

Politechnika Śląska

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz
technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów
na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS

Rozprawa Doktorska

Autor:

mgr inż. Krzysztof Hanzel

Promotor:

dr hab. inż. Damian Grzechca, prof. Pol. Śl.

Promotor pomocniczy:

dr inż. Krzysztof Tokarz

Gliwice 2022

"Cóż masz, czego byś nie otrzymał?"

*Praca ta nie mogłaby powstać
bez wsparcia i pomocy wielu osób.*

*Dziękuję Żonie i Rodzicom za miłość,
wrozumiałość, zaufanie i wsparcie;*

*Promotorom za merytoryczny wkład i cierpliwość
oraz otoczenie opieką w strukturach Uczelni;*

*Kolegom za dobre słowo, nastrój
i wspólną motywację w dążeniu do celu;*

*oraz wszystkim tym, którzy
przyczynili się do powstania tej pracy.*



Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



Niniejsza praca doktorska powstała w ramach projektu:

***„CyPhiS – Projekt nowoczesnych studiów doktoranckich
w dziedzinie systemów cyber-fizycznych”***

Projekt ten był dofinansowany z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój 2014-2020 przez Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w ramach Działania 3.2 Studia doktoranckie na podstawie umowy nr POWR.03.02.00-00-I007/17-00

Spis treści

1.	Wstęp.....	1
1.1.	Tematyka rozprawy.....	3
1.2.	Tezy rozprawy i cel pracy.....	5
1.3.	Przebieg pracy i układ rozprawy.....	6
2.	Wprowadzenie do pozycjonowania.....	9
2.1.	Technologie wykorzystywane w pozycjonowaniu.....	12
2.2.	Technologia UWB – cechy i podstawowe informacje.....	18
2.3.	Zastosowanie technologii UWB.....	20
2.4.	Techniki i pojęcia wykorzystywane w pozycjonowaniu.....	21
2.5.	Systemy wspomagania kierowców ADAS a możliwość wykorzystania UWB.....	25
2.6.	Analiza SWOT wykorzystania UWB.....	28
2.7.	Miary dokładności pozycji obiektu.....	29
3.	System lokalizacji i identyfikacji obiektów.....	31
3.1.	Etap akwizycji danych z systemu pozycjonującego UWB.....	35
3.2.	Filtracja wstępna.....	37
3.3.	Filtracja adaptacyjna odległości bazująca na prędkości.....	40
3.4.	Korekta odległości z wykorzystaniem logiki rozmytej.....	42
3.4.1.	Model Mamdaniego.....	42
3.4.2.	Model Sugeno.....	53
3.5.	Algorytm trilateracji i określenie relacji kąt - odległość.....	54
4.	Implementacja i analiza systemu lokalizacji i identyfikacji.....	61
4.1.	Analiza wartości parametru RSSI w różnych ośrodkach.....	62
4.2.	Wykorzystanie filtrów z ruchomym oknem dla obiektu w ruchu.....	65
4.3.	Analiza skuteczności filtracji adaptacyjnej.....	69
4.4.	Analiza skuteczności zaproponowanych modeli logiki rozmytej.....	71
4.4.1.	Weryfikacja modelu Mamdaniego.....	71
4.4.2.	Weryfikacja modelu Sugeno.....	76
4.4.1.	Weryfikacja zmodyfikowanego modelu Sugeno.....	79

4.5.	Analiza wyznaczania kąta	81
4.6.	Podsumowanie	85
5.	Struktura danych do identyfikacji obiektów	87
5.1.	Wpływ długości identyfikatora obiektu na pozycjonowanie	88
5.2.	Elementy infrastruktury drogowej	92
5.3.	Etykietowanie obiektów infrastruktury - ramka danych.....	95
5.4.	Analiza czasów transmisji danych	99
5.5.	Wpływ rodzaju transmisji, prędkości i liczby węzłów na opóźnienie..	101
6.	Podsumowanie i wnioski końcowe	107
7.	Bibliografia	111
	Wykaz ważniejszych skrótów i akronimów	119
	Spis rysunków	120
	Spis tabel	122

1. Wstęp

W dobie gwałtownej transformacji cyfrowej istnieje coraz większa potrzeba automatycznej identyfikacji i lokalizacji obiektów. Problem ten jest złożony i wielopłaszczyznowy, ponieważ potrzeba pozycjonowania oraz lokalizacji występuje w różnych gałęziach przemysłu i jest również integralną częścią rewolucji 4.0. Papierkiem lakmusowym tych zmian jest branża motoryzacyjna, w której wraz z rozwojem technologicznym każdy z nowo produkowanych pojazdów – niezależnie czy mowa o samochodach hybrydowych, elektrycznych czy spalinowych – jest naszpikowany dziesiątkami systemów elektronicznych mających poprawić bezpieczeństwo i komfort podróżowania. Zagłębiając się w poszczególne wymagania i specyfikę określonej gałęzi przemysłu, okazuje się często, że wymaganie samej tylko lokalizacji obiektów wokół pojazdu jest ważne, ale niewystarczające, ponieważ wskazywana jest wprost potrzeba ich identyfikacji. Jest to szczególnie widocznie, kiedy bierze się pod uwagę branżę motoryzacyjną i aktualny trend realizacji poszczególnych faz autonomicznej jazdy, które mają również za zadanie poprawę bezpieczeństwa i komfortu jazdy. Coraz częściej podstawą tych zachowań nie są już tylko wybory klientów, decydujących się na nowoczesne pojazdy, ale regulacje prawne, które zmuszają producentów samochodów do ciągłej poprawy bezpieczeństwa i monitorowania jakości podróży swoich klientów. Żyjemy więc w czasach, w których branża samochodowa i szeroko rozumiana informatyka współpracują z sobą jak nigdy wcześniej. Jednym z efektów tej współpracy jest wypracowanie pojęcia ADAS (ang. Advanced Driver-Assistance Systems) – zespołu zaawansowanych systemów wspomagających kierowcę. Systemy te, powszechnie montowane w seryjnie produkowanych samochodach, mają wiele różnorodnych funkcji: od tych mających na względzie bezpieczeństwo kierowców i gwarancję dotarcia ich do celu, poprzez systemy ułatwiające prowadzenie samochodu, aż po takie podnoszące komfort i wygodę użytkownika samochodu.

Przed technologiami samochodowymi stoją wyzwania związane z coraz to bardziej wyśrubowanymi standardami bezpieczeństwa, wymuszającymi wysoką wiarygodność pracy oraz możliwie krótki czas reakcji na potencjalne zagrożenia. Ich jakość jest stale podnoszona poprzez nowe sensory tzw. percepcji otoczenia, a także redundancję kluczowych systemów dla zapewnienia wiarygodności danych. Na uzyskanie informacji umożliwiających identyfikację i wskazanie pozycji innych użytkowników ruchu drogowego oraz obiektów infrastruktury drogowej składa się szereg operacji na poziomie pozyskania danych z sensorów i processingu, czyli przetworzenia tej informacji na dane użyteczne dla innych systemów. Istnieje więc potrzeba umiejętnego pozyskania i przetworzenia danych, przy jednoczesnym zachowaniu niskiego kosztu implementacji oraz podnoszenia użyteczności zastosowanych w przemyśle sensorów.

Biorąc pod uwagę wybrane aspekty ruchu drogowego np. wybór wolnego miejsca parkingowego, czy też patrząc z perspektywy systemów wspomagania kierowcy np. decydując o zagrożeniu wystąpienia kolizji i konieczności uruchomienia awaryjnego hamowania, jazda samochodem wiąże się ściśle z pozycją, a w zasadzie odległością od pozostałych obiektów będących w otoczeniu pojazdu, a których identyfikacja jest możliwa i pewna. Nowoczesny system komputerowy asystujący kierowcy musi rozpoznać (dokonać jego akwizycji poprzez szereg czujników, sensorów) i przetworzyć zebrane dane (stworzyć swoistą mapę zajętości otoczenia pojazdu) oraz wypracować odpowiedź dotyczącą sytuacji. Taką sytuację wieloletni kierowca jest w stanie ocenić w ułamku sekundy, biorąc pod uwagę swoją pozycję, ale i prędkość, kierunek i prędkość innych pojazdów, infrastrukturę, warunki atmosferyczne, innych uczestników ruchu drogowego oraz wiele dodatkowych czynników, natomiast system musi ocenić w oparciu o dane z sensorów. Co więcej oczekujemy, aby system przeprowadził ten cały proces szybciej i z większą niezawodnością niż kierowca. Jest to proces skomplikowany i chociaż nierzadko przewyższa już możliwości ludzkiej percepcji i szybkości reakcji, to nadal trwają starania w implementacji coraz to nowszych rozwiązań, które cechowałaby większa niezawodność i pewności predykcji możliwych zdarzeń.

Z perspektywy nowoczesnych systemów autonomicznej jazdy pojawia się problem automatycznej identyfikacji i lokalizacji obiektów infrastruktury drogowej i jej użytkowników. W tym celu zbierane są ogromne ilości danych z sensorów percepcji otoczenia. Brakuje natomiast systemu automatycznej identyfikacji oraz walidacji tych obiektów. W tym celu odbywa się proces etykietowania obiektów widocznych na zgromadzonych materiałach i tworzenie map otoczenia pozwalających ocenić dokładność zaimplementowanych rozwiązań. Jest to proces czasochłonny, angażujący zasoby ludzkie i obciążony możliwością wprowadzenia błędu przez człowieka. Dlatego opracowanie systemu, który umożliwi jednoczesną lokalizację i identyfikację, pozwoli na walidowanie nowo wprowadzanych algorytmów i systemów ADAS w sposób bardziej efektywny i oszczędny.

1.1. Tematyka rozprawy

Obiekt (samochód) poruszający się, szczególnie w ośrodku miejskim o dużym zagęszczeniu różnego rodzaju obiektów, powinien posiadać zestaw zwalidowanych algorytmów i metod bazujących na zastosowanych sensorach otoczenia takich jak LIDAR, radar czy zestaw kamer. Można także powiedzieć, że jednym z podstawowych wyzwań stojących przed stosowanymi algorytmami implementowanymi w systemach ADAS jest weryfikacja niezawodności działania zaimplementowanych metod detekcji, identyfikacji i lokalizacji przeszkód oraz infrastruktury będącej w najbliższym otoczeniu pojazdu. Ponadto pojawiające się coraz częściej półautonomiczne pojazdy, wymuszają na algorytmach konieczność precyzyjnej lokalizacji oraz identyfikacji obiektów znajdujących się w ich bezpośrednim otoczeniu. Zgodnie z dobrą praktyką firm R&D (ang. research and development – badania i rozwój) z branży motoryzacyjnej, badania nowych algorytmów muszą odbywać się wg określonej procedury, która wymaga m.in. oznaczenia wszelkich obiektów widocznych w otoczeniu pojazdu. Najczęściej w tym celu wykorzystywane są kamery wizyjne, termowizyjne, LIDAR-y oraz radary. Synchronizowanie tych informacji z faktycznie występującymi obiektami jest procesem żmudnym oraz długotrwałym i najczęściej wymaga zatrudnienia osobnej grupy ludzi, która etykietuje poszczególne obiekty.

Propozycją rozwiązania tego problemu jest zastosowanie technologii umożliwiającej zarówno identyfikację (która przekazuje informację, że oceniany obiekt jest np. pieszym, drzewem czy latarnią uliczną), jak i lokalizację, która może być rozumiana jako odległość względem pojazdu lub odległość i kąt względem osi poruszania się pojazdu. W pierwszym przypadku identyfikator obiektu powinien również posiadać informację o współrzędnych geograficznych, w drugim nie jest to tak istotne. Niestety dotychczas dostępne rozwiązania nie ułatwiają prowadzenia takich badań, ponieważ nawet w przypadku spełnienia kryterium identyfikacji (np. przez systemy bezprzewodowe takie jak: RFID, WiFi, czy Bluetooth) ich zdolności związane z określaniem odległości czy pozycji są niezadowalające. Dodatkowym i częstym wymogiem stanowiącym o niemożliwości wykorzystania tych rozwiązań jest konieczność działania zarówno w warunkach LOS (ang. line-of-sight) jak i NLOS (ang. non-line-of-sight – w sytuacji, kiedy jeden obiekt jest przysłonięty przez inny, np. samochód, poruszającego się rowerzystę czy pieszego), co dodatkowo utrudnia wyznaczenie odległości. Problem związany z potrzebą identyfikacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS wymaga zatem zarówno wyznaczenia odległości od obiektu, jak i jednoczesnej identyfikacji, niezależnie od warunków widoczności. Biorąc pod uwagę drugi aspekt, tj. wyznaczanie odległości to obecnie stosowane systemy charakteryzują się dużą i wydaje się wystarczającą dokładnością, np. systemy oparte na pomiarach LIDAR-u lub radaru. Niestety wadą tych systemów jest ograniczona zdolność identyfikacji obiektów. Jednym z kluczowych działań, jakie stawia się więc przed systemami walidującymi podsystemy ADAS, są wymiarowanie i jednoczesna identyfikacja.

W ramach rozprawy doktorskiej przedstawiona została propozycja systemu, który ma pozwolić na etykietowanie obiektów przy jednoczesnym określaniu jego pozycji, co pozwoli przyspieszyć proces walidacji nowych algorytmów ADAS. To z kolei przełoży się na możliwość walidowania wypracowanych na poziomie symulatora algorytmów wspomagania kierowcy. W ramach pracy opracowano zatem wielowątkowy, złożony proces zastosowania technologii UWB (ang. Ultra-wideband) do automatycznej identyfikacji i pozycjonowania obiektów w otoczeniu pojazdu. W tym celu konieczne było zaprojektowanie i przetestowanie komunikacji umożliwiającej pozyskiwanie informacji o odległości, następnie rozważenie pozycji, a także opracowanie i walidacja dedykowanych struktur pozwalających na transmisję metadanych zapewniających identyfikację obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS. W trakcie analizy konieczne było również przedstawienie zależności i wpływu kilku wzajemnie oddziaływujących parametrów projektowanego systemu takich jak: dokładność; częstotliwość; identyfikacja obiektu w akceptowalnym czasie, przy założeniu, że obiekty znajdują się w ruchu. Prowadziło to wprost do pytań o wpływ prędkości samochodu, wskazanie wymaganej infrastruktury, oddziaływanie czynników zewnętrznych czy transmitowanych danych na sposób identyfikacji i dokładność wyznaczania odległości.

1.2. Tezy rozprawy i cel pracy

Jednym z podstawowych problemów powstających obecnie systemów wspomagania kierowcy ADAS jest złożoność i czasochłonność procesu walidacji algorytmów, na który w dużej mierze wpływ mają lokalizacja i identyfikacja obiektów, które znajdują się w otoczeniu pojazdu. Równocześnie prężny rozwój technologii UWB oraz predyspozycje tej technologii do wymiarowania przy jednoczesnej możliwej do przeprowadzenia transmisji danych, zdają się być potencjalnym wsparciem w walidacji algorytmów ADAS.

Biorąc pod uwagę powyższe spostrzeżenie zaproponowano następującą tezę pracy mówiącą, że możliwe jest:

Wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS

Celem pracy jest opracowanie systemu lokalizacji i identyfikacji obiektów infrastruktury drogowej z wykorzystaniem technologii UWB oraz filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej, na potrzeby walidacji algorytmów implementowanych w podsystemach ADAS. Tworzony system lokalizacji i identyfikacji obiektów będzie umieszczony na obiekcie głównym, a pozostałe elementy zewnętrzne wyposażone w znaczniki, będą umieszczone na elementach znajdujących się w otoczeniu pojazdu. Zakres pracy obejmuje więc opracowanie skutecznej metody wsparcia dla walidujących nowe algorytmy ADAS, która umożliwi wyznaczenie pozycji i identyfikację obiektów otaczających pojazd.

Słuszność celu pracy zostanie wykazana w oparciu na poniższych tezach częściowych:

Teza 1: Zastosowanie technologii UWB w postaci lokalnego układu odniesienia, który umiejscowiony jest na obiekcie głównym, umożliwia poprawną identyfikację i lokalizację obiektów trzecich znajdujących się w otoczeniu obiektu głównego w akceptowalnym czasie i z zachowaniem ograniczonej prędkości.

Teza 2: Wprowadzenie filtracji adaptacyjnej wraz z logiką rozmytą pozwala polepszyć dokładności lokalizacji oznaczonych obiektów znajdujących się w otoczeniu pojazdu.

Teza 3: Opracowanie odpowiedniej struktury danych opisujących obiekty zewnętrzne ułatwia prawidłową identyfikację przy zachowaniu akceptowalnego czasu wyznaczania pozycji obiektu zewnętrznego.

1.3. Przebieg pracy i układ rozprawy

Praca składa się z pięciu etapów prowadzących do realizacji celu. Pierwszym z nich jest przedstawienie obecnego stanu wiedzy związanego zarówno z pozycjonowaniem obiektów, jak i podstawowymi pojęciami związanymi z jego realizacją. Pokazane zostały różne techniki pozycjonowania wykorzystywane obecnie w ramach systemów wspomagania kierowcy, ze szczególnym naciskiem na funkcjonalności niezbędne w kontekście rozprawy, takie jak możliwość identyfikacji czy wykorzystania w warunkach zewnętrznych. Następnie omówione zostały podstawy technologii UWB, zasady jej działania. Wskazano również na jej możliwość wykorzystania w kontekście wspomnianych wcześniej funkcjonalności i technologii oraz przeprowadzono analizę SWOT (Strengths – silne strony, Weaknesses – słabe strony, Opportunities – szanse, okazje i Threats – zagrożenia) tego rozwiązania.

Dane pochodzące z systemu UWB charakteryzują się wartościami odstającymi czy też brakiem danych w warunkach całkowitego przysłonięcia anten. Wymagają one zatem wstępnego przetworzenia tj. obróbki i filtracji, dlatego też w pracy zaproponowano szereg algorytmów i metod mających na celu usprawnienie działania pozycjonowania z wykorzystaniem technologii UWB. Omówione zostały stosowane obecnie technologie pozycjonowania i lokalizacji obiektów z podziałem ze względu na środowisko pracy, przedstawiono również metody działania pozycjonowania w oparciu o wykorzystywaną technologię.

Dalej, aby umożliwić realizację postawionych w pracy tez, zaproponowano schemat procedury przetwarzania danych wymiarujących, które pochodzą z systemu bazującego na technologii UWB. Składają się na to etapy akwizycji, wykorzystanie adaptacyjnej filtracji wstępnej (np. z uwzględnieniem filtrów odpornych czy odrzuceniu błędów grubych). Dalej następuje faza obróbki z wykorzystaniem logiki rozmytej mającej na celu zwiększenie dokładności lokalizacji oznaczonych obiektów znajdujących się w otoczeniu pojazdu. Finalnie system w zależności od dostępnych danych z wykorzystaniem trilateracji wskazuje na położenie, lub też odległość i kąt pod jakim znajduje się obiekt względem osi pojazdu.

Zaproponowana w pracy transmisja metadanych związanych z infrastrukturą drogową, stanowi dopełnienie potrzebne do realizacji walidacji algorytmów w podsystemach ADAS. Jest ona oryginalną propozycją etykietowania obiektów. Przeprowadzono tutaj analizę transmisji danych z uwzględnieniem zaproponowanych metod wymiarowania oraz wyszczególniono miejsca, w których taka transmisja będzie możliwa. Następnie zaproponowano strukturę danych, które powinny być użyteczne z punktu widzenia etykietowania obiektów związanych z rozwojem algorytmów ADAS w kontekście komfortu, a jednocześnie będzie niosła informacje kluczowe z punktu widzenia bezpieczeństwa w akceptowalnym czasie pozwalającym na reakcję systemu.

Kolejny rozdział przedstawia badania, w których weryfikowane są krok po kroku kolejne założenia zaproponowanego algorytmu. Szczególną uwagę zwrócono tutaj na zachowanie akceptowalnych ram czasowych (opóźnień) względem aktualnej prędkości poruszającego się obiektu (np. samochodu). Kolejno przedstawione zostały wyniki badań wraz z ich szerokim omówieniem w kontekście postawionych w pracy tez. Całość kończy podsumowanie, w którym wskazano słuszność postawionych tez, a następnie możliwe kierunki dalszych prac związanych z technologią UWB.

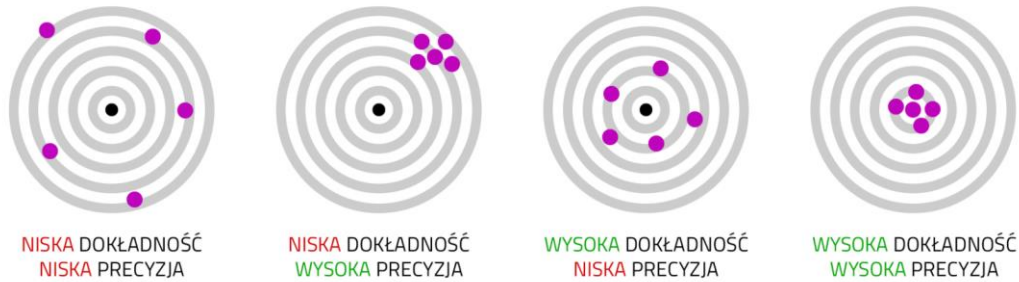
Postawione w rozprawie tezy są także wynikiem współpracy z branżą realizującą technologie ADAS, a także konsultacjami z osobami z przemysłu motoryzacyjnego, a otrzymane rezultaty badań i proponowane rozwiązania są odpowiedzią na wskazane przez nich problemy.

2. Wprowadzenie do pozycjonowania

Określanie pozycji obiektów w celach nawigacyjnych towarzyszy ludzkości od zarania dziejów. Pierwotnie wykorzystywane były do tego jedynie zdolności poznawcze ludzkich zmysłów, z obserwacją otaczającego świata na czele. W lokalnym układzie odniesienia często odnoszono się do charakterystycznych w przestrzeni obiektów (drzewa, struktury skalne), a pierwszy wzniesiony przez człowieka punkt referencyjny w postaci kamiennego słupa na polskiej ziemi datuje się na 1151 rok i znajduje się w Koninie [1]. W globalnym układzie odniesienia ludzkość wykorzystuje konstelacje gwiazdne czy też kompasy. Najstarszy kompas na świecie, składający się z igły magnetycznej, unoszącej się na wodzie w naczyniu, opisany jest w chińskiej książce Zhu Yu Pingzhou Ke Tan z 1117 [2]. Mimo że obecnie nawigacja kojarzy się głównie z GPS, należy wspomnieć, że przed erą nawigacji satelitarnej istniały już urządzenia nawigacyjne montowane w samochodach, które – wykorzystując informację o przejechanym dystansie – przewijały analogowe mapy, na których nadrukowane były drogi między konkretnymi miastami. W ten sposób – dopóki kierowca nie zszedł z trasy lub też system nie uległ rozkalibrowaniu – możliwe było nawigowanie do konkretnego punktu. Nie było tam jednak mowy o częstej aktualizacji map czy też etykietowaniu wszystkich napotkanych obiektów, chociaż już wtedy ludzkość korzystała z takiego rozwiązania jak ostrzeganie przed niebezpieczeństwami czy nawigowanie w oparciu o punkty charakterystyczne (np. „uważaj na bagna”, „skręć za potokiem”).

W dzisiejszych czasach odległość obiektu (a przez to i często jego pozycję) jesteśmy w stanie określić z wykorzystaniem wielu technologii. Popularnym podziałem, który ma odzwierciedlenie w literaturze, jest ten na technologie do zastosowań typowo wewnątrz budynków (IPS ang. Indoor Positioning System) oraz takie, które można swobodnie stosować na otwartej przestrzeni (OPS ang. Outdoor Positioning System) [3]. Mówiąc o środowisku pracy nie sposób nie wspomnieć o dodatkowych czynnikach, w kontekście których należy rozpatrywać możliwość korzystania z danej technologii. Mimo że w zależności od zastosowania, szczególną uwagę zwraca się na poszczególne specyficzne uwarunkowania, niewątpliwie kluczowymi elementami charakterystycznymi każdej z metod pozycjonowania są:

- Dokładność i precyzja – są to dwa niezależne atrybuty metody pomiaru mówiące o danych pozyskiwanych z systemu. Pierwszy z nich – dokładność – mówi o stopniu zgodności wartości uzyskiwanych podczas pomiaru z rzeczywistą wartością mierzonej stałej. Precyzja natomiast informuje o stopniu zgodności kolejnych pomiarów tej samej wartości tej samej stałej. Wartości te są niezależne tj. można otrzymać precyzyjne pomiary o niskiej dokładności lub też dokładne pomiary, ale o niskiej precyzji.



