strona 94, wiersz 3 od góry: *Układy DWM1000 są wyposażone są w standardowe* ...;
- strona 106, wiersz 6 od góry: ... *mierzy okres t między momentem* ... (parametr *t* nie występuje w tekście głównym rozprawy, jak i na rysunkach);
- strona 121, wiersz 10: ... *jest wyzwalana przez etykietą oraz sterownika* ...;
- strona 123, wiersz 13 od góry: ... *rzędu 15.65 ps* ... (powinien być przecinek zamiast kropki).

W świetle powyższego, forma redakcyjna rozprawy jest na poziomie średnim, jednak ze względu na wartość uzyskanych wyników merytorycznych, powyższe uwagi nie wpływają na pozytywną, wynikową ocenę całości pracy.

4. Osiągnięcia zawarte w rozprawie

Oryginalny wkład Autora rozprawy w rozwój systemów radiolokalizacyjnych został opisany w rozdziałach od piątego do ósmego. W rozdziale piątym Doktorant szczegółowo opisał dwie nowe metody synchronizacji węzłów w ultraszerokopasmowych systemach lokalizacyjnych. Słusznie zauważył, że opracowane metody są związane z warstwą programową, a nie sprzętową, ponieważ

proces synchronizacji odbywa się poprzez cyfrowe przetwarzanie wyników pomiarów z wykorzystaniem mierzonych danych referencyjnych, a nie poprzez zmiany sprzętowe w węzłach, na przykład bezpośrednią synchronizację generatorów sygnałów wzorcowych.

Rozdział szósty (wraz z dodatkami E i F) dotyczy szczegółowej analizy niepewności (błędów) wyznaczania różnicy czasów TDoA. Dla dwóch opracowanych metod Doktorant wyprowadził uproszczone zależności opisujące niepewności wyznaczania czasów TDoA.

W celu wstępnego zbadania efektywności pracy zaproponowanych metod, Autor przeprowadził badania symulacyjne w uniwersalnym środowisku obliczeń matematycznych MATLAB z zastosowaniem samodzielnie wykonanego oprogramowania. Wyniki tych badań, dla różnych konfiguracji sieci radiolokalizacyjnej, zostały zebrane w rozdziale siódmym. Otrzymywane niepewności w wyznaczaniu czasów TDoA zostały zaprezentowane na tzw. wykresach pudełkowych w sposób jasny i przekonujący, a formułowane wnioski są poprawne. W dalszej części niniejszego rozdziału Doktorant przeprowadził badania symulacyjne wpływu liczby lokalizowanych etykiet na skuteczność odbioru pakietów. Główne wyniki z tych badań zostały przedstawione na wykresach ilustrujących stosunek liczby pakietów odebranych do nadanych w funkcji liczby pakietów. Na podstawie tych charakterystyk Autor opracował uogólnione wnioski stosowalności zaproponowanych metod synchronizacji węzłów.

Najciekawsze wyniki, według recenzenta, zawiera rozdział ósmy (wraz z dodatkiem I). W rozdziale tym została opisana metodyka i wyniki badań pomiarowych w rzeczywistej sieci ultraszerokopasmowej dla różnej jej konfiguracji. Otrzymane wyniki są zbieżne ze wcześniej otrzymanymi na drodze symulacyjnej. Potwierdza to przyjęte przez Doktoranta założenia systemowe podczas opracowania nowych metod synchronizacji węzłów w sieciach UWB.

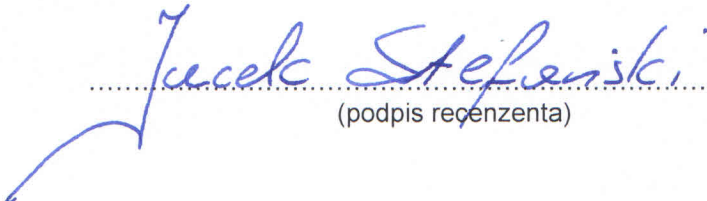
Podsumowując, Autor rozwiązał postawione zadanie przy użyciu właściwych metod (analitycznej, symulacyjnej i pomiarowej), stosując przy tym uzasadnione założenia.

5. Wniosek końcowy

Na podstawie niniejszej recenzji można stwierdzić, że mgr inż. Vitomir Djaja-Joško:

- przedłożył do oceny rozprawę doktorską pt. *Nowe metody bezprzewodowej synchronizacji w ultraszerokopasmowych systemach lokalizacyjnych*, spełniającą wymagania stawiane tego typu pracom;
- podjął ważną, ciekawą i aktualną tematykę badawczą o dużym znaczeniu użytkowym, związaną z zagadnieniami ogólnie rozumianego cyfrowego przetwarzania sygnałów w systemach radiolokalizacyjnych;
- opracował dwie oryginalne metody synchronizacji węzłów w ultraszerokopasmowych systemach lokalizacyjnych.

Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić, 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 mgra inż. Vitomira Djaja-Joško spełnia wymagania ustawowe i może być dopuszczona do publicznej obrony.


.....
(podpis recenzenta)