Rys. 1 Różnice pomiędzy precyzją a dokładnością pozycjonowania

- Zasięg działania – jest to termin odnoszący się do obszaru jaki jest pokrywany przez dany system (obszaru, na którym z systemu pozycjonowania otrzymujemy pozycję o określonej dokładności). W literaturze możemy odnaleźć bardziej szczegółowy podział na trzy kategorie zasięgu działania:
 - zasięg lokalny – jest to mały, dobrze zdefiniowany obszar, który nie może ulec zwiększeniu. Przykładem może być pomieszczenie lub budynek, w którym mówimy o zasięgu mierzonym w m, m² lub też m³;
 - zasięg skalowalny – dotyczy technologii, w których zasięg zależy bezpośrednio od ilości i zasięgu wykorzystywanych punktów referencyjnych. Cechą charakterystyczną tego rodzaju zasięgu jest to, że możliwe jest jego rozszerzenie (zwiększenie powierzchni, na której dana technologia daje wiarygodne wyniki) poprzez dodanie kolejnych punktów referencyjnych;
 - zasięg globalny – odnosi się do systemów, które zapewniają możliwość uzyskania pozycji niezależnie od miejsca na powierzchni Ziemi, w którym się znajdujemy.
- Miejsce stosowania systemu – jest to parametr ułatwiający zdefiniowanie przyszłego charakteru zastosowania systemu. Z reguły rozróżniamy dwa środowiska, w których system może pracować – są to lokalizacje wewnątrz budynków (ang. IPS) oraz na zewnątrz nich (ang. OPS). Mimo że większość systemów kojarzonych jest z konkretnym zastosowaniem, w wielu przypadkach możliwe jest zastosowanie ich zarówno w warunkach wewnątrz, jak i na zewnątrz budynków.
- Wymagana infrastruktura i możliwość rozbudowy – parametr ten określa jakie są elementy składowe systemu (zarówno po stronie implementacji – punkty referencyjne, stacje pośredniczące, centra obliczeniowe itp. – jak i użytkownika końcowego) oraz czy możliwe jest rozbudowanie systemu o dodatkowe punkty referencyjne (umożliwiające zwiększenie zasięgu działania systemu) lub też o dodatkowe znaczniki dla lokalizowanych obiektów w ramach już istniejącej implementacji systemu.
- Cena – jest to istotna składowa opisująca system pozycjonowania; determinuje ona wykorzystanie systemu w konkretnym przypadku. Można rozróżnić wiele

sposobów definiowania ceny – koszt pojedynczego urządzenia w systemie, koszt zestawu, koszt obsługi pojedynczego użytkownika w systemie, koszt implementacji w pomieszczeniu, koszty związane z utrzymaniem systemu itp. W celach porównawczych w tej pracy mowa zawsze o cenie pojedynczego modułu dostępnego dla użytkownika końcowego – dostępnego w powszechnej sprzedaży.

- **Możliwość identyfikacji** – informacja ta określa, czy system świadczy możliwość identyfikacji pozycjonowanego obiektu, czy jedynie umożliwia określenie jego położenia. W przypadku identyfikacji, szczególnie w przypadku systemów jednokierunkowych, mówimy o dokładności identyfikacji. W kontekście tej pracy doktorskiej jest to szczególnie istotny parametr, ponieważ to właśnie identyfikacja jest kluczowa podczas omawianej walidacji podsystemów ADAS.
- **Zapotrzebowanie na energię** – w przypadku konstrukcji urządzeń pracujących na zasilaniu bateryjnym jest to jeden z kluczowych parametrów. Określa, ile energii pobiera urządzenie w różnych cyklach pracy (w stanie spoczynku, podczas wymiarowania, podczas obróbki danych o pozycji).
- **Widoczność nadajnika i odbiornika systemu (warunki pracy)** – informacja o konieczności zapewnienia widoczności między poszczególnymi urządzeniami systemu. W przypadku tego parametru mowa jest o dwóch rodzajach pracy systemu: stanie widoczności (w zasięgu wzroku) (ang. LOS) oraz stanie, kiedy np. ścieżka sygnału jest zasłonięta (za zasięgiem wzroku) (ang. NLOS).
- **Otrzymywane dane** – informacja ta istotna jest z punktu widzenia implementacji systemu. Mowa tutaj o ilości, rodzaju i częstotliwości pozyskiwanych danych. Użytkownik może być informowany o pozycji, dokładności, przemieszczeniu; może otrzymywać informacje w globalnym lub też lokalnym systemie odniesienia; sama pozycja może być pozyskiwana w dwu lub trzywymiarowym formacie.
- **Wady** – parametr ten opisuje wszystkie przeciwwskazania do wykorzystania poszczególnych systemów w konkretnych zastosowaniach. Przykładem może być wysoka podatność na czynniki środowiskowe, możliwość interferencji z innymi powszechnie wykorzystywanymi systemami czy urządzeniami, ograniczenia konstrukcyjne itp.

Poza wymienionymi czynnikami, na które w pracy została zwrócona szczególna uwaga przez wzgląd na charakter wykorzystania pozycji do identyfikacji i lokalizacji obiektów, istnieje również wiele innych parametrów takich jak: prywatność, dostępność, udział w rynku, dopuszczenie do użytku poprzez certyfikację, łatwość użytkowania, pojemność systemu, wytrzymałość, integralność z innymi systemami, rodzaj sygnału i jego parametry, architektura systemu itp. Parametry te, choć istotne, są jednak poza obszarem badawczym rozprawy, a dodatkowo podlegają dużej zmienności uwarunkowanej dostępnością technologii na rynku.

2.1. Technologie wykorzystywane w pozycjonowaniu

Obecnie na rynku wykorzystuje się różne techniki radiokomunikacji, część z nich wykorzystywana jest również do pozycjonowania obiektów. Ponadto wiele rodzajów technologii jest lub było wykorzystywanych do określania pozycji obiektów w globalnym lub lokalnym systemie odniesienia. Uwzględniając powyższe, w tabeli 1 [4] przedstawiono techniki pozycjonowania obiektów wraz z wartościami poszczególnych parametrów przytoczonymi w poprzednim rozdziale.

Tab. 1. Porównanie metod pozycjonowania.

Technologia	Dokładność	Zasięg użytego systemu	Miejsce stosowania	Wymagana infrastruktura i możliwość rozbudowy	Cena	Możliwość pewnej identyfikacji	Zapotrzebowanie na energię	Warunki pracy	Wady
WiFi [5]–[7]	0,5 – 2,2m 1 – 6 m 5 – 7 m	50m 20m 75m	IPS, możliwy OPS	Dla określenia dokładnej pozycji w lokalnym systemie odniesienia wymaga wielu widocznych AP w otoczeniu	Dedykowany moduł - niska	Tak	Średnie	Zarówno w zasięgu wzroku jak i poza nim	Duże tłumienie sygnału, zmienność mocy sygnału w czasie. Przy korzystaniu z publicznych punktów dostępowych ryzyko utraty punktów referencyjnych bez wcześniejszej informacji
Bluetooth [8], [9]	30 cm 2.6m	6x8 m (4 urządzenia) 12x45m (19 urządzeń)	IPS	Dla określenia dokładnej pozycji wymaga widoczności z co najmniej 4 i 6-8 punktami	Dedykowany moduł - niska	Tak	Niskie	Zarówno w zasięgu wzroku jak i poza nim	W warunkach NLOS mocno traci na jakości sygnału. Może być zakłócany przez obecność innych sieci jak WiFi
GPS [10], [11]	1,7 – 6,6 m 4,9 – 7,8 m	Globalny – na otwartej przestrzeni	OPS	Od użytkownika końcowego wymagane jest posiadanie jedynie modułu odbiorczego	Dedykowany moduł - średnia	Nie	Średnie	Najlepsze działanie zapewnia czyste niebo, może działać przy częściowym przysłonięciu	System działa głównie w warunkach OPS, w przypadku braku widoczności szybko traci sygnał (wewnątrz budynków, na obszarach zurbanizowanych). Zależy od i wymaga do działania zewnętrznej infrastruktury w

									postaci satelit i centrów DGPS.
UWB [12]– [16]	5 – 9,4 cm 10 cm	3x3 m 20 m 100m	IPS, możliwy OPS	Dla określenia dokładnej pozycji 2D wymaga widoczności z co najmniej 3 punktami Punkt – punkt w warunkach LOS	Dedykowany moduł - średnia	Tak	Niskie	Zarówno w zasięgu wzroku jak i poza nim	Relatywnie wysoki koszt uruchomienia systemu. Konieczność implementacji dla specyficznego rozwiązania. Niska dojrzałość rynku.
Sieć komórkowa [17], [18]	180 m 100 – 550 m	W zasięgu sieci komórkowej	OPS, możliwe IPS	Od użytkownika końcowego wymagane jest posiadanie jedynie modułu odbiorczego	Telefon komórkom lub programowalny moduł - średnia	Tak	Niskie	Zarówno w zasięgu wzroku jak i poza nim	Relatywnie niska dokładność. Spadek dokładności pozyskiwanej pozycji wewnątrz pomieszczeń i w przypadku braku widoczności stacji bazowej
RFID [19]	10 cm 25 cm – 2,3 m	1,2 m Wysokie pokrycie siecią czujników	IPS	Lokalizowany jest pojedynczy znacznik, ale wymagana jest liczna sieć punktów referencyjnych	Aktywny - niska; pasywny – bardzo niska	Tak	Niskie	W zasięgu wzroku. Może pracować w warunkach NLOS, jednak charakterystyka systemu wymusza przeszkody absorbujące niewielką część sygnału	Niski koszt pojedynczego modułu, wymaga jednak rozbudowanej sieci wielu punktów referencyjnych, aby podać dokładniejszą pozycję. Stosowany raczej do stwierdzenia obecności, aniżeli do pozycjonowania

Kamera [20]– [24]	1 – 2 cm 8 cm	Poniżej 1 m 6 m do 100 m	IPS, możliwe OPS	Lokalizowanie znaczników lub rozpoznawanie obiektów. Wymagana jest kamera lub zestaw kamer wraz z wydajnym urządzeniem obliczeniowym	Koszt znacznika bardzo niski, koszt kamer zależny od jakości. Średnia do wysokiej	Częścio wo	Duże	Konieczność pracy w zasięgu wzroku	Wadą jest konieczność pracy w zasięgu wzroku, brak możliwości stuprocentowej identyfikacji obiektów oraz konieczność zapewnienia wysokiej mocy obliczeniowej na potrzeby przetworzenia danych z kamer, szczególnie w przypadku chęci pozycjonowania obiektów w trzech wymiarach
VLC, podczerwień [25]–[29]	10 cm – 1 m 12 cm 14 – 20 cm	15x15 m 5x5 m 20 m	IPS	Lokalizacja za pomocą światła emitowanego w pomieszczeniach zamkniętych	W zależności od rozwiązania, od zwykłych żarówek led po światła umożliwiające komunikację dwukierunkową ; niski do wysokiego	Nie	Niskie / wysokie	Konieczność pracy w zasięgu wzroku przy zachowaniu warunków oświetleniowyc h	Obszar, w którym zachodzi pozycjonowanie musi zostać pokryty określonym oświetleniem. Nic nie może przesłaniać drogi między sensorem a źródłem światła. Urządzenia często muszą pracować pod określonym kątem. Pobór energii uzależniony jest od metody akwizycji danych. W przypadku wykorzystywania video rośnie.
LIDAR [30]– [35]	50 cm Kilka cm	10 – 70 m 20 – 300 m	OPS i IPS	W celu określenia odległości od obiektu wystarczy LIDAR statyczny, jednak, aby określać położenie względem	Dla celów identyfikacji obiektów – LIDAR 16 wiązkowy Robosense RS-	Nie	Średnie	Konieczność pracy w zasięgu wzroku	Konieczność bezpośredniej widoczności. Brak stuprocentowej identyfikacji poszczególnych obiektów. Relatywnie wysoki koszt, obniżona jakość danych przy

				otoczenia konieczne jest jego skanowanie jedną lub wieloma wiązkami LIDAR-owymi	LiDAR-16 – bardzo wysoki 1 wiązkowy średni 1 wiązkowy, obrotowy wysoki				niekorzystnych warunkach pogodowych, odbicia światła laserowego od niektórych powierzchni.
Radar [33], [36]–[38]	< 10 cm	0 – 30 m 50, 100, 250 m	OPS i IPS	Dla określenia odległości od obiektu wystarczy jedno takie urządzenie	W zależności od klasy urządzenia wysoki – bardzo wysoki	Nie (określenie ruchu obiektu)	Średnie	Możliwość pracy nawet w przypadku przysłonięcia lub zabrudzenia czujnika	Do określania odległości od obiektu. Utrudniona klasyfikacja obiektów.
Ultradźwięki	< 1 cm	2 – 6 m	IPS	Dla określenia dokładnej pozycji wymaga widoczności z co najmniej 4 punktami	Jeden moduł ultradźwiękowego czujnika odległości niski.	Nie	Niskie	Mocno podatny na przeszkody na linii nadajnik - odbiornik	Podatność na odbicia, konieczność pracy w kontrolowanych warunkach (bez innych źródeł ultradźwięków)
Nawigacja zliczeniowa [39], [40]	10 cm	4 m	IPS / OPS	Dla określenia pozycji wymagana jest pozycja poprzednia i dane z urządzenia typu IMU / AHRS	IMU niski - średni AHRS średni - wysoki	Nie	Niskie	Niezależny od występowania przeszkód	Błąd nawigacji zliczeniowej propaguje się w czasie i wymaga początkowej pozycji referencyjnej względem której określamy przesunięcie

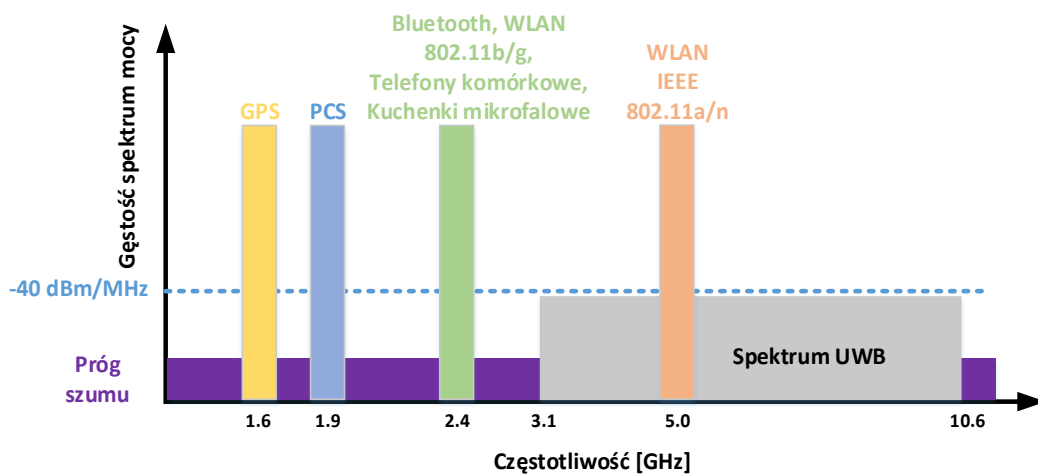
Poza wymienionymi powyżej metodami można również wspomnieć o tych mniej powszechnych, takich jak astronawigacja [41], której teoretyczna dokładność na podstawie rozdzielczości stosowanych przyrządów i tablic (np. w zastosowaniach żeglarskich) wynosi do 370 m. Innym przykładem może być zastosowanie pseudosatelitów, których zadaniem jest imitacja sygnału satelitarnego. Przykładem może być niemiecki system GATE, który był systemem asystującym dla europejskiego systemu nawigacji satelitarnej Galileo. Systemy takie, imitując sygnał satelitarny, mają na celu podniesienie dokładności działania GPS w środowiskach, w których konieczne jest osiągnięcie zwiększonej precyzji, jak na przykład lotniska czy doki portowe. Wspomniane jednak pomniejsze systemy bardzo rzadko wykorzystywane są na rzecz pozycjonowania przez ADAS.

Analiza dostępnych metod z tabeli 1 wskazuje, że metody oparte na analizie wiązki LIDAR-owej czy chmury punktów z radaru, nie umożliwiają jednoznacznej identyfikacji obiektu, a z kolei takie, jak WiFi czy Bluetooth posiadają zbyt małą dokładność pozycjonowania i niewielki zasięg, dlatego też nie mają zastosowania w technologiach ADAS, szczególnie w kontekście ruchu. Biorąc pod uwagę koszt implementacji, metody wizyjne mogą być brane pod uwagę w celu identyfikacji i wymiarowania, ponieważ oferują wystarczającą dokładność, ale uwzględniając konieczność implementacji wielu kamer i wymagane zasoby obliczeniowe [42], oraz znaczący spadek jakości działania w warunkach ograniczonej widoczności, utrudnia to realizację założonych wytycznych. Konieczne jest zatem opracowanie nowych algorytmów i procedur, które umożliwią jednoczesne wymiarowanie i etykietowanie. Ich projektowanie wiąże się jednak z koniecznością wykorzystania systemu pośredniego, który mógłby posłużyć za system łączący obie wskazane funkcjonalności na potrzeby rozwoju tych algorytmów. W niniejszej pracy proponuje się system oparty na technologii szerokopasmowej UWB, ponieważ oferuje odpowiednią dokładność wymiarowania przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości transmisji danych, a co za tym idzie potencjalnej identyfikacji obiektu. Nie wymaga ona dużej energii zasilania ani wielkich zasobów obliczeniowych nawet w przypadku konieczności implementacji wielu znaczników, a w przypadku odpowiedniego doboru algorytmu wymiarowania nie jest też wymagana synchronizacja zegarów urządzeń, jak ma to miejsce na przykład dla systemu GPS.

2.2. Technologia UWB – cechy i podstawowe informacje

W celu wyznaczania odległości i jednoczesnej identyfikacji proponuje się wykorzystanie technologii UWB. Jest ona techniką radiokomunikacji charakteryzującą się wysyłaniem krótkich impulsów (rzędu pikosekund) z zachowaniem bardzo wysokiej częstotliwości transmisji. Dzięki takiemu działaniu komunikacja ta pozwala na wykorzystanie dużego fragmentu widma częstotliwościowego. Zaletą jest również wykorzystanie niewielkiej energii do transmisji danych na niewielkie odległości. W odróżnieniu od widma o wąskim paśmie transmisja z wykorzystaniem UWB nie zakłóca konwencjonalnej transmisji wąskopasmowej na tej samej częstotliwości [43].

Częstotliwości na jakich pracuje UWB w stosunku do innych, powszechnie używanych technologii zaprezentowano na rys. 2.

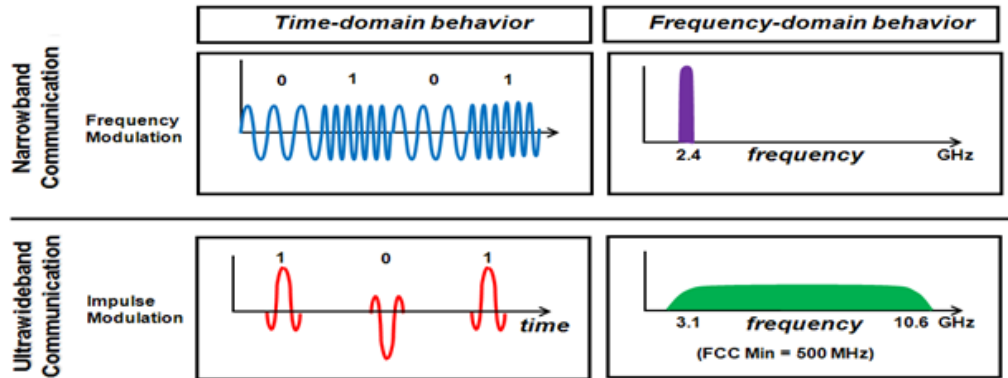


Rys. 2 Wyszczególnione częstotliwości dla najpopularniejszych technologii transmisji bezprzewodowej [43]

Można wyróżnić tutaj częstotliwość pracy systemu GPS – 1,6GHz, następnie częstotliwość pracy LTE (1,9 GHz, ale również w zależności od regionu świata i regulacji krajowych 0,8 0,9 1,8 2,6 3,4 3,9 GHz). Kolorem zielonym wyszczególnione jest stosunkowo wąskie pasmo, w którym pracuje większość bezprzewodowych urządzeń codziennego użytku – w skład pasma 2,4GHz wchodzi takie technologie jak WiFi b/g/n, Bluetooth, krótkofalówki, bezprzewodowe dzwonki do drzwi czy chociażby kuchenki mikrofalowe. Pomarańczowym kolorem oznaczono częstotliwość pracy WiFi w standardzie a/c – 5 GHz. Częstotliwość pracy UWB reprezentuje na rysunku szary obszar pomiędzy 3,1 GHz a 10,6 GHz.

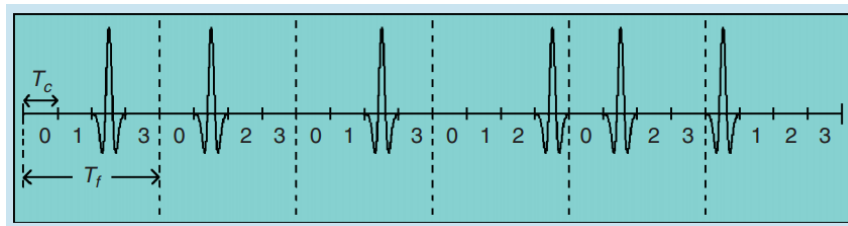
W odróżnieniu do innych konwencjonalnych form transmisji wąskopasmowej przez wykorzystanie niewielkiej mocy technologia UWB jest nieznacznie tylko nad poziomem szumu elektromagnetycznego, a co za tym idzie nie interferuje z innymi technologiami – jest to szczególnie istotne np. w zastosowaniach medycznych [44]. Różny, w stosunku chociażby do WiFi, jest także sposób transmisji danych w technologii

UWB, która nie wykorzystuje modulacji częstotliwościowej o wąskim paśmie, ale wiele pojedynczych krótkich impulsów (wg. regulacji prawych funkcjonujących m.in. W Stanach Zjednoczonych minimalna szerokość pasma, na której ma pracować pojedynczy użytkownik UWB wynosi 500MHz), co pokazano na rys. 3.



Rys. 3 Sposób transmisji danych w konwencjonalnej transmisji bezprzewodowej oraz z wykorzystaniem UWB [45].

Natomiast przykładową transmisję danych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4 Przykładowy sygnał transmitowany przez system UWB

Na prezentowanym rysunku T_f jest czasem ramki, T_c natomiast czasem pojedynczego impulsu. Położenie impulsu w ramach jest określane zgodnie z sekwencją przeskoku czasowego [46].

2.3. Zastosowanie technologii UWB

W założeniu projektantów UWB (pionierem w tworzeniu systemu był Robert A. Scholtz [47], [48]), system ten miał służyć do szybkiej komunikacji na niewielkie odległości, a sami twórcy określali go jako „bezprzewodowe USB”, które zresztą powstało na bazie tego rozwiązania. Obecnie dostępna wersja Wireless USB (WUSB) [49] pozwala na transmisję do 480 Mbit/s (porównując np. z Bluetooth 4.0, gdzie transmisja możliwa jest z prędkością do 24 Mbit/s). Standard USB 3.0 pozwala na transmisję z prędkością do 625Mbit/s, ale trzeba pamiętać, że USB jest formą transmisji przewodowej, natomiast wolniejszy o około 20% UWB jest standardem bezprzewodowym. Technologia UWB posiada szereg zalet, które predysponują ją do powszechnego użytku np. niewielki pobór energii (wydzielana jest mała moc), który jest koniecznością w urządzeniach mobilnych, możliwość wymiarowania ze stosunkowo wysoką dokładnością wewnątrz pomieszczeń czy niewielka podatność na zakłócenia [34], [50]–[52].

Lokalizowanie obiektów z wykorzystaniem UWB podobne jest w swoich założeniach do działania systemu GPS. Odpowiednikami satelitów stanowiący punkty referencyjne w systemie UWB są urządzenia zwane kotwicami (ang. anchors), które mają zdefiniowane znane pozycje tworzące lokalny układ odniesienia, a urządzeniami odbiorczymi są natomiast znaczniki (ang. tag). System oblicza czas propagacji pomiędzy znacznikiem, a punktem referencyjnym, co przy znanej szybkości rozchodzenia się fali umożliwia wyznaczenie odległości pomiędzy znacznikiem i kolejnym punktem referencyjnym. Wykorzystując metodę trilateracji możliwe staje się wyznaczenie sfer w przestrzeni trójwymiarowej, których przecięcie (punkt wspólny) stanowi miejsce położenia znacznika. Dostępne w literaturze badania, mówiące o perspektywie lokalizacji z wykorzystaniem technologii UWB, pokazują zalety w postaci zdolności rozdzielczej w dziedzinie czasowej, wysokiej dokładności czy też niskiej złożoności obliczeniowej wyznaczania lokalizacji [46]. Początek prac nad rozprawą doktorską prowadzony był w okresie, w którym UWB nadal nie było jeszcze usystematyzowane i podlegało ciągłej standaryzacji, która zawarta była w wersji standardu IEEE 802.15.4a z roku 2010 [53], a wraz z postępowaniem badań oraz wzrostem dynamiki rozwoju technologii w roku 2017 powstała kompletna dokumentacja opisująca tę technologię [54], która następnie była aktualizowana w kolejnych latach aż do ukazania się kolejnego kompletnego dokumentu w 2020 roku [36].

Implementacja tej technologii mocno przyspieszyła, szczególnie w okresie poprzedzającym publikację tej pracy. Przykładem może być przejęcie w 2020 roku firmy Decawave przez korporację Qorvo; ogłoszenie przez Apple, że w ich telefonach montowany jest autorski układ scalony dedykowany obsłudze UWB [56] czy też wprowadzenie do API Androida, a w 2021 roku do Androida 12 wsparcia dla modułów UWB [57]. Obecnie większość flagowych modeli smartfonów wiodących producentów wyposażona jest w tę technologię.

2.4. Techniki i pojęcia wykorzystywane w pozycjonowaniu

Wyróżnić można pozycję, która może być absolutna (kiedy mowa o konkretnych koordynatach w ujęciu globalnym) albo relatywna, czyli pozwalająca określić położenie względem innego obiektu lub też symboliczna tj. określająca pewne przybliżenie jak np. kierowca w samochodzie czy samochód na parkingu. Metody wykorzystywane w pozycjonowaniu skupiają się na transmisji sygnału pomiędzy punktem referencyjnym a znacznikiem (jak np. w GPS, UWB) lub akwizycji sygnału odbitego (jak radar czy LIDAR). Sposób wyznaczania odległości może być jedno- (np. SS-TWR – Single-Sided Two-Way Ranging) lub dwu-kierunkowy (np. DP.-TWR – Double-Sided Two-Way Ranging), może też nieść dodatkową informację potwierdzającą. Należy zauważyć, że niektóre technologie umożliwiają równoczesną transmisję danych, jednak większość tych obecnie wykorzystywanych w wymiarowaniu nie dysponuje takimi możliwościami. Każda ze wskazanych wcześniej technologii, które umożliwiają pozyskanie informacji o pozycji, wykorzystuje właściwe sobie metody i techniki mające na celu konwersję sygnału w informacje o odległości, a następnie pozycji i charakterze obiektu. Ustandaryzowane i od lat wykorzystywane technologie są ze sobą powiązane np.: GPS wykorzystuje TOF; LIDAR bazuje na chmurze punktów i odległościach bazujących na różnicy w czasie propagacji wiązki laserowej; kamera natomiast przetwarza promieniowanie widzialne, a następnie dokonywana jest identyfikacja obiektów (np. z wykorzystaniem metod inteligencji maszynowej). Niektóre systemy natomiast umożliwiają wykorzystywanie kilku z metod w zależności implementacji (dla UWB np. TOF, TWR, AOA).

Wyróżnić można następujące najważniejsze pojęcia i techniki wykorzystywane w pozycjonowaniu obiektów:

- TOA – (Time Of Arrival) – często stosowany zamiennie z TOF (Time Of Flight) – jest to czas, w jakim sygnał pokonuje drogę od nadajnika do odbiornika. Służy on do wyznaczenia odległości pomiędzy tymi punktami (1). Metoda ta stanowi podstawę algorytmów wymiarowania np. SS-TWR czy DS-TWR. Porównując czas transmisji do prędkości światła w próżni, która najczęściej wykorzystywana jest do opisu prędkości propagacji fali elektromagnetycznej otrzymuje się odległość. Wyznaczenie tego czasu możliwe jest, jeżeli dysponuje się możliwością synchronizacji czasów między urządzeniem nadawczym i odbiorczym, bądź też, jeżeli oba urządzenia korzystają z jednego, precyzyjnego zegara czasu rzeczywistego.

$$d = c * (t_{wys} - t_{odb}) \quad (1)$$

gdzie

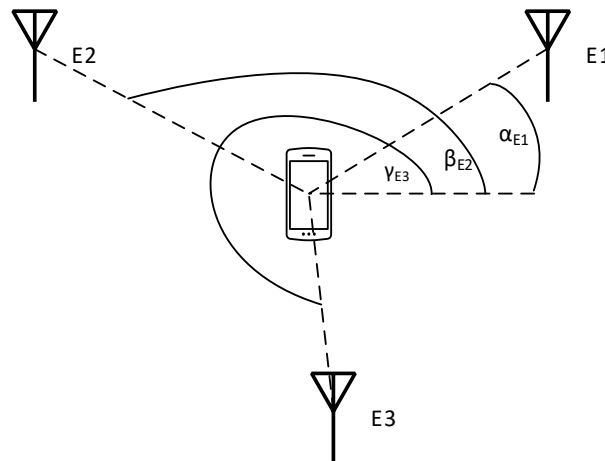
d – odległość między dwoma wymiarowanymi punktami,

c – prędkość propagacji fali (tutaj prędkość światła),

t_{wys} – stempel czasowy wysłania wiadomości z urządzenia nadawczego,

t_{odb} – stempel czasowy odebrania wiadomości w urządzeniu odbiorczym,

- TDoA – (Time Difference of Arrival) – inaczej zwana również multilateracją – to metoda lokalizacji bazująca na TOA. TDoA polega na wyznaczeniu pozycji w oparciu o różnice w czasie odbioru sygnału nadanego ze znanych punktów referencyjnych. Czas ten jest tłumaczony na odległość, ta natomiast – przy znanych koordynatach punktów, z których nastąpił odbiór sygnałów – tłumaczona jest na pozycję.
- AOA – (Angle Of Arrival) – jest to metoda umożliwiająca wyznaczenie kierunku propagacji fali radiowej na podstawie kąta nadejścia sygnału, w której wyznacza się czas nadejścia sygnału poprzez poszczególne elementy szyku antenowego. Następnie z wykorzystaniem operacji geometrycznych z kilku punktów referencyjnych wyznaczany jest punkt przecięcia, w którym znajduje się lokalizowany obiekt. Metoda ta jest często wykorzystywana podczas określania pozycji z wykorzystaniem sieci komórkowej. Przykład działania zaprezentowano na rysunku 5 [50]

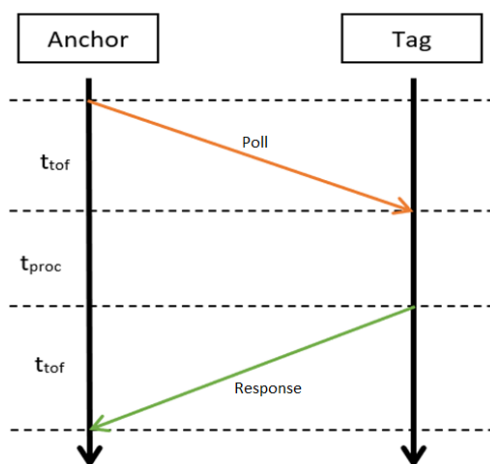


Rys. 5. Przykład działania Angle Of Arrival – na podstawie znanych kątów nadejścia sygnału możliwe jest wyznaczenie pozycji obiektu

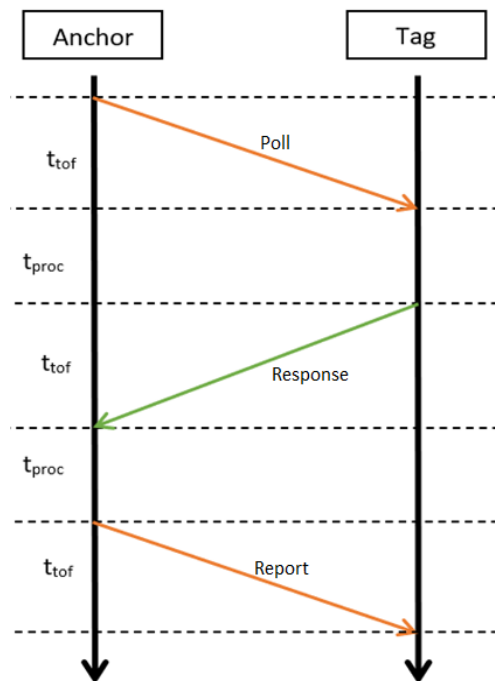
- RSSI – (Received Signal Strength Indicator) – informuje o mocy sygnału odbieranego, co bezpośrednio związane jest z odległością od źródła sygnału (nadajnika). W rzeczywistych implementacjach najczęściej wykorzystuje się informacje z wielu anten referencyjnych, na podstawie których tworzona jest mapa siły sygnału. Określanie pozycji odbywa się wówczas poprzez przyrównanie obecnych odczytów mocy sygnału do informacji zapisanych podczas tworzenia mapy.

- BER (Bit Error Rate), czyli bitowy stopień błędów oraz PER (Packet Error Rate) czyli pakietowy stopień błędów – określenia te definiują wskaźnik, który określa prawdopodobieństwo wystąpienia przekłamania bitu lub pakietu informacji w strumieniu przesyłanych danych.
- LOS oraz NLOS – warunki w jakich odbywa się transmisja pomiędzy antenami nadajnika i odbiornika. Określa, że propagacja fali (elektromagnetycznej, dźwiękowej, świetlnej itp.) odbywa się w sposób bezpośredni tj. nie dochodzi do żadnych odbić, bądź też w przypadku NLOS, fala, która dochodzi do odbiornika została odbita lub przeszła przez inny ośrodek, co zmieniło (najczęściej opóźniło) jej czas propagacji. W przypadku danych pochodzących z systemu UWB istnieją badania [58] mówiące o możliwości rozpoznania rodzaju transmisji na podstawie przebiegu propagowanego sygnału. Wskazują one na fakt, że dane pozyskane w warunkach LOS często charakteryzują się wyższą wartością kurtozy (bardziej scentralizowanym przebiegiem fali), natomiast w przypadku NLOS jest ona bardziej spłaszczona.

Proces wymiarowania bazującego na metodzie TOA oraz metodach SS-TWR i DS-TWR. Schematycznie proces wymiarowania został przedstawiony na rysunkach 6 oraz 7.



Rys. 6. Przykład komunikacji SS-TWR ranging



Rys. 7. Przykład komunikacji DS-TWR ranging

Pierwsza z metod (SS-TWR) polega na wymianie dwóch komunikatów, gdzie pierwsza z ramek biorących udział w wymiarowaniu tzw. *Poll message* wysyłana przez kotwicę inicjuje proces. W odpowiedzi znacznik transmituje

ramkę *Response message*. Zapewnia to możliwość wymiarowania, jednak jednokrotna wymiana informacji obciążona może być dużym błędem – chociaż w warunkach widoczności (LOS) w systemie UWB nie występuje problem wielodrogowości, to w warunkach NLOS komunikat, który dotrze do odbiornika później, powoduje, że wyznaczony dystans między urządzeniami zwiększa się.

Aby zminimalizować to zjawisko, stosuje się metodę DS-TWR, w której do transmisji ramki wymiarującej dochodzi dwa razy – po wymianie dwóch komunikatów jak w SS-TWR następuje transmisja drugiej ramki (tzw. Report message), dla której wyznaczany jest czas. Dopiero na podstawie uśrednionego czasu przelotu tych dwóch komunikatów wyznaczana jest odległość między nadajnikiem a odbiornikiem. Zastosować można również kolejną, czwartą ramkę, która zawiera tzw. *Final message* – służy ona do przekazania informacji o odległości do urządzenia inicjującego transmisję. W metodzie tej ważna jest znajomość czasu przetwarzania sygnału t_{proc} w urządzeniu retransmitującym – w tym celu np. umieszcza się oba urządzenia w znanej odległości (np. 1m) i statystycznie wyznacza czas przetwarzania t_{proc} . Następnie na podstawie znajomości czasu przetwarzania sygnału t_{proc} w urządzeniu retransmitującym można obliczyć czas transmisji sygnału (t_{tof}), co w konsekwencji przy znanej prędkości propagacji fali umożliwia konwersję na odległość między wymiarowanymi punktami (2).

$$d = c * (\Delta t) \quad (2)$$

gdzie:

Δt – różnica w czasie wysłania i odebrania komunikatu

Różnicą między SS-TWR i DS-TWR jest czas pozyskania informacji o pozycji (DS-TWR trwa dłużej), jednak ze względu na uśrednienie dwóch wartości, odczyt z wykorzystaniem DS-TWR jest z reguły dokładniejszy dla statycznego pomiaru (mniej dokładny natomiast w ruchu [59]). Zaletą tej metody jest również brak konieczności synchronizowania zegarów, co stanowi wyzwanie dla systemów o wysokiej częstotliwości, gdzie wymagany jest spójny czas o bardzo wysokiej rozdzielczości.

2.5. Systemy wspomagania kierowców ADAS a możliwość wykorzystania UWB

Branża samochodowa jest drugą po branży medycznej, priorytetową gałęzią przemysłu i różnego rodzaju nowinki technologiczne są wprowadzane w tym właśnie obszarze. Wiele z technologii rozwijanych jest głównie na potrzeby branży automotive, na którą rynek samochodowy wywiera coraz większą presję dotyczącą konstrukcji systemów zapewniających komfort i bezpieczeństwo kierowcy i pasażerów. Systemy ADAS można podzielić ze względu na pełnione funkcje w pojeździe podczas jazdy czy też postoju. Dwa główne aspekty to podnoszenie bezpieczeństwa kierowcy i pasażera oraz podnoszenie komfortu jazdy i obsługi pojazdu. W rozdziale tym przedstawione zostaną istotne z punktu widzenia pracy technologie wykorzystywane w branży samochodowej wraz z ich charakterystyką i wskazaniem punktów, w których możliwe staje się wykorzystanie technologii UWB na potrzeby walidacji stale rozwijanych podsystemów ADAS.

Aktywny tempomat (adaptacyjny) (ACC) [60], [61] – system ten zastępuje kierowcę w utrzymywaniu prędkości przy jednoczesnym zachowaniu bezpiecznego odstępu do poprzedzającego pojazdu. Wpływa więc zarówno na komfort (brak konieczności stałego operowania pedałami gazu i hamulca) oraz na bezpieczeństwo (utrzymanie bezpiecznego odstępu od poprzedzającego pojazdu) jazdy. Zasada jego działania polega na ciągłym monitorowaniu odległości i na jej podstawie (z wykorzystaniem danych takich, jak prędkość czy warunki atmosferyczne, zadeklarowana prędkość maksymalna czy dopuszczana) wyznaczany jest współczynnik przyspieszenia. Zastosowanie walidacji bazującej na systemie UWB może być tutaj dwutorowe. Pierwszym jest określenie odległości od poprzedzającego pojazdu (mówimy wówczas o prostym wariacie wymiarowania między dwoma punktami), drugim, jest możliwość wykorzystania faktu identyfikacji i jednoczesnego przesyłania informacji o statusie przyspieszenia – jest to tak zwana komunikacja V2V (vehicle to vehicle). Wówczas pojazd nie musi bazować jedynie na informacjach wyznaczonych na podstawie zmiany odległości, ale może otrzymać bezpośrednią informację o przyspieszeniu (np. silnie ujemnym wektorze przyspieszenia w przypadku hamowania) i natychmiast wdrożyć odpowiednią akcję, poprzedzając tym samym informację (i konieczną jej analizę) o zmianie odległości. Ze względu na inercyjność pojazdu oraz opóźnienie jakie wnosi wyłącznie analiza odległości, wprowadzenie transmisji danych z wykorzystaniem systemu UWB (np. czy pedał hamulca został intensywnie wciśnięty, czy poprzedzający samochód zbliża się do innej przeszkody) stworzyłoby możliwość zwielokrotnienia informacji pochodzącej już teraz z platform takich jak radar, LIDAR czy systemy wizyjne (aspekt walidacji ADAS), a także pozyskania dodatkowych informacji pochodzących z transmisji danych, co przekładałoby się na szybsze podejmowanie decyzji. Ponadto zapewnienie tych informacji z systemu UWB może pozwolić na lepszą adaptację już istniejących algorytmów, ponieważ w procesie uczenia pozyskamy bezpośrednią informację o przewidywanym manewrze od otaczających nas uczestników ruchu.

System ograniczający skutki kolizji (CMBS – Collision Mitigation Braking System) [62] oraz układ wspomaganie nagłego hamowania – ogólna zasada działania systemu CMBS polega na stopniowym ograniczeniu możliwości wystąpienia kolizji, a w przypadku braku działań, awaryjnym hamowaniu i wystąpieniu szeregu zdarzeń asystujących (najpierw system wdraża sygnalizację wizualną i akustyczną zbliżającego się zagrożenia, następnie lekko uruchamia hamulce i delikatnie zaciska pas bezpieczeństwa, a w przypadku dalszego braku reakcji, napina przednie pasy bezpieczeństwa i uruchamia hamulce ze znaczną siłą). Układ wspomaganie nagłego hamowania natomiast odpowiada za zwiększenie jego siły w przypadku wykrycia rozpoczęcia tego procesu przez kierowcę, przy jednoczesnym wykryciu możliwego zagrożenia kolizją (np. poprzez nagłe, impulsywne wciśnięcie przycisku hamulca). Obecnie działania te opierają się albo na zdarzeniach fizycznych (jak w przypadku nagłego hamowania), albo na określaniu odległości z wykorzystaniem systemów pozwalających na określenie jej od poprzedzającego obiektu. System bazujący na UWB pozwoliłby nie tylko na weryfikację wyznaczonej odległości, ale także na identyfikację obiektu (inny protokół hamowania można by wdrożyć np. w przypadku zagrożenia zderzeniem z pojazdem, a inny w przypadku stacji transformatorowej). Dzięki zastosowaniu systemu UWB pozwalającego na walidację tychże algorytmów, poprawne określenie odległości i identyfikacji obiektów na etapie projektowania algorytmów może pozwolić na lepsze wykrywanie takich obiektów w przyszłości z zastosowaniem radaru, LIDAR-u czy kamer. Co więcej w przypadku wyposażenia seryjnych samochodów w komunikację UWB, można by rozważyć także daleko idące środki zaradcze jak na przykład zwolnienie hamulców w pojeździe, w który ma nastąpić uderzenie lub też nawet (jeżeli byłoby to możliwe w danej sytuacji) przyspieszenie minimalizujące skutki uderzenia lub też nawet zapobiegające mu. Działania takie byłyby możliwe dzięki wykorzystaniu transmisji danych, przy jednoczesnym określaniu odległości z wykorzystaniem np. specjalnie w tym celu przygotowanej ramki UWB.

Kolejnym obszarem, w którym zastosowanie podsystemu UWB może służyć wsparciem systemom wspomaganie kierowcy, jest obszar wykrywania pieszych oraz unikania kolizji w ruchu miejskim. Obecnie systemy te bazują na wykrywaniu przeszkód z wykorzystaniem systemów wizyjnych, radarowych czy LIDAR-owych i charakteryzują się bardzo wysoką skutecznością działania [63], [64]. Głównym ograniczeniem jest jednak możliwość wykrycia przeszkód znajdujących się w warunkach NLOS. Przykładowo samochód włączający się do ruchu na parkingu, mimo że dysponuje systemem wizyjnym, może nie zauważyć przeszkody w postaci nadjeżdżającego samochodu czy pieszego przechodzącego za cofającym pojazdem. Kiedy system wykryje takie zdarzenie, konieczne jest gwałtowne hamowanie. Można uniknąć takich sytuacji bazując na systemie, który wykryje obecność pieszego wyposażonego chociażby w znacznik UWB w telefonie czy też pojazdu z systemem UWB, i już wcześniej ostrzeże przed potencjalną

możliwością zderzenia czy wystąpienia kolizyjnych wektorów ruchu. Mimo, że jest to obecnie aspekt, który wykracza poza obszar prowadzonych badań, jednak zastosowanie technologii UWB stwarza możliwości takiego wykorzystania danych w przyszłości.

Rozpoznawanie znaków drogowych jest obecnie silnie rozwijane i bazuje głównie na wykorzystaniu wizji do identyfikacji i rozpoznawania znaków drogowych [65]. Coraz nowsze systemy wprowadzają głęboką integrację pozyskanych w ten sposób informacji już nie tylko poprzez prezentację na desce rozdzielczej znaków czy ograniczeń prędkości, ale przez integrację z systemami napojazdowymi w postaci adaptacyjnych tempomatów. Przykładem prawnego wsparcia takich rozwiązań jest zaproponowany już w 2018 roku przez Komisję Europejską system ISA (Intelligent Speed Assistance), a którego rozwój jest stale wspierany przez ETSC (European Transport Safety Council) [66]. Bazując na znakach i ograniczeniach prędkości, ma on skłaniać kierowców do utrzymywania wyznaczonych limitów. Wykorzystując transmisję danych system UWB mógłby wpłynąć na walidację systemów ADAS, mających na celu identyfikację takich obiektów, poprzez skrócenie czasu etykietowania czy możliwość pewnego określenia znaku niezależnie od warunków drogowych.

Asystent parkowania to system odpowiadający za ułatwienie kierowcy parkowania lub nawet za całkowite zastąpienie jego działania podczas tego manewru. Posiadając podsystem UWB, pojazd znajdujący się na inteligentnym parkingu, mógłby nie tylko zaparkować w wybranym już przez kierowcę miejscu, ale także – komunikując się z infrastrukturą – sam odnaleźć dostępne miejsce i zadbać o prawidłowe określenie pozycji pojazdu np. na parkingu podziemnym.

Istnieje jeszcze wiele ADAS, w których wsparcie systemu UWB jest możliwe, jednak nie zostały one opisane w sposób szczegółowy, a jedynie wspomniane. Są to między innymi: system dostępu bezkluczykowego, asystent pasa ruchu, Surround View, ostrzeżenie przed pojazdami na drodze poprzecznej czy Brake Assist.

2.6. Analiza SWOT wykorzystania UWB

System pozycjonowania oparty o technologię UWB posiada swoje mocne, ale i słabe strony, a wykorzystanie go do walidacji systemów wspomaganie kierowcy niesie za sobą szanse oraz ryzyka. Dlatego też na podstawie przeglądu artykułów [15], [50], [52], [58], [67], [68] dokonano zbiorczej analizy SWOT (ang. strengths, weaknesses, opportunities, threats), aby jak najbardziej obiektywnie przedstawić możliwości oraz zagrożenia wiążące się z użyciem proponowanych rozwiązań.

Silne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> • Dokładność lokalizacji – pozwala zarówno na precyzyjne manewry, jak i wysoką ufnosć dla systemu poruszającego się z wysoką prędkością. • Możliwość transmisji danych – dostępna przepustowość pozwala na wykorzystanie systemu zarówno do pozycjonowania, jak i przekazywania informacji. • Ze względu na charakterystykę transmisji generowane są niskie zakłócenia dla innych kanałów komunikacji, przy jednoczesnej wysokiej odporności na zakłócenia z zewnątrz. • Niskie zapotrzebowanie na moc. • Szybka instalacja i konfiguracja. 	<ul style="list-style-type: none"> • Brak istniejącej infrastruktury w środowisku miejskim tworzy konieczność implementacji wszystkich składowych systemu. • Wysoki koszt implementacji w stosunku do już rozpowszechnionych systemów pozycjonowania. • Mała liczba dostawców technologii i niska konkurencyjność na rynku. • Obecnie nie w pełni rozwiązany aspekt skalowalności sieci dla dużej liczby punktów referencyjnych i znaczników. • Istnieje zależność dokładności od częstości pozyskiwania danych.
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> • Implementacja modułów UWB przez producentów smartfonów oraz firmy z branży samochodowej zwiększa dostępność technologii oraz jej upowszechnienie. • Możliwość skorzystania z lokalizacji jako efektu ubocznego stosowania technologii UWB do transmisji danych. • Poziom dokładności stanowi konkurencję dla hybrydowych systemów pozycjonowania (opartych o kilka technologii, działających zarówno na zewnątrz jak i wewnątrz budynków). • Zastosowania militarne. 	<ul style="list-style-type: none"> • Obecnie brak wielkoskalowych rozwiązań „out of the box”. • Obecny rozwój alternatywnych technologii komunikacji takich jak ZigBee, czy 5G umożliwiających także pozycjonowanie może zagrozić pozycji UWB na rynku. • Niska konkurencyjność, której efektem są stosunkowo wysokie ceny modułów może powodować zaniechanie technologii na rzecz technologii bardziej przystępnych i tańszych w wdrożeniu. • Część zastosowań komercyjnych nie wymaga aż tak wysokiej dokładności i może być z powodzeniem zastąpiona rozwiązaniami bazującymi na technologiach takich jak WiFi czy Bluetooth.

Na podstawie analizy SWOT można stwierdzić, że system pozycjonowania bazujący na technologii UWB ma duży potencjał implementacyjny, Jednak jego rozwój i popularność w rzeczywistych zastosowaniach może zależeć od szybkości wdrażania rozwiązań i dostępności systemu na rynku. Informacją napawającą optymizmem może

być szereg doniesień medialnych wskazujących na coraz częstsze sięganie po technologię UWB. Przykładem może być implementacja modułów UWB w urządzeniach marki Apple [56], w urządzeniach bazujących na systemie Google [57] czy w końcu w rozwiązaniach zastosowanych na przykład w nowojorskim metrze [69].

2.7. Miary dokładności pozycji obiektu

Zastosowanie technologii wymiarowania bazującej na UWB niesie za sobą konieczność określenia dokładności pozycjonowania jaką rozważany system może osiągnąć. W tym celu zaproponowano kilka miar, które mają to umożliwić. Ponadto w pracy wykorzystano także dodatkowe miary dokładności i rozkładu pozwalające opisać pozyskiwane dane. Pierwszym z wykorzystanych jest błąd średniokwadratowy (RMSE – root-mean-square error) wyrażony przykładowym wzorem dla pozycji dwuwymiarowej (3).

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

RMSE pozwala określić, na ile rozkład punktów różni się od oczekiwanej wartości referencyjnej dla każdej z serii pomiarowych. Inną braną pod uwagę wartością było maksymalne odchylenie wartości odległości dla każdej z serii pomiarowych wyrażone przykładowym wzorem dla pozycji dwuwymiarowej (4). Metryka ta pozwala na określenie poprawności korekty np. wartości odstających oraz wskazuje, jakiego maksymalnego błędu można się spodziewać przy zadanych warunkach.

$$MAX_p = \max_{i \in N} \left(\sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2} \right) \quad (4)$$

Ze względu na fakt, iż niemożliwym jest wyznaczenie wspomnianych parametrów dla wszystkich możliwych konfiguracji zmiennych środowiskowych, jako jedną z metryk proponuje się także błąd standardowy, pozwalający określić zmienność wyników w różnych próbach dla danego pomiaru. Wyraża się go przykładowym wzorem dla pozycji dwuwymiarowej (5).

$$SE_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

Średnia arytmetyczna wykorzystywana w pracy pozwala określić tendencję centralną danej próby a wyrażona jest wzorem (6).

$$\hat{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_N \quad (6)$$

Odchylenie standardowe (7) ma zastosowanie w pracy do danych, których akwizycja została dokonana w sposób statyczny. Pozwala określić, jak szeroko wartości danego pomiaru są rozrzucone wokół jego średniej.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x})^2} \quad (7)$$

Wszystkie powyższe wzory wykorzystano do końcowej analizy poprawności proponowanych metod, niemniej jednak podczas prowadzonych badań wykorzystywano także inne, pozwalające na określenie skuteczności algorytmów.

3. System lokalizacji i identyfikacji obiektów

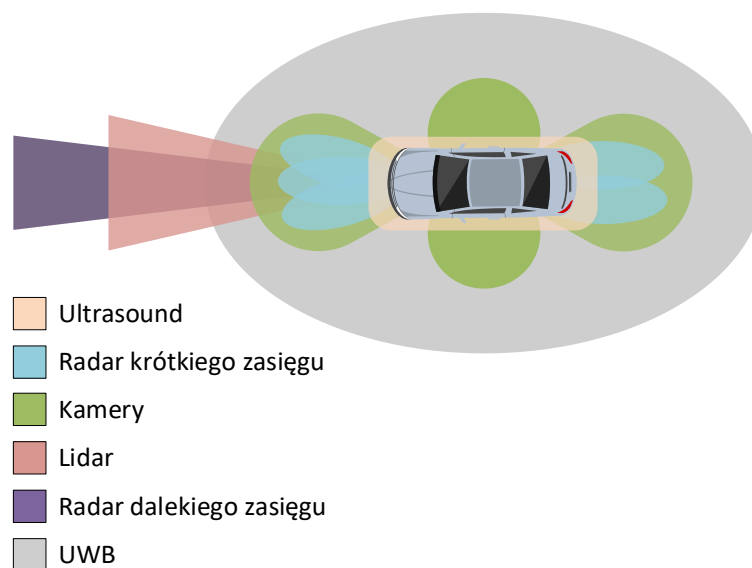
Walidacja oraz rozwój systemów wspomagania kierowcy, bazujących na ogólnie rozumianej analizie sygnałów wizyjnych, boryka się z takimi problemami jak np. brak zautomatyzowanej identyfikacji obiektów (etykietowania) w otoczeniu pojazdu [70], [71]. Automatyzacja procesu etykietowania przyspieszy zarówno proces wstępnej obróbki danych, jak i rozwój algorytmów np. sztucznej inteligencji, które mają na celu właściwą interpretację sygnałów lub obrazów pochodzących z pozostałych podsystemów analizujących otoczenie pojazdu. Posiadanie referencji pozwoli także na walidację powstających algorytmów – wtedy znacznie łatwiej będzie można tworzyć rzeczywiste przejazdy testowe, na których pojawią się identyfikatory obiektów razem ze względną odległością oraz kątem względem osi wzdłużnej pojazdu. Problem ten jest na tyle poważny, że większość algorytmów jest aktualnie testowana w symulatorach jazdy np. Carla [72] lub Gazebo [73]. Celem nie jest zastąpienie symulatorów [74], ale zaprojektowanie takiego podejścia (procedury), które umożliwi wykorzystanie technologii UWB do wstępnego etykietowania, co z kolei przełoży się na możliwość walidowania wypracowanych na poziomie symulatora algorytmów wspomagania kierowcy [75], [76]. Dlatego pojawiają się pytania, jakie ograniczenia wprowadza etykietowanie, czy dokładność z jaką pozyskiwana jest odległość jest wystarczająca do etykietowania i ile wynosi.

Innym problemem z jakim borykają się obecnie powstające systemy wspomagania kierowcy jest kwestia poprawnej identyfikacji. Jak wykazano w tabeli 1 w rozdziale 2, w przypadku branży samochodowej, identyfikacja związana jest głównie z technologiami, które są rzadko stosowane, a ich dokładność w kontekście lokalizacji – szczególnie w aspekcie środowiska zewnętrznego – jest niska. Pokazuje to, że brakuje technologii, która umożliwiłaby lokalizację z akceptowalną dokładnością, przy jednoczesnej identyfikacji. Bardzo dużą potrzebę identyfikacji przy jednoczesnej lokalizacji wskazano także w rozdziale 2.5, w którym przedstawiono obecnie istniejące i rozwijane algorytmy technologii ADAS, dla których informacje te są niezbędne do poprawnej pracy. Potrzeba ręcznej identyfikacji (znakowania) danych, która wymaga wielu zasobów ludzkich i czasu w procesie rozwoju algorytmów ADAS, jest w przypadku tych rozwiązań widocznym wyzwaniem, a jego optymalizacja i ocena jest przedmiotem ciągłych badań [77].

Przed proponowanym systemem powstają więc wymagania związane z dokładnością wyznaczania odległości oraz czasem opóźnienia, który będzie mógł być uwzględniony na etapie projektowania systemu ADAS. Pojawiają się także pytania o aspekty takie jak: wpływ prędkości samochodu na otrzymywane informacje o prędkości, konieczność wskazania wymaganej infrastruktury, wpływu czynników zewnętrznych na system, a także aspekty niemniej istotne, aczkolwiek związane już z konkretnymi implementacjami jak rozmieszczenie i liczba elementów UWB na lub

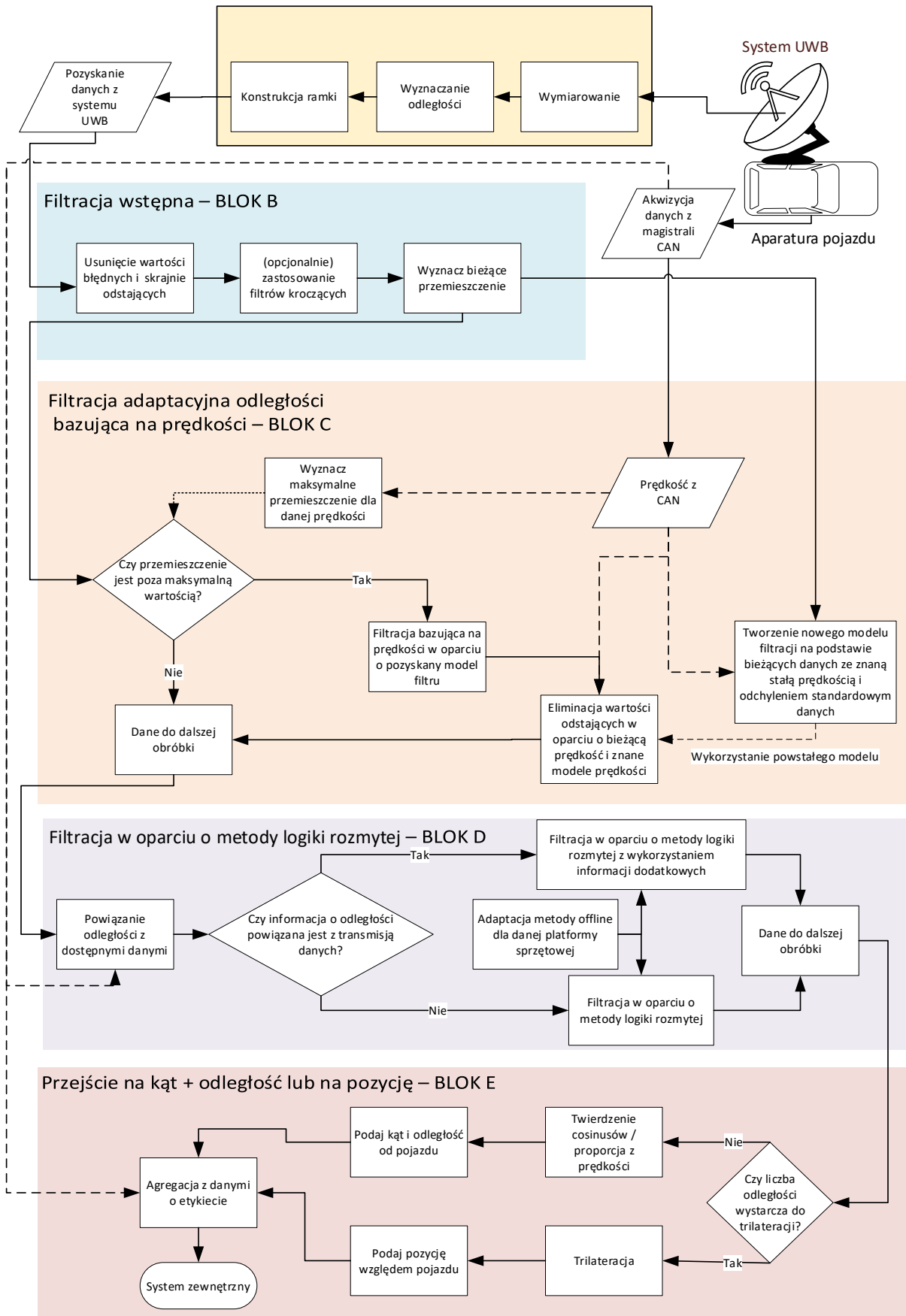
w samochodzie. Tworzy to więc konieczność zaaranżowania procedury pozwalającej wykorzystać system UWB do wymagań stawianych systemowi etykietowania, ale także – w perspektywie przyszłego zastosowania systemu – pracy w wariancie online tj. określenia opóźnienia pozyskanej pozycji względem aktualnej prędkości pojazdu dla różnej długości ramki; wpływu tego opóźnienia na dokładność wyznaczonej odległości; sposobu identyfikacji (etykietowania) obiektów. Jeśli wziąć pod uwagę również pozycję, czy też odległość i kąt względem osi pojazdu, pod którym znajduje się obiekt, to pozwoli to na przejście od systemu UWB do danych (np. identyfikatora obiektu i jego położenia względem wybranego punktu na pojeździe), które mogą zostać wykorzystane na rzecz walidacji ADAS przy zachowaniu wymagań i ze świadomością ograniczeń (np. czasowych), które funkcjonują w obszarze technologii samochodowych. Należy również pamiętać, że oczekiwane rozwiązanie powinno cechować się dokładnością pozwalającą na etykietowanie tj. nie mniejszą niż wymiary, bądź zagęszczenie potencjalnie etykietowanych obiektów. Zważywszy na to, że obecnie w literaturze nie istnieją podobne rozwiązania, koniecznym jest opracowanie procedury umożliwiającej identyfikację i jednoczesną lokalizację obiektu względem samochodu, procedurę transmisji danych (np. projekt struktury danych), jak i ich filtracji.

Na tym etapie istotne jest także umiejscowienie systemu UWB w kontekście innych technologii ADAS. I tak, mimo że system w obecnej formie nie charakteryzuje się zasięgiem porównywalnym z LIDAR-ami czy radarami dalekiego zasięgu (kilkaset metrów), to pozwala z powodzeniem na śledzenie otoczenia pojazdu (co pokazano na rysunku 8), obsługę obszarów dostępnych dla kamer a jednocześnie działanie w warunkach NLOS, a więc warunkach często spotykanych w środowisku miejskim. Jest to szczególnie istotne w kontekście percepcji otoczenia, w przypadku którego niektóre z obiektów mogą być niewidoczne dla np. systemu radarowego (charakterystyka płaszczyzny) czy systemów wizyjnych (przysłonięte innymi uczestnikami ruchu).



Rys. 8. Koncepcja zasięgu systemu UWB względem innych ADAS

Opracowana w ramach doktoratu (wielowątkowa) procedura do pozycjonowania i etykietowania elementów infrastruktury miejskiej przedstawiony został szczegółowo na rysunku 9. Proces został podzielony na pięć etapów, które umieszczono w blokach od A do E. Blok A wiąże się z akwizycją i obróbką danych po stronie modułów UWB. Blok B związany jest z obróbką danych surowych w postaci usunięcia wartości skrajnie odstających, uzupełnieniu brakujących danych czy opcjonalnej filtracji z wykorzystaniem filtrów z kroczącym oknem. Kolejny blok (C) związany jest z filtracją adaptacyjną bazującą np. na prędkości pojazdu co pozwoli na dostosowanie filtru do bieżących warunków ruchu. W bloku D dokonywana jest korekta odległości w oparciu o metody logiki rozmytej, której istotnym aspektem jest także wcześniejsze przygotowanie odpowiednich reguł. Krok ten bazuje zarówno na odległości jaka jest pozyskiwana z systemu, ale także na dodatkowych informacjach zarówno z UWB (takich jak np. liczba transmitowanych bajtów danych), jak i z innych podsystemów ADAS np. środowisko czy potencjalne występowanie przeszkód. W ostatnim z proponowanych bloków (E) realizowana jest transformacja pozyskanych danych, w którym wejście bloku stanowią informacje o identyfikatorze oraz przetworzonej odległości, natomiast na wyjściu otrzymujemy informację o obiekcie i jego położeniu względem naszego pojazdu. W kolejnych rozdziałach pracy zostały szczegółowo omówione wszystkie widoczne na schemacie etapy – w pierwszej kolejności założenia teoretyczne (rozdział 3 „System lokalizacji i identyfikacji obiektów”), a następnie badania weryfikujące zaproponowane podejście (rozdział 4 „Implementacja i analiza systemu lokalizacji i identyfikacji”).



Rys. 9. Schemat blokowy procedury przetwarzania danych z systemu UWB.

3.1. Etap akwizycji danych z systemu pozycjonującego UWB

System bazujący na technologii UWB umożliwia transmisję danych oraz pomiar czasu – proces ten został zobrazowany na schemacie (rysunek 9) w bloku A. Są to jednak dane, które w swojej surowej postaci nie umożliwiają walidacji. Ponadto na tym etapie należy pamiętać, że inne systemy dokonują również akwizycji danych, które mogą być niezbędne na dalszych etapach filtracji i pracy (jak na przykład danych o prędkości z magistrali CAN).

Proces wymiarowania systemu pozycjonującego UWB oparto na podejściu TOA. W trakcie prowadzonych badań zawsze bazowano na metodzie TWR (opisanej w rozdziale 2.4), jednak w dwóch wariantach – SS-TWR oraz DS-TWR, gdzie pierwsze z nich zapewnia wyższą częstość pozyskiwania danych kosztem zakładanej niższej dokładności i niższej precyzji, drugie natomiast z założenia zwiększa dokładność i precyzję danych surowych, ale wydłuża proces wymiarowania przez co staje się on rzadszy. Niezależnie jednak od wariantu efektem jest pozyskanie odległości od punktu referencyjnego. Równocześnie w czasie transmisji dochodzi do przestania ramki danych (jedna z ramek rozbudowana zostaje o dodatkowe dane), która odpowiada za identyfikację. Opis analizy procesu transmisji, który prowadzi do propozycji odpowiedniej struktury danych oraz badań z nią związanych, jest jednak obszernym zagadnieniem i zdecydowano się go przenieść do oddzielnego rozdziału – rozdziału 5 „Struktura danych do identyfikacji obiektów”.

Dysponując informacją o odległości między urządzeniami w sieci można przejść bezpośrednio do dalszej analizy. Tak zebrane dane o odległościach agreguje się w osobny wektor odległości który przyjmuje oznaczenia (8).

$$D_{AB} = \{d_i, d_{i-1}, d_{i-2}, \dots, d_n\} \quad (8)$$

gdzie

D_{AB} – seria pomiarowa odległości pomiędzy konkretnym punktem referencyjnym (A) a znacznikiem (B)

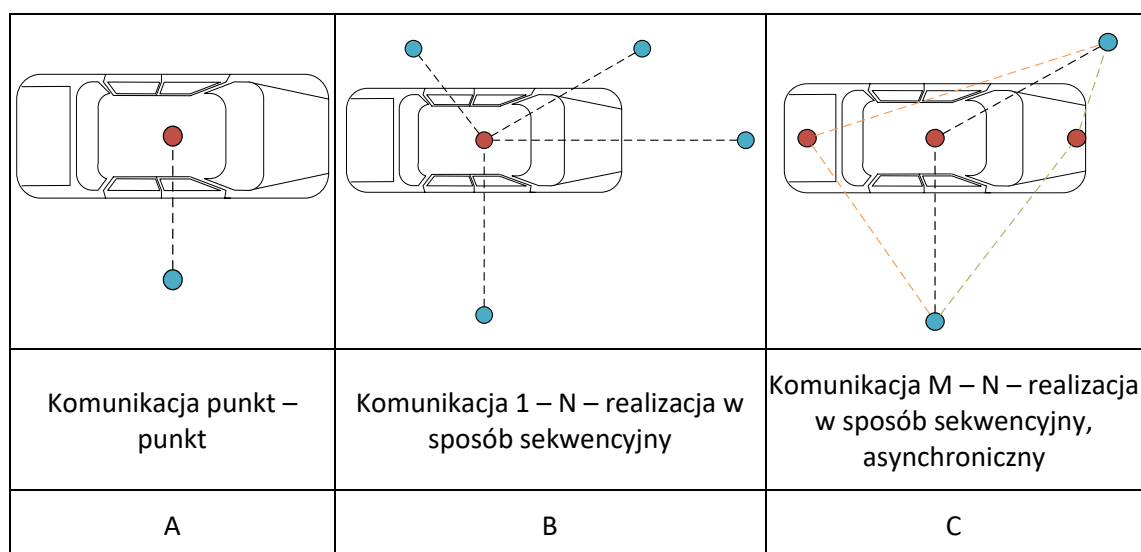
i – oznacza zawsze numer najnowszej informacji pozyskanej z systemu UWB

n – liczba wszystkich informacji o odległości zarejestrowanych w tej serii pomiarowej

Tak więc proces prowadzący do otrzymania pozycji i identyfikatora obiektu z systemu UWB w swojej warstwie sprzętowej (np. z kotwicy umieszczonej na pojeździe do systemu nadrzędnego będącego komputerem pokładowym) składa się z:

1. rozgłoszenia ramki Poll wzywającej do wymiarowania,
2. odpowiedzi Response podejmującej proces,
3. ramki Final finalizującej mechanizm DS-TWR,
4. etapu obróbki czasów po stronie mikrokontrolera (zgodnie z opisem w 2.4),
5. przygotowaniu danych do przekazania (np. utworzenie odpowiedniej struktury danych),
6. przesłaniu danych (np. z wykorzystaniem magistrali UART).

Jeżeli w systemie znajduje się jedna kotwica oraz jeden znacznik, to proces ogranicza się do bezpośredniej komunikacji między tymi węzłami (rysunek 10 A). Jeżeli w sieci znajdzie się więcej znaczników proces zawarty w punktach 1 – 4 odbywa się w sposób sekwencyjny dla każdego z nich (jak na rysunku 10 B). Jeżeli natomiast w sieci znajdują się dodatkowe kotwice oraz znaczniki, proces będzie odbywał się asynchronicznie (tj. każda z kotwic będzie odpytywana przez znaczniki w sposób asynchroniczny i pseudolosowy w zależności od dostępności do wymiarowania, co przedstawiono na rysunku 10 C). W zależności od liczby punktów referencyjnych od których otrzymamy informacje o odległości, możliwe jest określenie kąta względem osi pojazdu lub też przeprowadzenie trilateracji, czyli procesu pozwalającego na określenie pozycji na podstawie odległości od punktów o znanych współrzędnych. Proces ten został opisany w rozdziale 3.5.



Rys. 10. Proces komunikacji pomiędzy różną liczbą kotwic na pojeździe i znaczników w ramach etykietowanej infrastruktury

Dopiero po zgromadzeniu odległości od wybranej (lub minimalnej) liczby punktów referencyjnych lub po wystąpieniu ograniczenia czasowego następuje proces przesłania danych, a następnie cała procedura ponownie się rozpoczyna.

Kolejnym etapem w procesie przetwarzania danych jest przeprowadzana korekta odległości, bazująca na danych o prędkości pojazdu. Szczegółowy schemat przedstawiony został w bloku „Filtracja adaptacyjna odległości bazująca na prędkości”, a omówiony w rozdziale 3.3 o tym samym tytule.

3.2. Filtracja wstępna

Pierwszym z etapów przetwarzania danych wskazanym na schemacie (rysunek 9) w bloku B jest wykorzystanie filtrów z krocącym oknem. Element ten okazuje się być konieczny, ze względu na ograniczoną dokładność pozyskiwania odległości oraz braki danych wynikające z procesu wymiarowania. W ramach zastosowanych metod filtracji z krocącym oknem można wyróżnić:

Filtr medianowy jest nieliniową techniką filtrowania cyfrowego, często stosowaną do redukcji szumów jako część przetwarzania wstępnego. Należy do rodziny filtrów z krocącym oknem. Jego działanie polega na wyborze wartości środkowej uporządkowanego rosnąco ciągu wartości lub też, w przypadku parzystej liczby elementów, średniej wartości środkowych.

Filtracją medianową zbioru x_i z oknem k , gdzie $i = 1, \dots, k$ oraz $x_i \leq x_{i+1}$ przedstawiono w równaniu (9).

$$med(x_i) = \begin{cases} x_{j+1} & \text{for } k = 2j + 1 \\ \frac{1}{2}(x_j + x_{j+1}) & \text{for } k = 2j \end{cases} \quad (9)$$

Innym proponowanym filtrem jest filtr średniej ruchomej. Ten rodzaj filtracji bardzo dobrze eliminuje wartości wynikające z systemu (szum, brak powtarzalności, itp.) (10).

$$avg(x_i) = \frac{1}{k} \sum_{\substack{j=-\lfloor \frac{k}{2} \rfloor \\ j \in \mathbb{Z}}}^{\lfloor \frac{k}{2} \rfloor} x_{i+j} \quad (10)$$

Kolejną proponowaną metodą filtracji jest filtr Savitzky'ego-Golay'a, który opiera się na aproksymacji wielomianowej liniową metodą najmniejszych kwadratów. Filtr ten dopasowuje wielomian m stopnia do danych w oknie tak, aby suma (ε_m) kwadratów różnic wartości obliczonych z funkcji aproksymującej (x'_{i+j}) i wartości próbki sygnału wejściowego (x_{i+j}) była jak najmniejsza w oknie (11).

$$\varepsilon_m = \sum_{j=-\lfloor \frac{k}{2} \rfloor}^{\lfloor \frac{k}{2} \rfloor} (x'_{i+j} - x_{i+j})^2 \quad (11)$$

Nowa odfiltrowana wartość x' obliczana jest przy użyciu przybliżonego współczynnika funkcji c (12).

$$x'_{i+j} = \sum_{l=0}^m c_l (i+j)^l \quad (12)$$

Korzystając z właściwości danych charakteryzujących się rozkładem normalnym (gaussowskim) próbek, zdecydowano się na zastosowanie filtra Wienera. Filtr Wienera, będący ostatnią propozycją filtra z krocącym oknem szacuje lokalną średnią (13) i wariancję (14) wokół każdej próbki

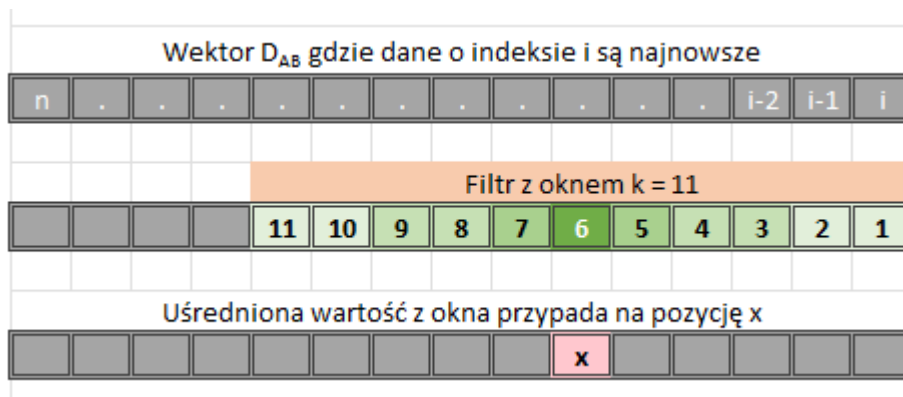
$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} x(n_1, n_2) \quad (13)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} x^2(n_1, n_2) - \mu^2 \quad (14)$$

Gdzie macierzy sąsiedztwa NM odpowiada okno filtra użytego w danym przypadku (np. 1x11), a wyjście filtra wygląda w sposób opisany wzorem (15), gdzie v^2 to wariancja szumu.

$$x'_i = \mu_i + \frac{\sigma_i^2 - v^2}{\sigma_i^2} (x_i - \mu_i) \quad (15)$$

Zastosowanie filtrów z krocącym oknem wiąże się jednak z bardzo dobrze widocznym wpływem okna filtra na przesunięcie czasowe otrzymywanych danych, gdzie wpływ jest nie tylko zależny od zdolności obliczeniowych jednostki zajmującej się przetwarzaniem danych, ale ma na to także wpływ sama parametryzacja filtra. Każdy bowiem filtr z przesuwym oknem generuje opóźnienie wielkości połowy używanego okna czego przykład przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Graficzna prezentacja opóźnienia wynikającego z zastosowanie filtrów z oknem przesuwym

Na rysunku widać, że efektem zastosowania filtra z oknem wielkości jedenastu próbek na wektorze danych D_{AB} jest otrzymanie odległości (np. uśrednionej), która jednak nie odpowiada logicznie najnowszej wartości, lecz np. wynikającej z długości okna. Tak więc opóźnienie T jest równe sufitowi połowy okna filtra jak zapisano we wzorze (16).

$$T = \left\lceil \frac{i}{2} \right\rceil = \min \{k \in \mathbb{Z}: k \geq \frac{i}{2}\} \quad (16)$$

Mając świadomość tej zależności można wskazać również zależność między oknem filtra, a opóźnieniem jakie będzie efektem zastosowania tego filtra przy zadanej prędkości poruszania się pojazdu (17).

$$D = T * \frac{1}{f} * v \quad (17)$$

Gdzie:

D [m] – dystans pokonany przez pojazd

T – opóźnienie wynikające z zastosowanego okna filtra

f [$\frac{\text{liczba próbek}}{s}$] – częstość pozyskiwania danych z systemu

v [$\frac{m}{s}$] – bieżąca prędkość poruszania się samochodu

W ramach proponowanych metod zakłada się, że system pozyskuje dane o odległościach w stałym interwale czasowym, dlatego też aspekt różnicy w czasie pozyskania danych nie jest szczegółowo uwzględniony podczas filtracji. W ramach filtracji wstępnej realizowane jest także uzupełnienie brakujących informacji o odległości. Sytuacja taka może wystąpić np. kiedy system nie będzie w stanie uzyskać odpowiedzi dla jednej z anten na pojeździe w trakcie wystąpienia warunków NLOS uniemożliwiających dotarcie sygnału w maksymalnym dopuszczalnym przez system czasie (timeout – T_{max}). W wykorzystywanym systemie wartość T_{max} wynosi 40ms, co pozwala na zakładaną minimalną częstość pozyskiwania danych na poziomie 25Hz. Uzupełnienie wartości realizowane jest z wykorzystaniem interpolacji liniowej $L(x)$ która w swojej postaci dla przedziału $[x_0, x_1]$ wyrażonej jest wzorem (18).

$$L(x) = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (18)$$

3.3. Filtracja adaptacyjna odległości bazująca na prędkości

Jednym z problemów mających wpływ na dokładność pozyskiwania danych z systemów wsparcia kierowcy jest prędkość poruszającego się pojazdu. Mimo że częstość pozyskiwania danych z systemu UWB może być kilkukrotnie wyższa niż klasycznych systemów wizyjnych [68], to jednak jego właściwa adaptacja do prędkości jest bardzo istotnym aspektem. Dlatego też system UWB podlega stałej kalibracji z wykorzystaniem informacji związanych z dynamiką pojazdu. Jest to etap przetwarzania danych na schemacie blokowym (rysunek 9) w bloku C.

3.3.1. Współczynnik korekcji filtru

Podczas gdy pojazd znajduje się w stanie spoczynku (np. przed wyjazdem z garażu, na skrzyżowaniu, na pasach czy w korku), i dane z innych podsystemów (np. dane o prędkości z magistrali CAN) wskazują na to, że pojazd nie porusza się, następuje etap akwizycji danych i doboru odpowiedniego okna filtru, co ma pozwolić na prowadzenie właściwej filtracji. Etap ten bazuje na odchyleniu standardowym uzyskiwanym dla pomiarów odległości z systemu UWB. Na podstawie analizy działania systemu w różnych warunkach zaproponowano bazę reguł przedstawioną w tabeli 2. W przypadku kiedy system nie może wykonać kalibracji w oparciu o znaczniki zewnętrzne (np. pojazd nie znajduje się w stanie spoczynku lub system nadrzędny nie jest w stanie przekazać informacji o referencji), proponuje się, aby taka kalibracja zaszła pomiędzy węzłami systemu UWB znajdującymi się na pojeździe.

Tab. 2. Proponowane współczynniki korekty filtru.

<i>Wartość parametru odchylenia standardowego</i>	<i>Przedział</i>	<i>Okno filtru (k)</i>	<i>Wartość współczynnika korekty odległości (p)</i>
<i>Niska</i>	$\Delta \leq 5$	7	1,0
<i>Poniżej średniej</i>	$5 < \Delta \leq 7$	9	1,1
<i>Średnia</i>	$7 < \Delta \leq 10$	11	1,2
<i>Powyżej średniej</i>	$10 < \Delta \leq 15$	15	1,5
<i>Wysoka</i>	$15 < \Delta \leq 20$	19	1,7
<i>Bardzo wysoka</i>	$20 < \Delta$	21	2,0

Jeżeli system nadrzędny wskazuje na rozpoczęcie ruchu, następuje faza korekcji poszerzonej o filtrację bazującą na dokonanej adaptacji filtru. Należy odczytać dane z magistrali CAN o aktualnej prędkości pojazdu. Na ich podstawie wyznaczane jest maksymalne przesunięcie (wyznaczenie d_{MAX}) jakie jest dopuszczalne w systemie na wypadek wystąpienia wartości odstających (19).

$$\Delta d_{MAX} = V_{CAN} * (t_i - t_{i-1}) * p \quad (19)$$

gdzie:

V_{CAN} – buforowana prędkość z magistrali CAN

t_i – czas najnowszej ramki z systemu UWB

t_{i-1} – czas poprzedniej ramki z systemu UWB

p – wartość współczynnika korekty odległości

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie przemieszczenia dla danej odległości w systemie UWB (20).

$$\Delta d_i = d_i - d_{i-1} \quad (20)$$

Następnie sprawdzany jest warunek czy przemieszczenie bieżące jest większe niż maksymalne dopuszczalne przemieszczenie (21).

$$\Delta d_{MAX} < \Delta d_i \quad (21)$$

Jeżeli warunek ten jest spełniony, bieżąca odległość d_i jest korygowana w oparciu o filtrację uśredniającą z oknem bazującym na wcześniej zaproponowanej (tabela 2) bazie reguł (22)

$$avg(d_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k d_{i+j} \quad (22)$$

Jeżeli natomiast pojazd znajduje się w ruchu, a system nadrzędny nie jest w stanie dostarczyć UWB niezbędnych informacji związanych np. ze środowiskiem czy warunkami, które bezpośrednio wpływają na odchylenie standardowe, a co za tym idzie na parametr korekty, proponuje się, aby korzystać z RSSI, którego analizę przeprowadzono w rozdziale 4.1. Analiza otrzymywanych wartości RSSI pozwala na określenie różnicy pomiędzy odległością otrzymaną w warunkach referencyjnych (np. NLOS) a warunkach bieżących.

Po wprowadzeniu korekty dalsze kroki przetwarzania danych odbywają się zgodnie ze schematem (rysunek 9) w bloku D.

3.4. Korekta odległości z wykorzystaniem logiki rozmytej

Kolejnym etapem pracy nad zwiększeniem dokładności otrzymywanej informacji o odległości między węzłami systemu (przedstawionym na schemacie (rysunek 9) w bloku D) było zastosowanie elementów logiki rozmytej. Zauważono, że zmienność jakości wymiarowania z wykorzystaniem technologii UWB zależy od kilku dynamicznie zmieniających się podczas jazdy czynników, dlatego też zdecydowano się na zastosowanie metod logiki rozmytej która pozwala na dobre odzwierciedlenie tych zmian. W pracy zastosowano dwa modele: model Mamdaniego [78]–[82], który został oparty o analizę statystyczną zestawu pomiarów referencyjnych, dla których utworzono reguły na podstawie otrzymanych błędów oraz model Sugeno, który został utworzony z wykorzystaniem tych samych danych, jednak część wnioskującą zastąpiono adaptacyjnym neuronowo-rozmytym systemem wnioskowania (ANFIS Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Finalnie zaproponowane rozwiązanie bazuje na podejściu Sugeno, jednak funkcje przynależności zostały zmodyfikowane w oparciu o wiedzę uzyskaną z modelu Mamdaniego.

3.4.1. Model Mamdaniego

Punktem startowym do stworzenia tego modelu są przeprowadzone badania i analiza statystyczna otrzymanych rezultatów. W tym celu należy wykonać pomiary w przyjętych punktach referencyjnych P_{ref} których statyczną akwizycję proponuje się przeprowadzić dla scenariuszy przedstawionych w tabeli 3. Proces akwizycji danych związanych z informacją o odległości przedstawiono na rysunku 12, a dane przedstawiono w tabelach 4, 5, oraz 6. Każda z serii danych zawierała po 10 000 informacji o odległości, które po uśrednieniu stanowią wartość danej serii.



Rys. 12. Proces akwizycji danych przy różnych parametrach pracy systemu np. (a) wewnątrz i (b) na zewnątrz budynku.

Tab. 3. Zestawienie scenariuszy testowych na potrzeby opracowania metod logiki rozmytej

Mierzona wielkość	Zakres pomiarów (proponowane P_{ref})
Odległość	0,25m, 0,5m, 0,75m, 1m, 1,5m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 8m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m
Wysokość anten	1m, 1,5m
Środowisko	Wewnątrz budynku, na zewnątrz budynku
Widoczność anten	Anteny na linii wzroku, anteny przystońnięte (występowanie przeszkód uniemożliwiających bezpośrednią propagację)
Transmitowane dane	Brak dodatkowych danych, 10B, 25B, 50B 80B

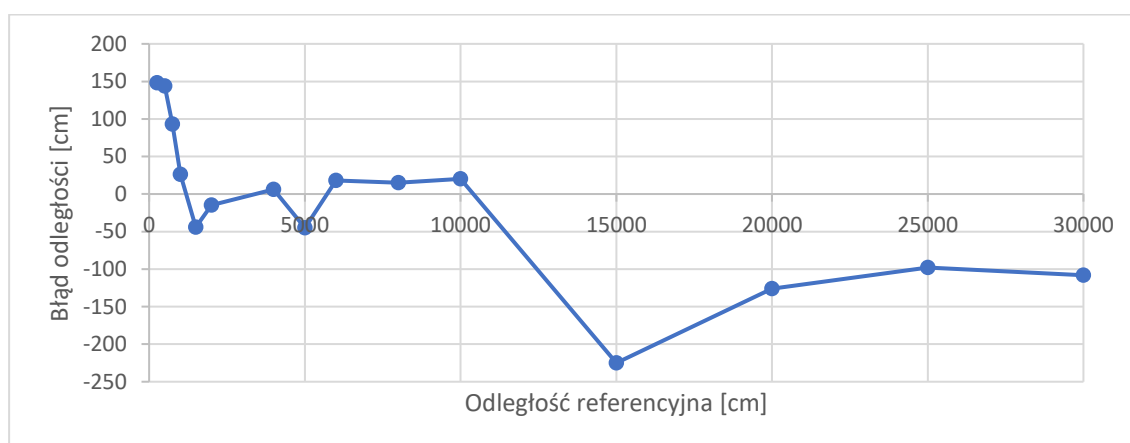
Zmienna lingwistyczna odległość i środowisko

Dla tak otrzymanych serii danych wyznaczono wartości średniej, które zostały przyjęte jako podstawa do utworzenia reguł systemu eksperckiego. Odległości wraz z wartościami rzeczywistymi średniego błędu oraz błędem względnym przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 4. Wartości błędu w pomiarze odległości dla środowiska zewnętrznego i wewnętrznego

Odległość referencyjna [cm]	Środowisko zewnętrzne		Środowisko wewnętrzne	
	Odległość [cm]	Procent odległości referencyjnej	Odległość [cm]	Procent odległości referencyjnej
25	5,8	23%	10,2	41%
50	34,2	68%	35,6	71%
75	59,6	79%	65,7	88%
100	89,9	90%	97,4	97%
150	139,7	93%	154,4	103%
200	195,4	98%	201,5	101%
400	402,3	101%	399,4	100%
500	502,6	101%	504,5	101%
600	608,5	101%	598,2	100%
800	816,2	102%	798,5	100%
1000	1003,7	100%	998,0	100%
1500	1504,8	100%	1522,5	102%
2000	1997,4	100%	2012,6	101%
2500	2483,0	99%	2509,8	100%
3000	2983,6	99%	3010,8	100%

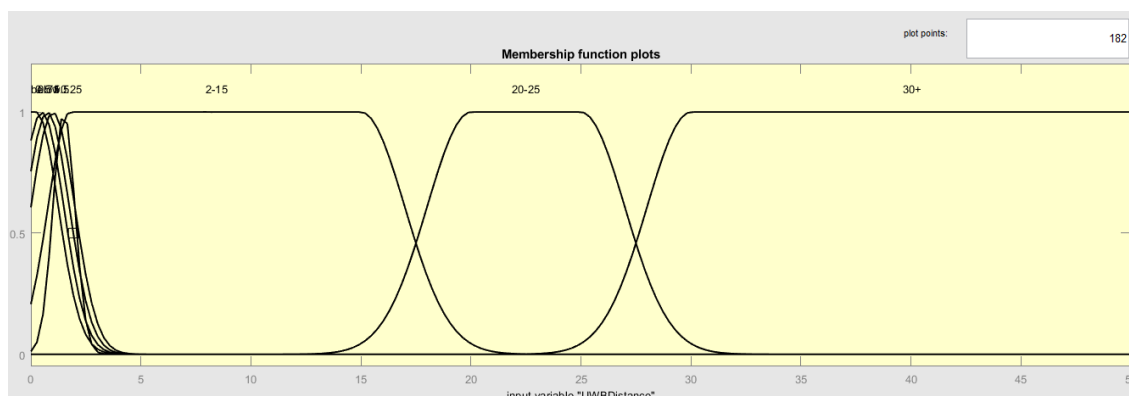
Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że dla małych odległości system UWB zwraca wartości niedoszacowane. W przypadku dokonywania pomiarów w środowisku zewnętrznym przy najmniejszych odległościach (do 2m) niedoszacowanie wynosiło do 77p.p. (punktów procentowych), jednak już dla kolejnej odległości można było zauważyć poprawę do 32p.p.. Natomiast w przypadku pomiarów w środowisku wewnętrznym niedoszacowanie odległości również występowało, jednak przy najmniejszej odległości wynosiło 59p.p. (a przy kolejnej już tylko 29p.p.). W obu przypadkach można zauważyć tendencję wzrostową tej korekty – odległość mierzona zrównała się z odległością referencyjną przy około 2-4 metrach dla środowiska zewnętrznego oraz przy 1-1,5 metra dla środowiska wewnątrz budynku. Można również zaobserwować nieznaczne przeszacowanie danych dla dalszych odległości (w zakresie do 2% wewnątrz i 3% na zewnątrz budynku). Na podstawie analizy pozyskanych informacji sporządzono funkcje przynależności w oparciu o analizę statystyczną odchylenia standardowego danych referencyjnych, powiązaną z odległością, której przykład został przedstawiony na wykresie (rysunek 13).



Rys. 13. Wartość różnicy odległości zmierzonej a odległości referencyjnej [cm]

W efekcie funkcje pokrywają się z charakterystyką danych – np. dla danych wewnątrz budynku zauważono dużą zmienność w początkowym zakresie odległości (otrzymywany błąd wyraźnie zmienia się na odległościach od 25cm do 5m), co zostało odzwierciedlone w postaci dużego zagęszczenia funkcji przynależności dla początkowych odległości. Dla wartości w zakresie powyżej 5m do 10m statystyka danych prezentowała odwrotną tendencję – dane były niedoszacowane. Od 20m do 25m zdecydowano się na kolejną funkcję przynależności, ponieważ w tym zakresie można zauważyć większy błąd systemu. Kolejna funkcja została utworzona dla danych powyżej 30m, ponieważ zakres ten wykazywał kolejną wspólną tendencję – błąd na stałym poziomie. Podobną analizę wykonano dla pozostałych zestawów danych. Funkcje zatem przyjęły wartości (23) a prezentuje się w sposób przedstawiony na rysunku 14.

$$UWB_{distance} = \left\{ \begin{array}{l} \text{do } 0,25, \text{ do } 1,5 \text{ do } 0,75, \text{ do } 1, \text{ do } 1,5, \\ 2 \text{ do } 15, 20 \text{ do } 25, \text{ powyżej } 30 \end{array} \right\} \quad (23)$$



Rys. 14. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych: dla zmiennej lingwistycznej „odległość pomiędzy węzłami systemu”

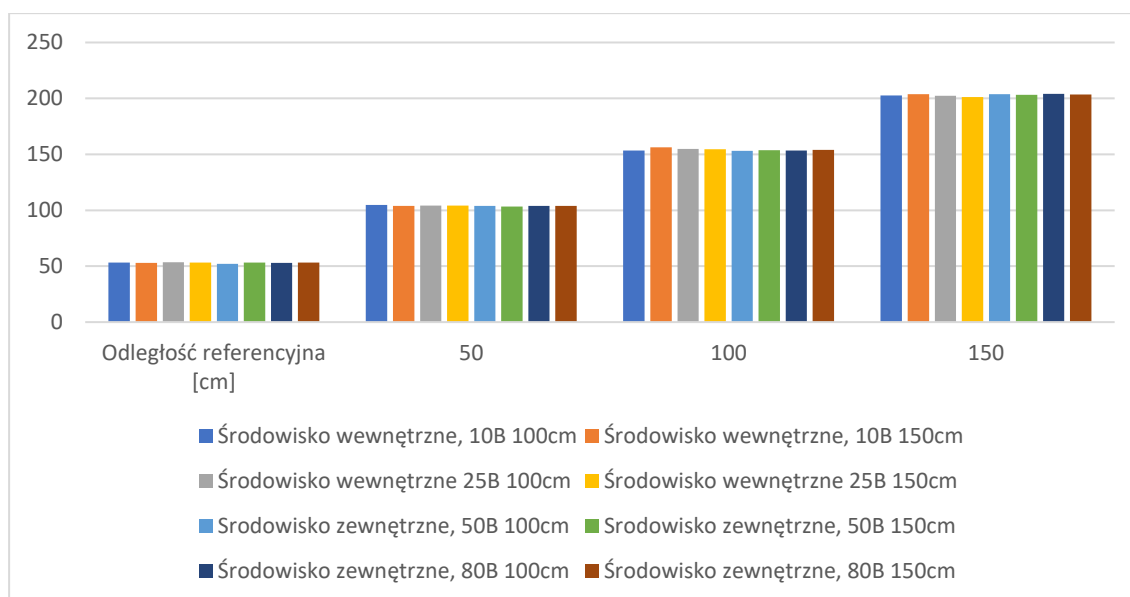
Zmienna lingwistyczna *wysokość montażu anteny i środowisko*

Kolejnym etapem była weryfikacja wpływu wysokości umieszczenia anteny na otrzymywaną odległość. W tym celu zebrano serie danych dla dwóch wskazanych wysokości umieszczenia anteny, przy jednoczesnej zmianie środowiska, liczby transmitowanych danych i odległości. Otrzymane rezultaty zostały przedstawione w tabeli 5.

Tab. 5. Uzyskane odległości przy różnej liczbie transmitowanych danych dla anteny umieszczonej na dwóch wysokościach.

Odległość referencyjna [cm]	Wysokość umieszczenia anteny [cm]							
	Środowisko wewnętrzne, 10B		Środowisko wewnętrzne 25B		Środowisko zewnętrzne, 50B		Środowisko zewnętrzne, 80B	
100	150	100	150	100	150	100	150	
50	53	53	54	53	52	53	53	
100	105	104	104	104	104	103	104	
150	153	156	155	154	153	154	154	
200	203	204	202	201	204	203	204	

Analizując tabelę należy zauważyć, że wysokość umieszczenia anteny nie wpływa na wyniki przeprowadzonych badań. Jest to również niezależne od warunków (wewnątrz/na zewnątrz budynku), ponieważ wszystkie z otrzymanych różnic mieszczą się w zakresie błędu wzorcowego urządzenia pomiarowego. Najlepiej można to zobrazować na rysunku prezentującym różnice w otrzymanych odległościach w postaci wykresu słupkowego (rysunek 15):



Rys. 15. Wykres pomiarów odległości dla różnych zmiennych podczas weryfikacji wpływu wysokości umieszczenia anteny na dokładność wymiarowania.

Na podstawie otrzymanych rezultatów można wyciągnąć wniosek, że istnienie dodatkowej zmiennej lingwistycznej „wysokość montażu anteny” nie wpłynie znacząco na poprawę dokładności otrzymywanych pomiarów, w związku z czym zdecydowano się zaniechać jej dalszej analizy.

Zmienna lingwistyczna *liczba transmitowanych danych i środowisko*

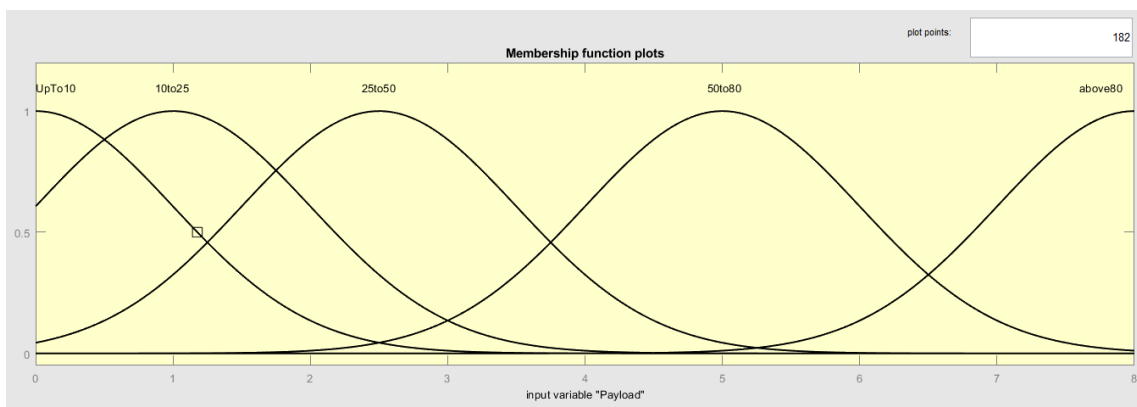
Kolejną zmienną, dla której została utworzona zmienna lingwistyczna, jest liczba transmitowanych danych. Poprawność tej propozycji wykazano poprzez zwiększenie liczby danych o wskazane w tabeli wartości, zaznaczając, że największa z nich odpowiada proponowanej w kolejnym rozdziale ramce danych służącej do przesyłania dodatkowych komunikatów pomiędzy elementami sieci UWB. Wpływ zmiany wielkości pakietu obserwowano dla zmiennej odległości referencyjnej oraz dla różnego środowiska. Uzyskane rezultaty zostały przedstawione w tabeli 6.

Tab. 6. Wpływ liczby transmitowanych danych na otrzymywane odległości.

		Odległość zmierzona [cm]							
		Środowisko wewnętrzne				Środowisko zewnętrzne			
Odległość referencyjna [cm]	Dodatkowe dane	10B	25B	50B	80B	10B	25B	50B	80B
	1000	1046,1	1040,3	1050,1	1034,5	1034,5	1038,4	1038,8	1039,8
	1500	1534,3	1548,8	1552,8	1554,9	1529,8	1536,5	1530,3	1535,4
	2000	2026,7	2022,5	2026,4	2016,6	2034,8	2043,5	2038,8	2040,4
	Procent wartości odległości referencyjnej								
1000		105%	104%	105%	103%	103%	104%	104%	104%
1500		102%	103%	104%	104%	102%	102%	102%	102%
2000		101%	101%	101%	101%	102%	102%	102%	102%

Z zebranych w tabeli danych wynika, że w przypadku pomiaru odległości przy jednoczesnej transmisji danych, otrzymywane odległości są przeszacowane. Dzieje się tak zarówno dla pomiarów wewnątrz, jak i na zewnątrz budynku. Chociaż w ujęciu procentowym dla odległości 10 i 15 metrów dane są bardziej przeszacowane w środowisku wewnętrznym (o około 10cm), to już w przypadku 20 metrów tendencja się odwraca. Najbardziej przeszacowane wartości (do 5 procent) występują w przypadku odległości 10 metrów wewnątrz budynku dla transmisji 10 i 50 bajtów danych. Dla środowiska zewnętrznego o 4% większą wartość odległości otrzymano dla niemal wszystkich serii danych z wyjątkiem transmisji 10B, chociaż tam przy uwzględnieniu większej rozdzielczości danych procentowych wartość wynosiła 103,45% wskazując wyraźną tendencję dla wszystkich pomiarów przy tej odległości. Przepuszczalnie przyczyną takiego stanu rzeczy jest dodatkowy czas jaki jest potrzebny na fizyczną transmisję dodatkowych danych (alokacja w rejestrze nadawczym modułu, a następnie transmisja oraz odbiór i zapis do rejestru odbiorczego urządzenia docelowego), a który nie został uwzględniony na etapie wyznaczania czasu przelotu komunikatu. Ze względu na różne parametry transmisji czynnik ten może mieć różny wpływ na dokładność otrzymywanej informacji o pozycji, powinien on być jednak powtarzalny i możliwy do wyeliminowania na etapie doboru czasów wewnątrz oprogramowania układowego, co jednak nie stanowiło bezpośredniego przedmiotu prac. W efekcie informacje te posłużyły do stworzenia zmiennej lingwistycznej bazującej na statystyce czasów transmisji związanej z tą zależnością oraz stworzenie odpowiadających im reguł.

Dla informacji o transmitowanych danych zdecydowano się na funkcje przynależności liczba transmitowanych danych w postaci funkcji Gaussa (27) rozmieszczonych w sposób przedstawiony na rysunku 16 a zdefiniowanych w tabeli 7.

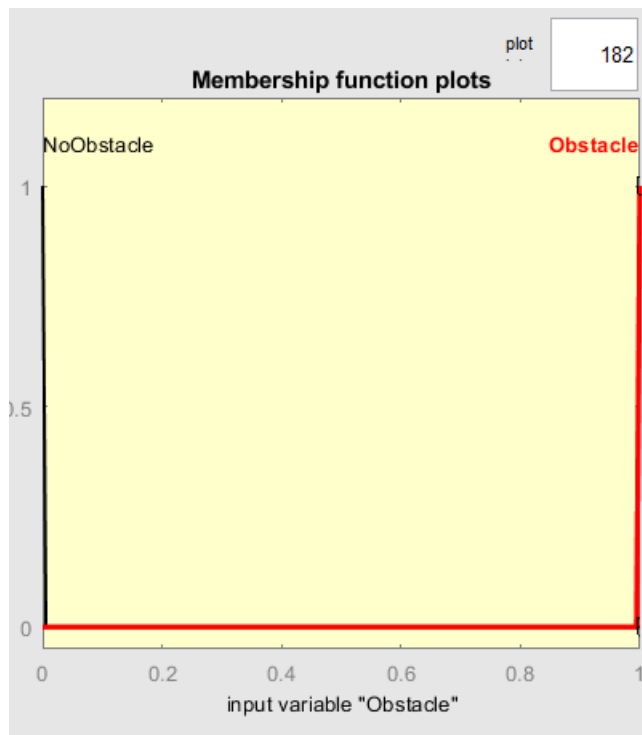


Rys. 16. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych: dla zmiennej lingwistycznej „liczba transmitowanych danych”

Tab. 7. Funkcje przynależności do zmiennej lingwistycznej „liczba transmitowanych danych”

Liczba danych	Funkcja	Odchylenie standardowe (szerokość)	Średnia (środek) wynikający ze wzoru (25)
do 10 B	bardzo mało	1	0
10B - 25B	mało	1	1
25B - 50B	średnio	1	2,5
50B - 80B	dużo	1	5
powyżej 80B	bardzo dużo	1	8

Jak już wspomniano w tabeli 8., dla informacji o środowisku i występujących przeszkodach przyjęto, że funkcje będą miały charakter zerojedynkowy, co w środowisku Matlab reprezentowane było przez wykorzystanie funkcji typu singleton. Przykład takiej funkcji dla występowania przeszkód przedstawiono na rysunku 17:



Rys. 17. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych: dla zmiennej lingwistycznej „środowisko” oraz „występowanie przeszkód”

Dla metody należy także przygotować funkcję wyjściową. W ramach proponowanego rozwiązania sporządzono zmienne lingwistyczne dla wielkości wyjściowej *korekta*, która określa współczynnik korekty, jaką należy zastosować dla wartości wejściowej odległości. Zmienna lingwistyczna *korekta* posiada następujące wartości – nazwa (szerokość, środek):

- maksymalna dodatnia (1, 1), duża dodatnia (1, 0.8), średnia dodatnia (1, 0.6), mała dodatnia (1, 0.4), minimalna dodatnia (1, 0.2),
- brak (1, 0),
- maksymalna ujemna (1, -1), duża ujemna (1, -0.8), średnia ujemna (1, -0.6), mała ujemna (1, -0.4), minimalna ujemna (1, -0.2).

Wartości należące do tego zbioru zostały znormalizowane w zakresie od 1 (dla zmiennych dodatnich) poprzez 0 (dla braku korekty) po -1 (dla zmiennych ujemnych). Reprezentowane są natomiast poprzez równomiernie rozdystrybuowane funkcje Gaussowskie (jak na rysunku 18). Kolejnym krokiem będzie przemnożenie otrzymanego z logiki rozmytej parametru, przez współczynnik związany z stopniem błędu dla proponowanego systemu co w rezultacie pozwoli otrzymać wartość skorygowanej odległości, co wyrażono wzorem (24)

$$d_n = d_o + (FL_o \cdot corr_{param}) \quad (24)$$

gdzie:

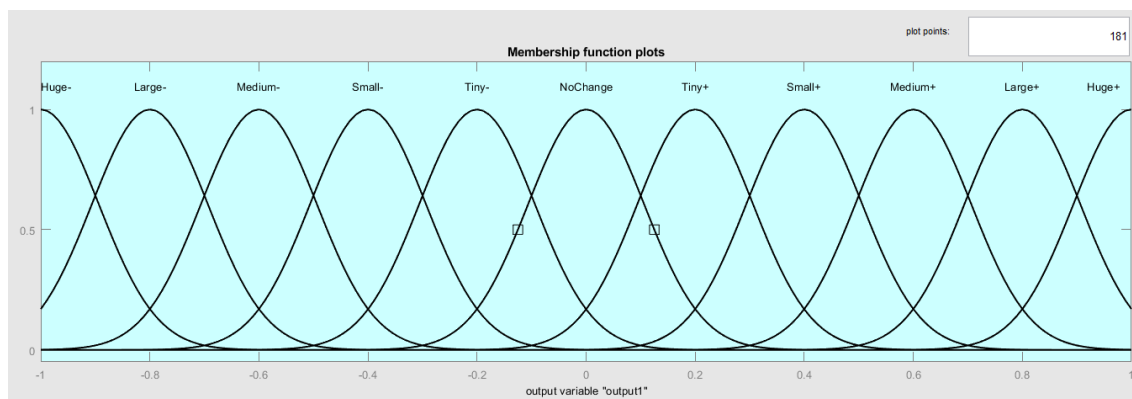
d_n – nowa wartość odległości, po korekcie,

d_o – stara wartość odległości, przed korektą,

FL_o – współczynnik korekty będący efektem działania logiki rozmytej,

$corr_{param}$ – parametr korekty ustalony dla danego systemu.

Zakresu odległości, jaką należy skorygować dla systemu bez transmisji danych mieści się do 100 cm, natomiast dla systemu, w którym transmitowane są dane wynosi do 200 cm. W związku z tym przyjęto, że parametr korekty będzie wynosił 100 dla systemu nietransmitującego danych oraz 200 w przypadku systemu, który dokonuje transmisji.



Rys. 18. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych: dla zmiennych lingwistycznych związanych z wyjściem metody.

Finalnym rezultatem przeprowadzonej analizy jest propozycja uwzględnienia następujących parametrów wejściowych przy tworzeniu modelu rozmytego dla modelu Mamdaniego:

- środowisko,
- występowanie przeszkód (warunki LOS/NLOS),
- transmitowane dane,
- odległość.

Informacje te powinny zostać dostarczone z systemu nadrzędnego w postaci wektora:

Odległość (cm) {1 - 5000}	LOS/NLOS (boolean) {0;1}	Transmitowane dane (liczba B) {0 – 115B}	Środowisko (boolean) {0;1}
------------------------------	-----------------------------	---	-------------------------------

Dla tak wyselekcjonowanych zmiennych lingwistycznych przyjęto wartości, które zostały przedstawione w tabeli 8

Tab. 8. Propozycje zmiennych lingwistycznych na potrzeby filtracji.

Nazwa funkcji	Środowisko	Przeszkody	Dane	Odległość
Zakres	[0 1]	[0 1]	[0 8]	[0 50]
Liczba funkcji przynależności	2	2	5	8
Sposób tworzenia funkcji przynależności	Binarny – 0 dla środowiska wewnętrznego, 1 dla zewnętrznego.	Binarny – 0 dla braku przeszkód, 1 dla występujących przeszkód	$f(P)$ opisana wzorem (25)	$f(D)$ Opisana wzorem (26)
Typ funkcji przynależności	Singletony	Singletony	Funkcja Gaussowska (27)	2 – 5 – funkcja Gaussowska, 1, 6 – 8 złożenie dwóch funkcji Gaussowskich

Przyjęte w tabeli oznaczenia:

$$P = \frac{p}{10} \quad (25)$$

$$D = \frac{d}{1000} \quad (26)$$

$$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (27)$$

Gdzie:

- p to liczba dodatkowych danych (w bajtach) transmitowanych przez system poza informacjami niezbędnymi do pozycjonowania (co szczegółowo opisano w rozdziale 5.3 „Etykietowanie obiektów infrastruktury - ramka danych”,
- D to odległość w metrach. Ze względu na to, że w proponowanym systemie odległość zwracana jest w mm dlatego d (wartość z systemu UWB) należy podzielić przez 1000,
- σ to wartość odchylenia standardowego (szerokość) wykorzystywanej funkcji Gaussa, natomiast c w tym wypadku to jej średnia (środek).

Kolejnym krokiem było przygotowanie bazy reguł opartej na przygotowanych zmiennych lingwistycznych. W procesie tworzenia modelu Mamdaniego wykorzystano zgromadzone dane z pomiarów stycznych, które stanowiły bazę wiedzy eksperckiej. Następnie na ich podstawie przyjęto progi R_k rozmieszczone w zakresie korekty (p_k) co 20cm (28), oraz założono, że korekta będzie realizowana przy spełnieniu warunku, że wartość otrzymana wynosi ± 10 cm wartość progu co można wyrazić wzorem (29).

$$R_k = \{-corr_{param}, \dots, -i * p_k, 0, i * p_k, \dots, corr_{param}\} \quad (28)$$

$$x \in R_k \leftrightarrow (R_k - \frac{p_k}{2}) \geq x \geq (R_k + \frac{p_k}{2}) \quad (29)$$

Gdzie:

x – bieżąca wartość odległości,

R_k – reguła korekty

$corr_{param}$ – maksymalna wartość korekty dla danego systemu

i – kolejny krok korekty

p_k – próg korekty (dla danego rozwiązania proponuje się wartość 20)

I tak na przykład, jeżeli dla danych zebranych w środowisku zewnętrznym dla odległości referencyjnej 1000 cm odległość zmierzona wynosiła 963 cm do bazy reguł wpisywana była reguła w postaci:

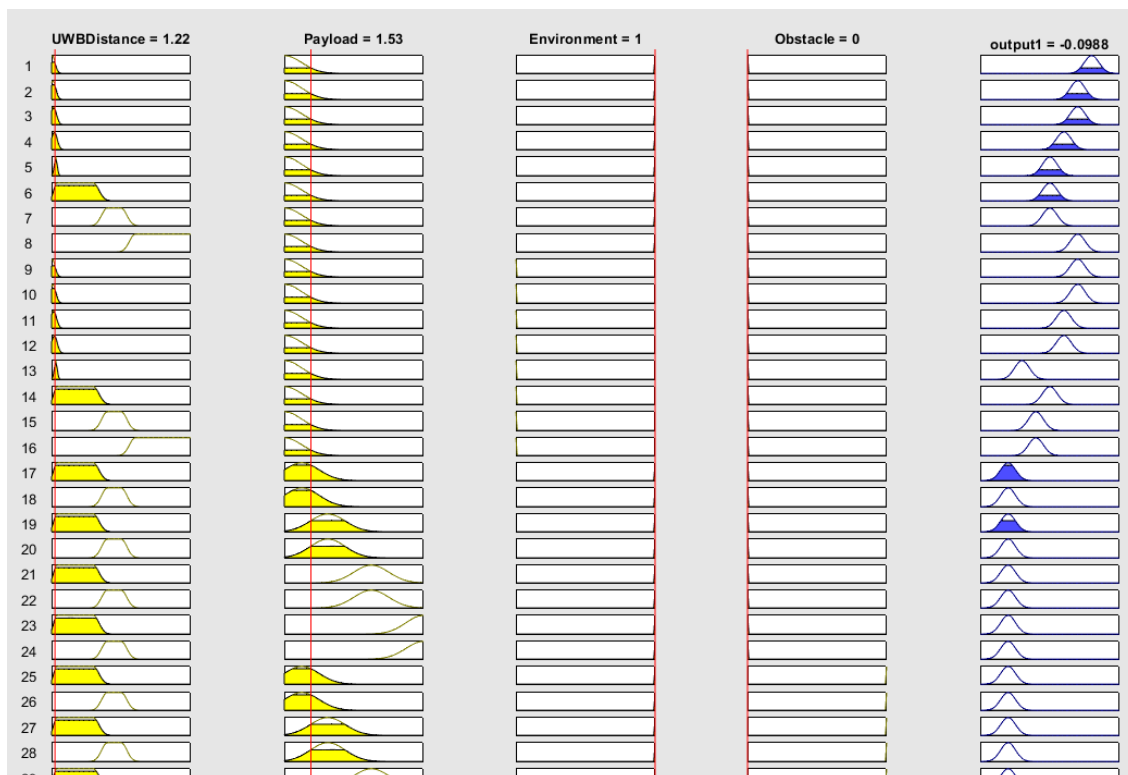
JEŻELI odległość jest „Around 1” i środowisko jest „Outdoor” TO wyjście jest „Small +”

System pozwala na istnienie reguł zarówno dla wybranych zmiennych (tak jak powyżej przy zauważalnym wpływie jedynie jednej z zmiennych lingwistycznych na dane

wyściowe w danym zakresie), jak i dla wszystkich (kiedy każda zmienna lingwistyczna ma zauważalny wpływ na zmianę danych wyjściowych), na przykład:

JEŻELI odległość jest „2-15” i Payload jest „25to50” i środowisko jest „Indoor” i przeszkody jest „No” TO wyjście jest „Huge-”

Analogicznie postępowano przy wszystkich zmiennych lingwistycznych z zastrzeżeniem, że nie tworzone funkcji wskazujących na brak zmian tj. wtedy, kiedy nie wpływało to na końcowy rezultat. Ich przykładowy fragment w postaci graficznej interpretacji przedstawiono na rysunku 19.

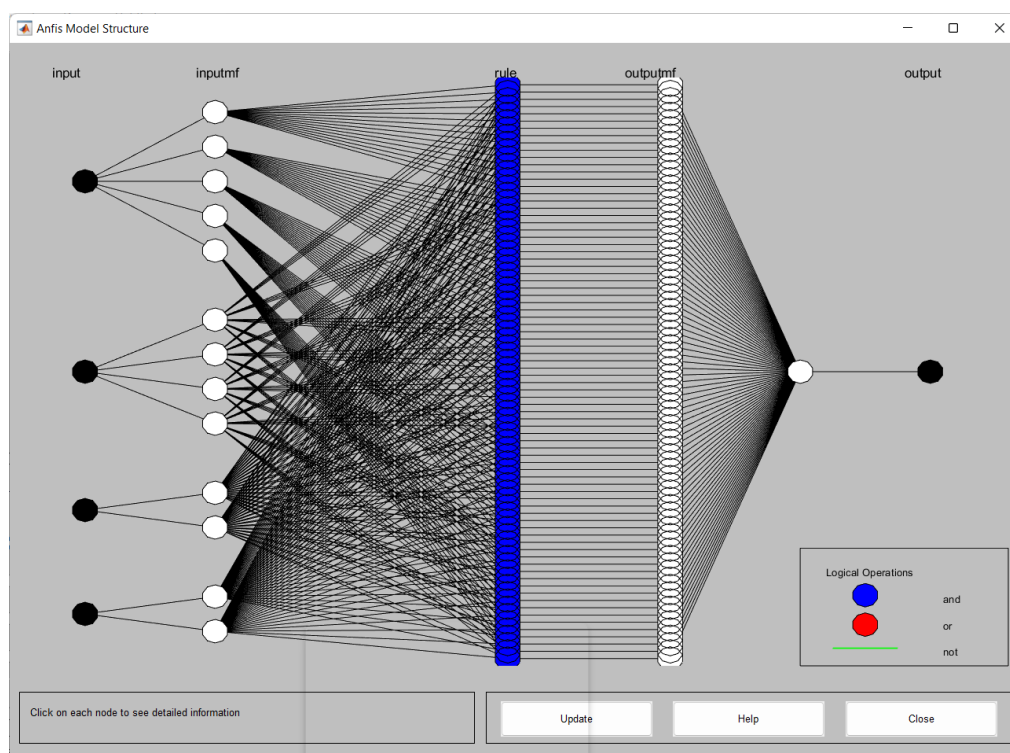


Rys. 19. Graficzna reprezentacja części zbudowanych reguł.

Po sporządzeniu bazy reguł należy przystąpić do agregacji konkluzji wszystkich reguł dla bazy pomiarów testowych. I tak w przypadku pomiarów odległości otrzymano parametr korekty odległości stanowiący współczynnik, który należy dodać do wartość odległości wejściowej, aby otrzymać odległość docelową. Tak przygotowana funkcja jest jedną z proponowanych na schemacie metod obróbki danych z uwzględnieniem środowiska i warunków pracy (widoczności lub jej braku) oraz wielkości transmitowanego pakietu danych dodatkowych.

3.4.2. Model Sugeno

Drugi z proponowanych modeli – Sugeno - został skonstruowany w oparciu o dostępny w środowisku Matlab mechanizm „neuro-fuzzy designer” [83]–[85]. Za jego pomocą została stworzona oraz przetestowana metoda, pozwalająca uwzględnić dokładnie te same zależności: środowisko działania systemu, występowanie przeszkód, liczba transmitowanych danych, odległość. Jednak zarówno liczba zmiennych lingwistycznych, jak i funkcja przynależności, zostały zoptymalizowane w procesie uczenia, który realizowany był z wykorzystaniem hybrydowej metody zaimplementowanej w środowisku Matlab. Metoda ta korzysta z propagacji wstecznej (backpropagation) parametrów związanych z wejściowymi funkcjami przynależności i estymacji metodą najmniejszych kwadratów dla parametrów związanych z wyjściowymi funkcjami przynależności. Finalna struktura sieci, cechująca się najlepszą korektą, została przedstawiona na rysunku 20.



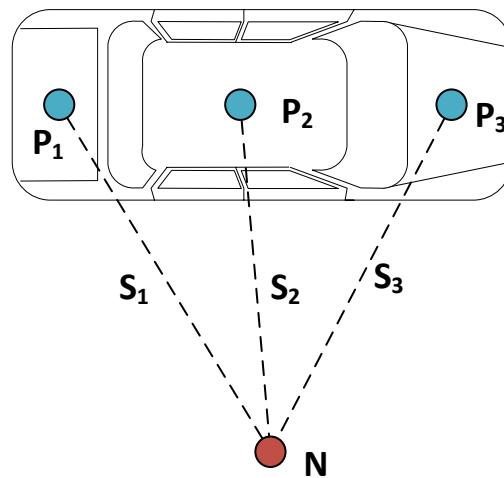
Rys. 20. Graficzna struktura sieci podczas uczenia modelu Sugeno

W procesie uczenia algorytm wskazał, że rozwiązaniem pozwalającym na największą korektę, będzie utworzenie pięciu wartości zmiennej lingwistycznej dla odległości, czterech dla liczby transmitowanych danych, dwóch dla środowiska i dwóch dla występowania przeszkód. W przypadku funkcji przynależności w zautomatyzowanym procesie zweryfikowano wszystkie dostępne w środowisku Matlab. Dla trzech dających najlepsze rezultaty na etapie uczenia przeprowadzono weryfikację dla pełnego zestawu danych co zostało omówione w rozdziale 4.4.2 „Weryfikacja modelu Sugeno” oraz 4.4.1 „Weryfikacja zmodyfikowanego modelu Sugeno”.

3.5. Algorytm trilateracji i określenie relacji kąt - odległość

Ostatnim etapem przygotowania danych na potrzeby ADAS jest konwersja pozyskanych odległości na pozycję względem pojazdu. W aspekcie etykietowania elementów infrastruktury na rzecz technologii ADAS możliwe są dwa podejścia – wskazanie pozycji (2D, 3D) lub wskazanie odległości i kąta od osi pojazdu, w której znajduje się etykietowany obiekt. Proces ten został przedstawiony na schemacie blokowym (rysunek 9) w bloku E. Z procesem tym bezpośrednio związane jest również scalenie danych o pozycji z danymi etykietującymi – te jednak ze względu na złożoność zagadnienia zostały omówione w osobnym rozdziale 5 „Struktura danych do identyfikacji obiektów”.

Podstawowym procesem dokonującym konwersji odległości pomiędzy znacznikiem a punktami referencyjnymi jest algorytm trilateracji. Pozwala on na wyznaczenie lokalizacji opartej na odległości od punktów referencyjnych na podstawie geometrii. Zasadę działania zobrazowano na podstawie rys. 21, [86]. Dane są trzy punkty referencyjne $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$ oraz trzy odległości S_1, S_2, S_3 do punktu N . Znalezienie współrzędnych punktu $N(x, y, z)$ jest równoznaczne z wyznaczeniem współrzędnych z równań kwadratowych przedstawionych na równaniu (30).



Rys. 21 Trilateracja – przykład działania przedstawiony dla punktu – znacznika N , oraz dla trzech punktów referencyjnych P_1, P_2 oraz P_3 .

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = S_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = S_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = S_3^2 \end{cases} \quad (30)$$

Równanie (30) może zostać przedstawione jako (31).

$$\begin{cases} (x^2 + y^2 + z^2) - 2x_1x - 2y_1y - 2z_1z = s_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ (x^2 + y^2 + z^2) - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = s_2^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ (x^2 + y^2 + z^2) - 2x_3x - 2y_3y - 2z_3z = s_3^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \end{cases} \quad (31)$$

Lub też w postaci macierzowej jako (32)

$$\begin{bmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ 1 & -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 + y^2 + z^2 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1^2 & -x_1^2 & -y_1^2 & -z_1^2 \\ -s_2^2 & -x_2^2 & -y_2^2 & -z_2^2 \\ -s_3^2 & -x_3^2 & -y_3^2 & -z_3^2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Zatem równanie (32) reprezentowane jest w znanej postaci (33).

$$A_0 \cdot x = b_0 \quad (33)$$

Z zastrzeżeniem (34)

$$E = \{(x_0, x_1, x_2, x_3)^T \in \mathbb{R}^4 / x_0 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2\} \quad (34)$$

Do rozważenia są więc dwa przypadki.

W pierwszym z nich P_1, P_2 oraz P_3 nie leżą na prostej. W tym przypadku rząd macierzy $A_0 = 3$ oraz $\dim(\text{Kern}_{A_0}) = 1$. Rozwiązaniem ogólnym (33) jest wtedy równanie (35).

$$x = x_p + t \cdot x_h \quad (35)$$

Gdzie t stanowi parametr rzeczywisty, x_p jest szczególnym rozwiązaniem równania (33) a x_h jest rozwiązaniem jednorodnego układu równań (36), to jest jego jądrem.

$$A_0 \cdot x = 0 \quad (36)$$

Wektory x_p oraz x_h mogą być wyznaczone z wykorzystaniem metody eliminacji Gaussa. Szczególnie rozwiązanie x_p może być wyznaczone również poprzez pseudo inwersję macierzy A_0 .

Dla wyznaczenia parametru t niech (37).

$$\begin{aligned} x_p &= (x_{p0}, x_{p1}, x_{p2}, x_{p3})^T \\ x_h &= (x_{h0}, x_{h1}, x_{h2}, x_{h3})^T \\ x &= (x_0, x_1, x_2, x_3)^T \end{aligned} \quad (37)$$

Po podstawieniu równania (37) do (35) otrzymujemy (38).

$$\begin{cases} x_0 = x_{p0} + t \cdot x_{h0} \\ x_1 = x_{p1} + t \cdot x_{h1} \\ x_2 = x_{p2} + t \cdot x_{h2} \\ x_3 = x_{p3} + t \cdot x_{h3} \end{cases} \quad (38)$$

Korzystając z zależności $x \in E$ otrzymujemy (39).

$$x_{p0} + t \cdot x_{h0} = (x_{p1} + t \cdot x_{h1})^2 + (x_{p2} + t \cdot x_{h2})^2 + (x_{p3} + t \cdot x_{h3})^2 \quad (39)$$

I dalej (40).

$$\begin{aligned} & t^2(x_{h1}^2 + x_{h2}^2 + x_{h3}^2) + \\ & t(2 \cdot x_{p1}x_{h1} + 2 \cdot x_{p2}x_{h2} + 2 \cdot x_{p3}x_{h3} - x_{h0}) + \\ & x_{p1}^2 + x_{p2}^2 + x_{p3}^2 - x_{p0} = 0 \end{aligned} \quad (40)$$

Jest to równanie kwadratowe postaci (41) którego rozwiązania wyrażają się w (42).

$$a_t^2 + b_t + c = 0 \quad (41)$$

$$t_{1/2} = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (42)$$

Rozwiązaniami równania (33) są zatem (43).

$$\begin{aligned} x_1 &= x_p + t_1 \cdot x_h \\ x_2 &= x_p + t_2 \cdot x_h \end{aligned} \quad (43)$$

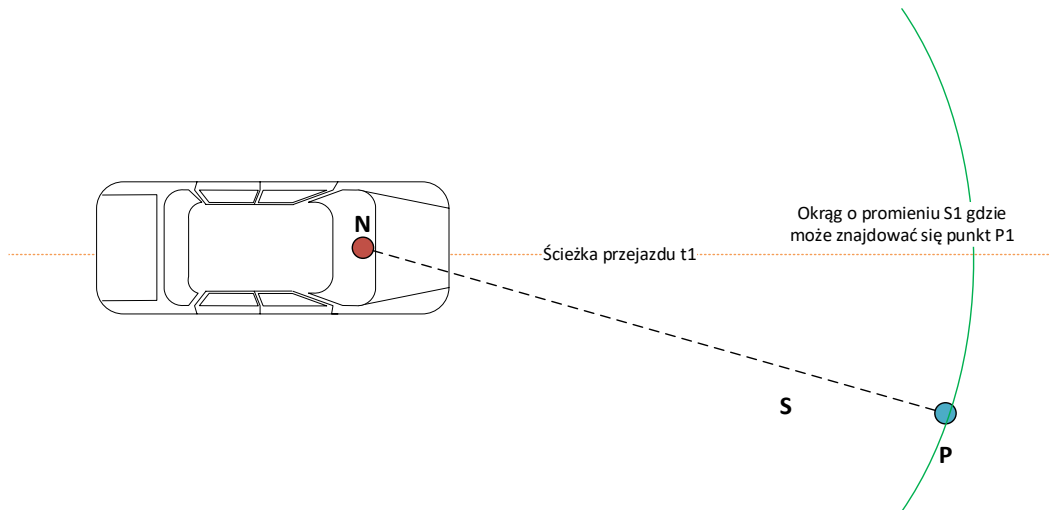
Przypadek drugi należy rozpatrzyć dla punktów P_1 , P_2 oraz P_3 leżących na jednej linii. W tym przypadku rząd macierzy $A_0 = 2$ oraz $\dim(\text{Kern}_{A_0}) = 2$. Rozwiązanie ogólne równania (33) przedstawia się wtedy w sposób (44), gdzie t i k to parametry rzeczywiste.

$$x = x_p + t \cdot x_{h1} + k \cdot x_{h2} \quad (44)$$

Dla tego równania x_p jest rozwiązaniem równania (33), oraz x_{h1} i x_{h2} są dwoma rozwiązaniami jednorodnego układu równań (36). Są to rozwiązania liniowo niezależne, stanowiące podstawę jądra A_0 . W przypadku trzech punktów referencyjnych wybór rozwiązania determinuje obszar, w którym oczekujemy rozwiązania. W przypadku dodania kolejnej informacji o odległości pochodzącej z czwartego (i kolejnych) punktu referencyjnego oba rozwiązania równania zaczną wskazywać na ten sam obszar, różniąc się jedynie niedokładnością wynikającą z niedoszacowania lub też przeszacowania danych o odległości. Problemy te mogą się nasilać ze względu na specyfikę zastosowania systemu pozycjonującego UWB lub wzajemnie niwelować – np. wzrost prędkości

pojazdu zwiększa niedokładności związane z rozszynchronizowaniem odległości od poszczególnych punktów, dane o infrastrukturze dodatkowo wydłużają czas wymiarowania, a niska prędkość przy wysokiej częstotliwości pozyskiwania danych w zasadzie uniemożliwia uzyskanie wektora prędkości.

W przypadku mniejszej liczby punktów referencyjnych możliwe jest określenie odległości i kąta pojazdu względem obiektu co można przedstawić jak na rysunku 22:

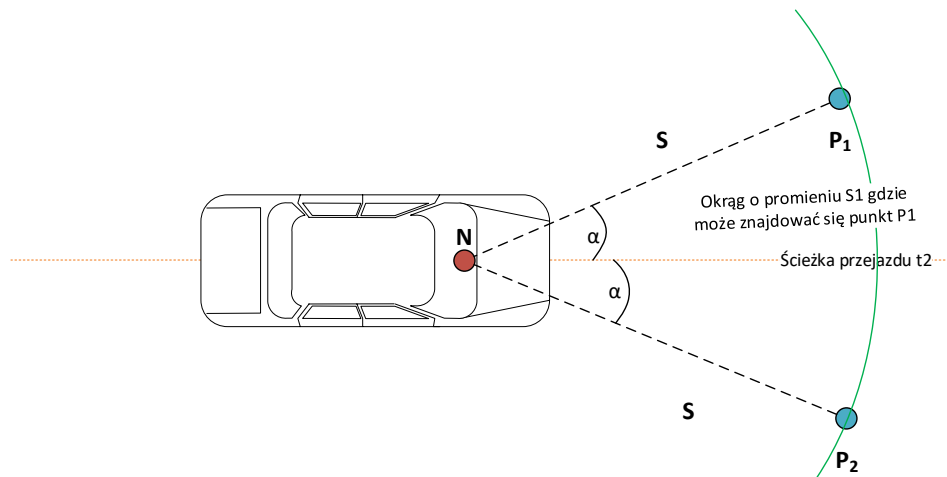


Rys. 22. Informacja pozyskana z systemu UWB w przypadku występowania tylko jednego punktu na pojeździe oraz jednego elementu infrastruktury drogowej.

W tym przypadku założeniem jest, że obiekt do którego zbliża się pojazd jest nieruchomy oraz że ścieżka pojazdu jest prostą. Wówczas w pierwszej chwili czasu otrzymujemy informację, że obiekt znajduje się w odległości S .

Z różnicy ΔS między prędkością pojazdu (pozyskaną z magistrali CAN) a prędkością jaką można wyznaczyć z systemu UWB (na podstawie znanych odstępów czasowych pomiędzy kolejnymi momentami pozyskiwania danych oraz różnicy w odległości pomiędzy kolejnymi odczytami) możliwe jest wskazanie proporcji (45), która pozwala na wyznaczenie wartości kąta pomiędzy dwoma takimi wektorami (patrz rysunek 23).

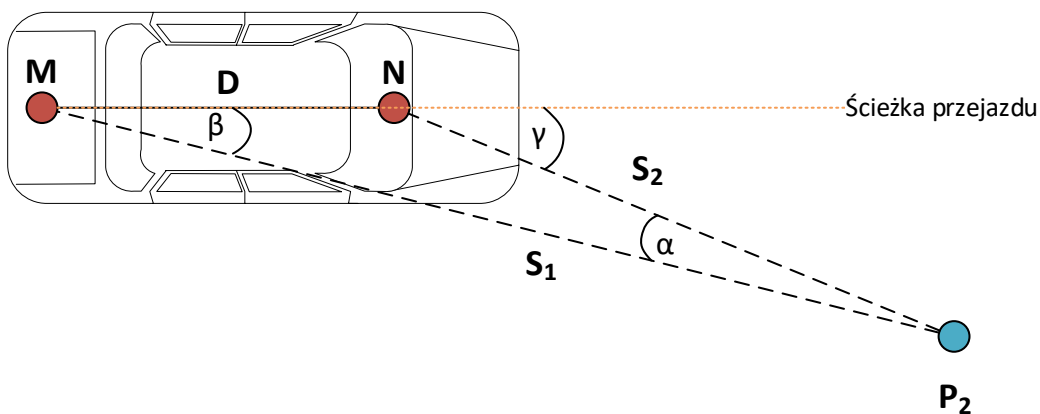
$$\begin{aligned}
 & \text{Jeżeli } V_{CAN} = V_{UWB} \text{ a } \Delta S < 0 \text{ wówczas } \alpha = 0^\circ \\
 & \text{Jeżeli } V_{CAN} = V_{UWB} \text{ a } \Delta S > 0 \text{ wówczas } \alpha = 180^\circ \\
 & \text{Jeżeli } V_{CAN} > 0 \text{ i } V_{UWB} = 0 \text{ wówczas } \alpha = 90^\circ
 \end{aligned}
 \tag{45}$$



Rys. 23. Odległość i kąt względem osi pojazdu jaki można uzyskać dla jednego punktu referencyjnego na pojeździe, na podstawie analizy prędkości.

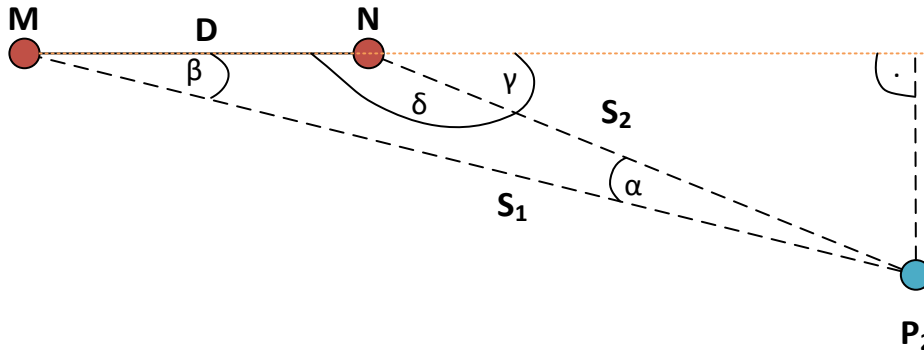
Mimo że odległość i wartość kąta pozwalają na określenie dokładnie dwóch rozwiązań, to na podstawie dodatkowych danych, system nadrzędny będzie mógł dokonać estymacji kierunku poruszania się (np. na podstawie informacji o kierunku jazdy oraz typie obiektu, który może znajdować się w bazie danych mapy 5D zawierającej informacje o infrastrukturze, która zostanie napotkana na trasie [87]–[89]).

Określenie kąta i odległości od punktu znacznika jest możliwe dla jednego tylko odczytu informacji o odległości, kiedy na samochodzie mamy dwa punkty referencyjne, jak przedstawiono na rysunku 24.



Rys. 24. Przypadek dwóch anten systemu UWB umieszczonych na pojeździe

W tym przypadku można przedstawić problem w postaci modelu trygonometrycznego, który został przedstawiony na rysunku 25 a opisać wzorami (46):



Rys. 25. Model trygonometryczny sytuacji, w której na pojeździe znajdują się dwa punkty (M oraz N), od których możliwe jest uzyskanie dwóch odległości (S_1 i S_2) od punktu (P_2), reprezentującego znacznik umieszczony na elemencie infrastruktury.

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \delta = 180^\circ \\ \gamma + \delta = 180^\circ \end{cases} \quad (46)$$

W omawianej sytuacji będzie można zastosować twierdzenie cosinusów (47), które mówi, że w dowolnym trójkącie kwadrat długości jednego boku jest równy sumie kwadratów długości dwóch pozostałych boków, zmniejszonej o podwojony iloczyn długości tych boków i cosinusa kąta zawartego między nimi.

$$c = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\alpha) \quad (47)$$

gdzie a , b , c oznaczają długości boków trójkąta oraz α to kąt pomiędzy bokami a i b .

W tym celu niezbędne jest przekształcenie wzoru (46) przez co otrzymujemy układ równań (48),

$$\begin{cases} \delta = 180^\circ - \alpha - \beta \\ \gamma = 180^\circ - \delta \end{cases} \quad (48)$$

co w rezultacie da (49).

$$\gamma = \alpha + \beta \quad (49)$$

W zestawieniu z twierdzeniem równania przyjmą formę (50):

$$\begin{aligned} S_2^2 &= D^2 + S_1^2 - 2 * D * S_1 * \cos\beta \\ D^2 &= S_1^2 + S_2^2 - 2 * S_1 * S_2 * \cos\alpha \end{aligned} \quad (50)$$

Równania (50) po przekształceniu można sprowadzić do wspólnego układu (51):

$$\begin{cases} \gamma = \alpha + \beta \\ \alpha = \cos^{-1}\left(\frac{S_1^2 + S_2^2 - D^2}{2 * S_1 * S_2}\right) \\ \beta = \cos^{-1}\left(\frac{D^2 + S_1^2 - S_2^2}{2 * D * S_1}\right) \end{cases} \quad (51)$$

co pozwala na wyznaczenie wartości kąta γ będącego kątem pomiędzy osią wzdłużną pojazdu a linią prostą wyznaczoną przez odległość do obiektu. Pozwala to na określenie orientacji etykietowanego obiektu względem pojazdu, kiedy niemożliwe jest wyznaczenie jego pozycji w 2D/3D.

4. Implementacja i analiza systemu lokalizacji i identyfikacji

W celu weryfikacji proponowanego rozwiązania przygotowano zostały scenariusze testowe odpowiadające poszczególnym fazom zaproponowanego przetwarzania danych na rzecz identyfikacji i pozycjonowania obiektu z wykorzystaniem technologii UWB. Omawiany proces akwizycji danych został przedstawiony na przykładzie platformy Decawave DWM1000 (na Rys. 26). Projekt ramki danych i weryfikacja prędkości transmisji odbywały się na systemie DWM1001. Oba systemy (DWM1000 oraz DWM1001) bazują na tym samym radioaparacie nadawczo-odbiorczym DW1000. Badania związane z dodatkowymi parametrami systemu były natomiast prowadzone na najnowszych, w czasie powstawania pracy, układach DWM3000EVB (na Rys. 27) bazujących na radioaparacie DW3010 [90]. Wszystkie te moduły są produktami firmy DecaWave (obecnie Qorvo), natomiast zarządzane są przez zestawy ewaluacyjne Discovery oraz Nucleo oparte na procesorach STM32.



Rys. 26. System bazujący na modułach DWM1000 – po lewej znacznik (tag) służący do akwizycji danych, po prawej punkt referencyjny (anchor) służący jako stacja o stałej zadeklarowanej pozycji.



Rys. 27 System bazujący na module DWM3000EVB – moduł wraz z zestawem ewaluacyjnym.

Dla pomiarów związanych z odległościami jako referencję wykorzystywano dalmierz laserowy UNI-T LM80 o dokładności wyrażonej wzorem (52), gdzie u_M to dokładność miernika a D to mierzona odległość.

$$u_M = \pm (2 \text{ mm} + 5 \times 10^{-5} D) \quad (52)$$

W trakcie prowadzenia badań największa rejestrowana odległość wynosiła 30 m. Założono również, że na pomiary miał wpływ czynnik ludzki (rozmieszczenie znaczników, określenie referencji względem modułów, pomiar) który oszacowano na $\pm 3 \text{ cm}$, dlatego też do określenia finalnej niepewności posłużono się wzorem (53).

$$u_B = \pm \frac{u_M + 30}{\sqrt{3}} \text{ mm} \quad (53)$$

Po podstawieniu wartości pozwala on na określenie przedziałów standardowej niepewności pomiarowej jako (54).

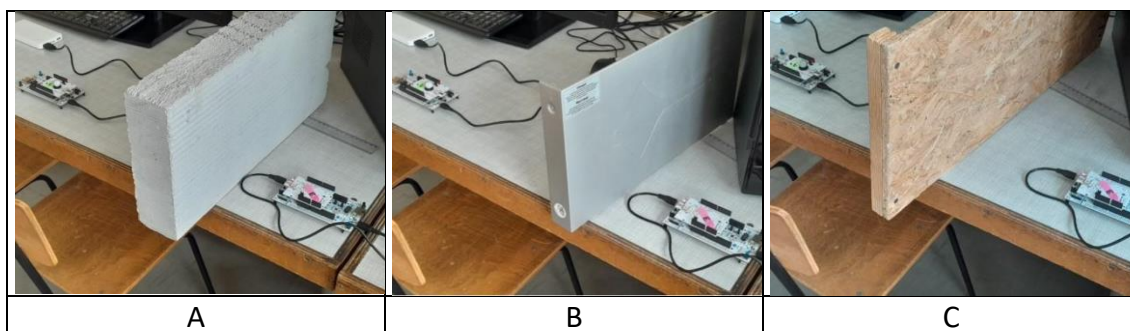
$$u_B(x) = \{x_0 - 19,34 \text{ mm}, x_0 + 19,34 \text{ mm}\} \quad (54)$$

Z czego wynika, że wszystkie wartości mieszczące się w tym przedziale są rząd mniejsze niż dokładność systemu UWB (wyrażona w postaci odchylenia standardowego), więc urządzenie tej klasy może zostać zastosowane jako system referencyjny dla pomiarów z wykorzystaniem UWB.

4.1. Analiza wartości parametru RSSI w różnych ośrodkach

W ramach proponowanego algorytmu system rozmyty pozyskuje informacje o środowisku oraz występowaniu przeszkód z ADAS. Jednak gdyby taka informacja była niedostępna, istnieje możliwość oszacowania tych informacji na podstawie zmian wartości parametru RSSI.

W ramach eksperymentalnej walidacji zebrano dane z wykorzystaniem systemu bazującego na modułach DWM3000 rozmieszczonych w różnych zakresach odległości, przy występowaniu oraz braku występowania przeszkód. Do przeszkód zaliczało się kartonowe pudełko o grubości ok. 3 mm, tafla szkła okiennego o grubości 4 mm, drewniany (sklejka) bloczek o grubości 18 mm, betonowy bloczek (gazobeton) o grubości 50 mm oraz blaszana obudowa o grubości ok. 2 mm. Przykład badań dla różnych przedmiotów przedstawiono na rysunku 28.



Rys. 28. Badania nad wpływem różnych przeszkód na wartość parametru RSSI. A – bloczek betonowy, B – blaszana obudowa, C - sklejka

Dla każdej z tak przygotowanych serii dokonano akwizycji 10000 odczytów informacji o odległości oraz wartości parametru RSSI. Zebrane wartości poddano uśrednieniu, a rezultaty dla odległości przedstawiono w tabeli 9.

Tab. 9. Wartości odległości [m] podczas pomiarów z występowaniem przeszkód w postaci kartonu, szkła, drewna, betonu i metalu.

		<i>Środowisko</i>					
		<i>referencja</i>	<i>karton</i>	<i>szkło</i>	<i>drewno</i>	<i>beton</i>	<i>metal</i>
<i>Odległość</i>	<i>1 m</i>	0,92	0,93	0,94	0,93	1,06	1,44
	<i>3 m</i>	2,98	2,98	3,00	2,99	3,08	2,97
	<i>5 m</i>	5,02	4,98	4,95	4,99	5,20	5,06
	<i>10 m</i>	9,99	10,02	10,04	10,03	10,12	10,20
	<i>15 m</i>	15,24	15,28	15,18	15,23	15,27	15,29
	<i>20 m</i>	19,85	19,83	19,92	19,88	19,99	20,12

Z przeprowadzonych badań przeprowadzonych wraz z występowaniem przeszkód można zauważyć wpływ obiektów znajdujących się na linii propagacji sygnału na pomiar odległości, jednak w zależności od ośrodka i odległości różnice są inne, co może sugerować, że w niektórych przypadkach sygnał propaguje się przez ośrodek, na który napotkał, natomiast w innych podejrzewa się akwizycję sygnału odbitego. I tak dla kartonu, szkła i drewna można zaobserwować niewielkie zmiany rzędu kilku centymetrów, szczególnie dla niskich odległości. Inaczej ma się sprawa w przypadku betonu, a już wyraźnie widać to dla metalu (zwłaszcza dla najmniejszej odległości), gdzie przypuszczalny brak możliwości propagacji wymaga transmisji z wykorzystaniem odbicia, co powoduje powstanie różnicy na poziomie niemal 50 cm, co stanowi 50% odległości między danymi referencyjnymi a transmisją z tą przeszkodą. W tych warunkach szkło (np. szyba samochodu) powoduje różnice na poziomie 2 cm i nawet zwiększenie odległości do 20 m, mimo że prowadzi do zwiększenia bezwzględnego błędu do 7 cm, to błąd względny jest mniejszy i wynosi poniżej 1%.

W przypadku wartości parametru RSSI zebranego podczas tej samej akwizycji danych wyniki zostały przedstawione w tabeli 10.

Tab. 10. Wartość RSSI [dBm] podczas pomiarów z występowaniem przeszkód w postaci kartonu, szkła, drewna, betonu i metalu.

		Środowisko					
		referancja	karton	szkło	drewno	beton	metal
Odległość	1m	-57,8	-57,9	-59,3	-58,3	-62,8	-67,8
	3m	-64,1	-64,7	-66,2	-64,9	-65,9	-67,0
	5m	-68,8	-70,0	-77,8	-70,0	-78,2	-79,0
	10m	-76,0	-73,4	-77,8	-74,5	-81,0	-79,5
	15m	-76,0	-74,0	-80,5	-74,0	-79,0	-80,4
	20m	-81,9	-82,9	-82,6	-82,8	-83,4	-84,0

W przedstawionej tabeli wartości parametru RSSI zostały oznaczone kolorami przy założeniu następujących zakresów jakości sygnału :

- RSSI < -60dBm jasny zielony
- -60dBm ≤ RSSI < -70dBm ciemny zielony
- -70dBm ≤ RSSI < -80dBm jasny pomarańczowy
- -80dBm ≤ RSSI ciemny pomarańczowy

Dla wartości RSSI można zauważyć podobne tendencje jak w przypadku odległości. Jednak w przypadku RSSI można zauważyć, że w przypadku większych odległości szkło wykazuje się większym tłumieniem sygnału niż karton, drewno a nawet beton. Niezmiennie jednak największe tłumienie można zaobserwować dla metalu, gdzie wartości dla 1 i 3 oraz 5 i 10 m są do siebie bardzo zbliżone. Karton i drewno natomiast wykazują bardzo podobne właściwości w tym zakresie. Może to wskazywać, że odebrany sygnał pochodzi z odbicia i jest bezpośrednio związany z wielkością przeszkody, która była stosunkowo niewielka.

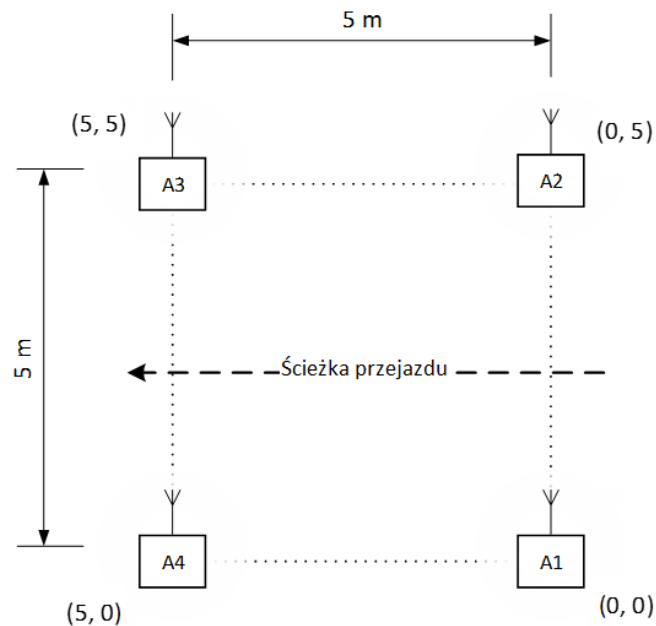
Na podstawie powyższych obserwacji proponuje się modyfikację współczynnika korekty odległości zaproponowanego w rozdziale 3.3.1 „Współczynnik korekcji filtru”, która może mieć zastosowanie w warunkach, w których system nie jest w stanie na bieżąco aktualizować wartości odchylenia standardowego i istniałoby ryzyko potraktowania prawidłowych odległości jako wartości odstających. Proponowana zmiana bazuje na wartości parametru RSSI z systemu UWB i została przedstawiona w tabeli 11.

Tab. 11. Proponowana modyfikacja współczynnika korekty odległości.

Wartość RSSI	Modyfikacja współczynnika korekty odległości (ρ)
$RSSI < -60dBm$	$\rho * 1,0$
$-60dBm \leq RSSI < -70dBm$	$\rho * 1,1$
$-70dBm \leq RSSI < -80dBm$	$\rho * 1,2$
$-80dBm \leq RSSI$	$\rho * 1,5$

4.2. Wykorzystanie filtrów z ruchomym oknem dla obiektu w ruchu

Weryfikacja mechanizmu korekty opisanego w rozdziale 3.2 została przeprowadzona poprzez dokonanie akwizycji danych z wykorzystaniem systemu bazującego na modułach DWM1000, w scenariuszu, który uwzględniał przejazd pojazdem wyposażonym w tempomat, z zadaną prędkością po linii prostej odzwierciedlającej referencyjną trajektorię pojazdu, zgodnie z rysunkiem 29. Znaczniki systemu UWB zostały rozmieszczone na statywach na wysokości 1,5m, natomiast kotwica znajdowała się w pojeździe w schowku po stronie pasażera. Miało to na celu weryfikację różnych zaproponowanych filtrów w celu określenia ich wpływu na dane oraz doboru najefektywniejszego z nich.



Rys. 29. Scenariusz testowy dla akwizycji danych w ruchu.

Prędkość z jaką poruszał się pojazd miała odzwierciedlać pięć scenariuszy miejskich – od 10 do 50 km/h. W ramach prowadzonej analizy skupiono się na obszarze wewnątrz kwadratu pomiarowego (ścieżka długości 5m), dla której liczba akwizycji była zmienna, zależna od prędkości poruszania się obiektu. Na podstawie częstotliwości próbkowania systemu i założonej trajektorii przejazdu, dla tak zebranych serii czasowych wyznaczone zostały punkty referencyjne, względem których sprawdzany był błąd odległości poddanych wcześniej trilateracji (wyznaczenia ścieżki przejazdu na podstawie

etykietowanych obiektów). Dla serii tych wyznaczono wartość parametru odchylenia standardowego, który dla danych surowych został zebrany w tabeli 12.

Tab. 12. Wartość odchylenia standardowego względem pozycji referencyjnej przy różnych prędkościach

Odchylenie standardowe [cm]	Prędkość [km/h]				
	10	20	30	40	50
	26,3	19,4	18,4	17,0	13,3

Kolejno przystąpiono do filtracji z wykorzystaniem proponowanych metod (filtr medianowy, średnia krocząca, filtr Savitzky'ego-Golay'a), a następnie zweryfikowano je metrykami (błąd średniokwadratowy, wartość maksymalną, błąd standardowy, odchylenie standardowe czy RMSE). Przykładowo dla filtracji filtrem medianowym wartości odchylenia standardowego zebrano w tabeli 13.

Tab. 13. Wartość odchylenia standardowego (w cm) po filtracji filtrem medianowym.

Okno filtru	Prędkość pojazdu [km/h]				
	10	20	30	40	50
1	29,2	22,2	20,4	19,3	16,4
3	29,0	21,8	20,0	18,7	14,8
5	28,8	21,6	19,4	18,3	13,5
7	28,6	21,3	18,8	17,9	13,1
9	28,3	21,0	18,5	17,4	13,0
11	28,1	20,7	18,1	17,2	12,9
13	27,9	20,5	17,8	17,0	12,9
15	27,9	20,4	17,6	16,8	12,7

Na podstawie przedstawionej tabeli można zauważyć oczekiwaną poprawę dokładności wraz z zwiększaniem okna filtru, ponieważ w przypadku filtru o najdłuższym oknie dla prędkości 10 km/h otrzymuje się zmniejszenie wartości odchylenia o nieco ponad 1 cm, jednak w przypadku prędkości większej – 50 km/h – redukcja ta wynosi już ponad 3 cm. Warto również zauważyć, że wraz ze zwiększaniem prędkości, poprawie ulega dokładność otrzymywanej informacji o pozycji, jednak wzrasta niepewność pomiarowa dla danych agregowanych online, co zostało szczegółowo opisane w rozdziale 5.5 „Wpływ rodzaju transmisji, prędkości i liczby węzłów na opóźnienie”. Wynika to ze wzrostu prędkości i opóźnienia podczas pozyskiwania każdej z odległości.

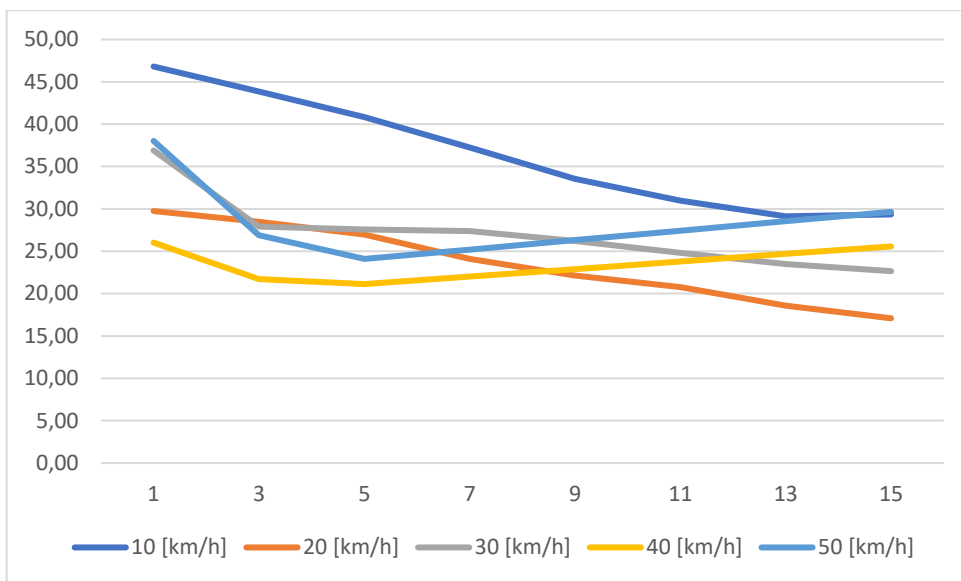
Kolejnym etapem było zastosowanie metody filtracji z wykorzystaniem średniej kroczącej. Rezultaty badań w postaci wartości odchylenia standardowego przedstawiono w tabeli 14. Rezultaty poszerzone zostały także o wartość powiększoną o przesunięcie wynikające z prędkości poruszania się obiektu i rozmiar okna filtru ($\sigma + O$).

Tab. 14. Wartość odchylenia standardowego (w cm) po filtracji średnią kroczącą.

Okno filtru	Prędkość pojazdu [km/h]									
	10		20		30		40		50	
	σ	$\sigma+0$	σ	$\sigma+0$	σ	$\sigma+0$	σ	$\sigma+0$	σ	$\sigma+0$
1	26,3	26,3	19,4	19,5	18,4	18,5	17	17,2	13,3	13,5
3	26,0	26,1	18,8	19,1	17,2	17,6	15,2	15,7	11,4	12,0
5	25,6	25,8	18,1	18,5	16	16,6	14,2	15,0	9,7	10,7
7	25,3	25,6	17,4	18,0	14,9	15,8	13,2	14,4	8,4	9,9
9	24,9	25,3	16,6	17,4	13,8	14,9	12,3	13,8	7,9	9,8
11	24,6	25,1	15,9	16,8	12,9	14,3	11,4	13,2	7,8	10,1
13	24,4	24,9	15,3	16,4	12,1	13,7	10,6	12,8	7,6	10,3
15	24,1	24,7	14,8	16,1	11,5	13,4	9,9	12,4	7,2	10,3

Otrzymane rezultaty wskazują na zauważalną różnicę w stosunku do filtracji danych o różnej prędkości. Po filtracji dla najniższej prędkości uzyskano zmianę wartości σ , względem odległości referencyjnej z 26,3 do 24,1 cm. Dla 50 km/h osiągnięto wyższy stopień poprawy, zmniejszając wartość σ do 13,3 cm, a nawet do 7,2 cm. Jednak jeżeli uwzględnimy offset, wynikający z opóźnienia jakie wprowadza proponowana metoda filtracji przy zadanej prędkości poruszania się pojazdu, okazuje się, że maksymalny uzysk z filtracji przy prędkości 50 km/h można osiągnąć przy oknie filtru równym 9, ponieważ dalsze zwiększanie okna co prawda redukuje σ , jednak wprowadzone opóźnienie jedynie pogarsza dane. Dla niższych prędkości również można zauważyć wpływ tego zjawiska, np. dla 10 km/h wartość σ maleje w całym sprawdzanym przedziale okna filtru (do 24,1), jednak opóźnienie powoduje, że rzeczywista wartość i tak nie spada poniżej 24,7 cm.

Graficzne przedstawienie wartości maksymalnych (na rysunku 30) uwydatnia, że możliwa do uzyskania różnica w stosunku do zwiększanego okna filtru jest nieliniowa, a jej największą dynamikę zmian wartości możemy zaobserwować dla filtru o oknie od trzech do siedmiu próbek, co jest najlepiej widoczne przy wyższych prędkościach poruszania się obiektu. Niesie to za sobą istotny wniosek w kontekście omówionego wcześniej opóźnienia, które jest konsekwencją stosowania filtracji z ruchomym oknem. W zależności od przypadku użycia i prędkości stosowanie filtrów o dłuższych oknach może skutkować mniejszą poprawą, aniżeli przesunięcie wynikające z opóźnienia, które będzie efektem jego zastosowania.



Rys. 30. Maksymalny błąd pozycji z uwzględnieniem filtracji średnią kroczącą.

Różnica w wartościach bez przesunięcia i z przesunięciem wynikającym z okna filtru wskazuje, że należy zawsze uwzględnić, czy ewentualne korzyści wynikające z filtracji przewyższają błąd przesunięcia, jaki wynika z okna filtru. Dla analizowanej metody widać, że wraz ze wzrostem prędkości wielkość okna filtru powoduje zauważalne pogorszenie dokładności. W przypadku 40 km/h i 50 km/h dzieje się tak już przy oknie o wartości 7 i wzwyż (stosowanie okna o większej wartości powoduje pogorszenie otrzymywanych rezultatów), natomiast dla 10 km/h możliwe jest zastosowanie okna o wartości do 13, ze względu na mniejsze przemieszczenie danych przy tej prędkości.

Inną z zweryfikowanych metod filtracji był filtr Savitzky'ego-Golay'a, a jej rezultaty przedstawiono w tabeli 15.

Tab. 15. Wartość odchylenia standardowego po filtracji filtrem Savitzky'ego-Golay'a dla różnego okna filtru przy różnych prędkościach – wyrażona w cm

Okno filtru	Prędkość pojazdu [km/h]				
	10	20	30	40	50
1	26,34	19,40	18,40	16,95	13,31
3	26,13	19,08	17,80	16,19	12,57
5	25,91	18,71	17,28	15,71	11,41
7	25,71	18,34	16,80	15,21	10,28
9	25,51	17,99	16,31	14,75	9,92
11	25,34	17,68	15,89	14,39	9,78
13	25,20	17,44	15,58	14,08	9,56
15	25,07	17,26	15,30	13,85	9,30

W przypadku tego filtra omawiana dynamika zmian wartości dla małych wartości okna filtru staje się jeszcze bardziej widoczna. Dla prędkości 50 km/h redukcja wartości odchylenia standardowego o około 1 cm jest zauważalna dla każdej wartości przy filtrze o oknie kolejno 3, 5 i 7, natomiast wszystkie dalsze wartości dla filtru o oknie 9, 11, 13 i 15 różnią się już o mniej niż 1 cm. Całkowita poprawa jest również zauważalnie mniejsza niż dla średniej kroczącej prezentowanej wcześniej. Przykładowo przy filtracji z wykorzystaniem średniej kroczącej o oknie 5 otrzymujemy podobną wartość błędu średniokwadratowego odległości jak przy filtracji Savitzky-Golay'em o oknie 11.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w przypadku stosowania filtrów prostych najlepsze rezultaty otrzymuje się dla filtru średniej kroczącej, gdzie przy zastosowaniu filtracji z oknem 15 można było zminimalizować błąd średniokwadratowy o niespełna 50% dla wyższych prędkości przejazdu (np. z 13 do 7 cm przy 50km/h). Kolejnym pod względem redukcji wartości był filtr Savitzky'ego-Golay'a, najgorzej natomiast z prezentowanych filtrów sprawdził się filtr medianowy, dla którego poprawa względem odległości referencyjnej wyniosła od 3 do 23 procent w zależności od prędkości poruszania się obiektu. Sumaryczne zestawienie błędu standardowego dla wszystkich trzech zastosowanych sposobów filtracji przy największym oknie (15) przedstawiono w tabeli 16.

Tab. 16. Zestawienie odchylenia standardowego dla okna 15 wyrażony w cm

Filtr	Prędkość pojazdu [km/h]				
	10	20	30	40	50
<i>Dane surowe</i>	29,2	22,2	20,4	19,3	16,4
<i>Medianowy [15]</i>	27,9	20,4	17,6	16,8	12,7
<i>Średnia krocząca [15]</i>	26,2	17,4	13,4	11,8	9,0
<i>Sgolay [15]</i>	27,6	20,4	17,3	16,7	11,8

4.3. Analiza skuteczności filtracji adaptacyjnej

Na potrzeby analizy skuteczności działania filtracji adaptacyjnej zaproponowanej w rozdziale 3.3, dokonana została akwizycja danych z wykorzystaniem systemu bazującego na modułach DWM1000. Scenariusz badania był bliźniaczo podobny do tego z rozdziału 4.2, jednak w tym przypadku anteny systemu zostały pierwotnie umieszczone w warunkach LOS (bezpośrednio przed przednią szybą pojazdu). W ramach akwizycji zebrano serie danych podczas przejazdu samochodem po linii prostej z wykorzystaniem tempomatu przy prędkościach z zakresu 10 – 60 km/h. Samochód wyposażony został w jedną kotwicę UWB. Infrastrukturę reprezentowały cztery punkty, które dla ułatwienia analizy zostały rozmieszczone na planie kwadratu o boku 5m na stałej wysokości odpowiadającej wysokości umiejscowienia anteny na pojeździe.

Dla tak przeprowadzonego scenariusza zgodnie z algorytmem opisanym powyżej przeprowadzono trilaterację, a następnie dla zadeklarowanej na rysunku ścieżki przejazdu przygotowano na bazie danych serie czasowe, a dalej wyznaczono oczekiwane punkty, w których powinny pojawić się odczyty z systemu UWB. Porównanie ich z danymi rzeczywistymi pozwoliło na wyznaczenie RMSE, które zaprezentowano w tabeli 17, w którym średnia wartość parametru RMSE dla wszystkich serii wyniosła 17,59 cm. Ta wartość jest już dla danych surowych parametrem, który – w naturalnych warunkach miejskich – mógłby pozwolić na wystarczająco precyzyjne etykietowanie. Jest to jednocześnie wartość, która może zostać poddana filtracji z wykorzystaniem metod logiki rozmytej.

Tab. 17. Wartości RMSE [cm] przejazdów zrealizowanych samochodem.

Seria	1	2	3	4	5	6
RMSE	17,96	20,75	21,23	15,11	13,13	17,34

Dalej stosowany jest proponowany algorytm filtracji adaptacyjnej (rysunek 9 blok C). Bazuje on na parametrach odpowiadających – w konkretnej serii – deklarowanej prędkości z magistrali CAN, parametr adaptacji był natomiast dobrany dla całej serii (zważywszy na stałą prędkość przejazdu i warunki w ramach monitorowanego obszaru w każdej serii pomiarowej). Dla takich założeń przeprowadzono ponownie filtrację, a następnie przeprowadzono trilaterację i wyznaczono RMSE, który przedstawiono w tabeli 18.

Tab. 18. Wartości RMSE [cm] dla danych przefiltrowanych adaptacyjnie dla przejazdów zrealizowanych samochodem.

Seria	1	2	3	4	5	6
RMSE dla danych surowych	17,96	20,75	21,23	15,11	13,13	17,34
RMSE po filtracji	13,33	17,12	15,47	9,56	5,79	10,35
Różnica wartości	4,63	3,63	5,76	5,55	7,34	6,99

Dzięki zastosowaniu zaproponowanej filtracji adaptacyjnej zmniejszono RMSE o dodatkowe 3,5–7,5cm, co w efekcie np. kompensuje w pewnym stopniu przesunięcie wynikające z prędkości przemieszczenia. W ramach prowadzonych badań zauważono niewielką korelację spadku wartości RMSE w stosunku do wzrostu prędkości pojazdu w serii, w której spadek RMSE był niższy w seriach przeprowadzonych z mniejszą prędkością, a wraz z jej wzrostem spadek wartości RMSE był większy. Prawdopodobnie wiąże się to z większym odstępem czasowym pomiędzy kolejnymi odległościami, co wynika wprost z stałej częstości pozyskiwania danych, która przy rosnącej prędkości daje mniejszą liczbę odczytów na odcinku pomiarowym. Zaproponowana metoda ze względu na zastosowanie filtrów z kroczącym oknem może faworyzować przejazd po linii prostej,

co wraz ze wzrostem prędkości niweluje także czynnik ludzkiego wpływu na trajektorię ruchu pojazdu. Można jednak rozszerzyć tę metodę – szczególnie w kontekście niższych prędkości – o zastosowanie agregacji danych, co także pozwala na zmniejszenie błędu [15], jednak nie było to bezpośrednim przedmiotem badań związanych z rozprawą. Tym niemniej wykazano, że zaproponowana metoda adaptacji pozwala na zmniejszenie błędu jaki wiąże się z wymiarowaniem obiektu będącego w ruchu, a co za tym idzie zwiększyć precyzję określania pozycji etykietowanych obiektów.

4.4. Analiza skuteczności zaproponowanych modeli logiki rozmytej

W pracy zaproponowano dwa modele logiki rozmytej. Jej zadaniem jest korekta odległości, która jest pozyskiwana z systemu dla różnych scenariuszy takich jak: zmienne otoczenie, odległość, widoczność anten, występowanie transmisji danych. W celu walidacji metody wprowadzonej w rozdziale 3.4 „Korekta odległości z wykorzystaniem logiki rozmytej”, dla zebranych statycznie danych przeprowadzono weryfikację uzyskanych modeli Mamdaniego oraz Sugeno.

4.4.1. Weryfikacja modelu Mamdaniego

W celu weryfikacji modelu mającego na celu poprawę dokładności wymiarowania, przeprowadzono analizę skuteczności korekty informacji o odległości. Dla środowiska wewnętrznego (test wyłącznie dla odległości, 10000 próbek w serii) otrzymane rezultaty przedstawiono w tabeli 19.

Tab. 19. Rezultaty zastosowania korekty bazującej na modelu Mamdaniego w środowisku wewnętrznym.

<i>Odległość referencyjna [cm]</i>	<i>Odległość zmierzona [cm]</i>	<i>Błąd dla danych surowych [cm]</i>	<i>Odległość po zastosowaniu korekty [cm]</i>	<i>Błąd po korekcie [cm]</i>	<i>Różnica wartości błędu [cm]</i>
25	10,1	14,9	20,8	4,2	-10,7
50	35,6	14,4	43,5	6,5	-7,9
75	65,7	9,3	70,6	4,4	-4,9
100	97,3	2,7	100,2	0,2	-2,5
150	154,3	4,3	154,0	4,0	-0,3
200	201,5	1,5	200,3	0,3	-1,2
300	304,1	4,1	304,5	4,5	0,4
400	399,4	0,6	399,4	0,6	0
500	504,5	4,5	504,5	4,5	0
600	598,1	1,9	598,1	1,9	0
800	798,5	1,5	798,5	1,5	0
1000	998,0	2,0	998,0	2,0	0
1500	1522,5	22,5	1521,8	21,8	-0,7
2000	2012,6	12,6	2009,6	9,6	-3,0
2500	2509,7	9,7	2505,4	5,4	-4,3
3000	3010,7	10,7	3003,0	3,0	-7,7

Z zastosowanego algorytmu wynika, że różnica odległości pozyskanej z systemu UWB do referencji zmniejsza się, bądź utrzymuje się na stałym poziomie. Największą redukcję można zaobserwować dla niskich wartości odległości (poniżej 1m), dla których pierwotnie błąd względny był największy – jego wartość dochodziła do 15 cm, co stanowiło ponad 50% mierzonej odległości, jednak korekta pozwoliła na redukcję tej wartości do 4-6cm (co stanowiło 93 – 53% wartości początkowej). W środkowym zakresie, w którym korekta nie była wymagana ze względu na niewielką rozbieżność wartości, zgodnie z zaimplementowanymi regułami nie wprowadzono zmian, tak więc błąd bezwzględny utrzymał się na stałym poziomie. Jedyną odległością, przy której zanotowano pogorszenie był dystans 3 metrów – tutaj nastąpiła zmiana o 0,4cm na niekorzyść proponowanego rozwiązania, co wynika z bezpośredniego sąsiedztwa mniej korzystnej reguły oraz niskiego (poniżej 5cm) błędu dla danych surowych. W przypadku odległości większych (powyżej 20 metrów) ponownie można zaobserwować zauważalną minimalizację błędu w zakresie 3 – 7 cm. Średni błąd po przeprowadzeniu korekty wynosi 4,7 cm i jest o 2,1 cm mniejszy niż analogiczny średni błąd dla wartości surowych.

Można wnioskować, że istotna poprawa pomiarów w niewielkiej odległości od pojazdu, która wynika z zastosowania proponowanego rozwiązania, umożliwi znaczącą poprawę algorytmów wyznaczających zajętość przestrzeni wokół pojazdu charakteryzującej się największym zagęszczeniem obiektów najbliższej jego okolicy. Proponowane zastosowanie w środowisku wewnętrznym sugeruje scenariusze odpowiadające parkingom podziemnym czy tunelom.

Dalej algorytm korekty została zastosowana dla danych w środowisku zewnętrznym co zaprezentowano w tabeli 20. Dla środowiska zewnętrznego zanotowano również zauważalne zniwelowanie różnicy pomiędzy wartością oczekiwaną a tą pozyskaną z systemu – nie uwzględniając jednej odległości – skorygowana wartość odległości uległa zmniejszeniu o 60pp. względem wartości początkowej. Analogicznie jak w przypadku danych dla środowiska wewnętrznego, nieuwzględniona odległość to pogorszenie otrzymanego pomiaru odległości dla 3m. Istotnym jest jednak fakt, że dla danych surowych błąd wyniósł 0,2 cm, a wartość po korekcie – 3,6 cm. Wartość uśredniona wskazuje na dokładność przewyższającą założone niepewności pomiarowe, co wynika wprost z wielkości serii pomiarowej. Wskazuje to również na wysoką dokładność systemu i wartość całego cyklu obróbki danych, którego jednym z pierwszych etapów jest filtracja adaptacyjna związana filtrem z krocącym oknem.

Tab. 20. Wpływ korekty na dokładność odległości dla modelu Mamdaniego w środowisku zewnętrznym.

Odległość referencyjna [cm]	Odległość zmierzona [cm]	Błąd dla danych surowych [cm]	Odległość po zastosowaniu korekty [cm]	Błąd po korekcie [cm]	Różnica wartości błędu [cm]
25	5,8	19,2	19,8	5,2	-14,0
50	34,1	15,9	46,2	3,8	-12,1
75	59,5	15,5	70,4	4,6	-10,9
100	89,8	10,2	99,6	0,4	-9,8
150	139,6	10,4	146,9	3,1	-7,3
200	195,3	4,7	198,8	1,2	-3,5
300	299,8	0,2	296,4	3,6	3,4
400	402,2	2,2	398,3	1,7	-0,5
500	502,6	2,6	498,6	1,4	-1,2
600	608,5	8,5	604,5	4,5	-4,0
800	816,1	16,1	812,1	12,1	-4,0
1000	1003,6	3,6	999,7	0,3	-3,3
1500	1504,7	4,7	1503,3	3,3	-1,4
2000	1997,3	2,7	2001,7	1,7	-1,0
2500	2483,0	17,0	2491,2	8,8	-8,2
3000	2983,5	16,5	2998,7	1,3	-15,2

Wszystkie pozostałe odległości pozwoliły na zmniejszenie błędu odległości w zakresie od 0,5cm dla odległości 4m do 15,2cm dla odległości 30m. Wskazuje to na komplementarność proponowanej metody i sugestią korzystania z wszystkich dostępnych etapów filtracji w celu uzyskania jak najlepszej wartości będącej podstawą systemu referencyjnego dla ADAS.

W przypadku weryfikacji działania korekty dla serii podczas których transmitowane są dane i występują przeszkody należy uwzględnić większe możliwe błędy. Dlatego też eksperymentowano z różnymi wartościami parametru $CORR_{param}$ i ustalono, że wartość ta powinna wzrosnąć. Proponuje się tutaj wprowadzić $CORR_{param} = 200$ co w lepszy sposób odpowiada na zakres błędu. Dla tej wartości zostały przeprowadzone dalsze eksperymenty. Dla środowiska wewnętrznego otrzymano rezultaty przedstawione w tabeli 21.

Tab. 21. Korekta odległości dla różnej liczby transmitowanych danych oraz warunków NLOS w środowisku wewnętrznym.

Środowisko wewnętrzne							
Transmitowane dane [B]	Przed korektą			Po korekcie		Poprawa	
	Odległość [cm]	Błąd bez przeszkód [cm]	Błąd z przeszkodami [cm]	Błąd bez przeszkód [cm]	Błąd z przeszkodami [cm]	Bez przeszkód [cm]	Z przeszkodami [cm]
10	1000	-31	-34,9	14,9	4,7	16,1	30,2
	1500	-28,4	-31,9	17,6	7,7	10,8	24,2
	2000	-25,6	-28	20,4	11,6	5,2	16,4
25	1000	-33,5	-36,5	12,5	3,1	21	33,4
	1500	-31,8	-35,5	14,1	4,1	17,7	31,4
	2000	-28,8	-31,7	17,2	7,9	11,6	23,8
50	1000	-33,2	-38	12,8	1,6	20,4	36,4
	1500	-35,7	-35,8	10,3	3,8	25,4	32
	2000	-31,9	-37,3	14	2,3	17,9	35
80	1000	-38,4	-41,4	7,6	-0,1	30,8	41,3
	1500	-38,3	-40,1	7,6	1,1	30,7	39
	2000	-33,8	-36,8	12,2	4,4	21,6	32,4

W przypadku pomiarów w środowisku wewnętrznym dla zaproponowanej korekty otrzymano poprawę wskazań dystansu z systemu UWB o średnio 25cm (72pp. względem wartości początkowej). Dzięki zastosowanej korekcie zredukowano różnicę w odległościach do wartości poniżej 20 cm dla badań bez przeszkód oraz do wartości poniżej 10 cm dla scenariuszy z występującymi przeszkodami (w obu przypadkach nieznacznie wyłamują się serie dla odległości 20 metrów i 10 bajtów transmitowanych danych). Średnio poprawa bez przeszkód wyniosła 19,1 cm, natomiast w przypadku występowania przeszkód różnica między błędem odległości dla danych surowych a tych po zastosowaniu korekty za pomocą metody logiki rozmytej wyniosła 31,3cm. Analogiczną weryfikację przeprowadzono dla środowiska zewnętrznego, a wyniki przedstawiono w tabeli 22.

Tab. 22. Korekta odległości dla różnej liczby transmitowanych danych i występowania warunków NLOS w środowisku zewnętrznym.

		Środowisko zewnętrzne					
Transmitowane dane	Odległość [cm]	Przed korektą		Po korekcie		Poprawa	
		Błąd bez przeszkód [cm]	Błąd z przeszkodami [cm]	Błąd bez przeszkód [cm]	Błąd z przeszkodami [cm]	Przed korektą [cm]	Po korekcie [cm]
10	1000	-46,6	-38,4	-0,5	7,5	46,1	30,9
	1500	-71,2	-62,1	-25,2	-42	46	20,1
	2000	-39,8	-37,7	6,2	-37,7	33,6	0
25	1000	-55,1	-40,4	-9,1	5,6	46	34,8
	1500	-46,5	-44,3	-0,4	-21,9	46,1	22,4
	2000	-65,8	-12,3	-19,7	-12,3	46,1	0
50	1000	-84,4	-35,1	-38,3	10,1	46,1	25
	1500	-49,8	-46,7	-3,7	-24,6	46,1	22,1
	2000	-61,3	-13,5	-15,2	-13,2	46,1	0,3
80	1000	-50,2	-37,1	-4,2	-7,1	46	30
	1500	-54,2	-52,6	-8,1	-35,2	46,1	17,4
	2000	-60,6	-20	-14,5	-16,6	46,1	3,4

W przypadku korekty odległości dla scenariuszy, w których transmitowane były dodatkowe dane w środowisku zewnętrznym, we wszystkich zweryfikowanych przypadkach udało się uzyskać poprawę, czyli zmniejszyć błąd przesunięcia odległości wyznaczonej za pomocą systemu UWB. Średni błąd odległości dla wariantów bez przeszkód wynosił dla danych surowych 57,1 cm, natomiast po korekcie wyniósł 11 cm, co stanowi różnicę 45 cm (redukcja o 81pp.). Dla scenariuszy z występującymi przeszkodami było to pierwotnie 36,7 cm, a wartość tą zredukowano do 15,6 cm. Chociaż, w przeciwieństwie dla testów wewnątrz budynku, można znaleźć pojedyncze wartości odległości po korekcie, które przekraczają wspomniane w poprzednim akapicie 20 cm, to jednak w większości tych przypadków wartość poprawy wynosi ponad 46 cm. Bez względu na to, średni błąd dla środowiska wewnętrznego wyniósł 4,4 cm w przypadku pomiarów bez przeszkód oraz 13,4 cm w warunkach NLOS, natomiast dla środowiska zewnętrznego wyniósł 19,9 cm dla pomiarów z występującymi przeszkodami oraz 12,1 cm bez przeszkód.

4.4.2. Weryfikacja modelu Sugeno

Ze względu na możliwości systemu opartego na logice rozmytej postanowiono wprowadzić również model Sugeno, dla którego wykorzystano mechanizm neuro-fuzzy designera oraz wiedzę z pierwszego podejścia (modelu Mamdaniego). W trakcie tworzenia modelu przyjęto, że liczba zmiennych tworzonego modelu będzie odpowiadała wcześniej wytypowanym parametrom (odległość, liczba danych, środowisko, występowanie przeszkód), natomiast liczba funkcji przynależności, jak i ich rodzaj dla każdego z parametrów została zweryfikowana empirycznie. Podczas uczenia modelu skorzystano z hybrydowej optymalizacji a liczba epok ustawiona została na 100.

W rezultacie podczas uczenia zauważono, że w przypadku danych związanych z środowiskiem i odległością, najlepszy stosunek liczby funkcji przynależności dla poszczególnych funkcji wejściowych to 5 dla odległości oraz 2 dla środowiska. Takie też założenia przyjęto do dalszej analizy. W pierwszej kolejności funkcje generowane były automatycznie w sposób liniowy dla wszystkich typów funkcji przynależności. Trzy najlepsze (przykładowo, dla środowiska wewnętrznego) zestawiono w tabeli 23. Są to gbellmf – uogólniona funkcja dzwonowa, gaussmf – funkcja gausowska oraz dsigmf, która oblicza rozmyte wartości przynależności przy użyciu różnicy między dwiema sigmoidalnymi funkcjami przynależności.

Tab. 23. Wyniki [cm] dla korekty opartej na modelu Sugeno dla środowiska wewnętrznego.

Środowisko	Wewnętrzne					
	gbellmf		gaussmf		dsigmf	
	Odległość po filtracji	Błąd	Odległość po filtracji	Błąd	Odległość po filtracji	Błąd
<i>Funkcja przynależności</i>						
<i>Odległość referencyjna [cm]</i>						
25	23,9	1,1	24,9	0,1	23,0	2,0
50	47,0	3,0	47,4	2,6	46,5	3,5
75	74,3	0,7	74,1	0,9	74,2	0,8
100	103,1	3,1	102,5	2,5	103,5	3,5
150	155,3	5,3	154,5	4,5	156,2	6,2
200	199,2	0,8	198,7	1,3	200,0	0
300	298,0	2,0	298,7	1,3	297,8	2,2
400	395,7	4,3	395,7	4,3	395,1	4,9
500	504,9	4,9	504,4	4,4	505,0	5,0
600	599,5	0,5	599,9	0,1	599,9	0,1
800	798,7	1,3	798,9	1,1	798,8	1,2
1000	1000,4	0,4	1000,3	0,3	1000,1	0,1
1500	1484,6	15,4	1484,4	15,6	1484,5	15,5
2000	2000,0	0	2000,0	0	2006,8	6,8
2500	2500,0	0	2502,8	2,8	2499,3	0,7
3000	3000,0	0	3000,0	0	3000,0	0

Z otrzymanych rezultatów wynika, że średni błąd we wskazanych miejscach referencyjnych dla zaproponowanych metod wynosi 2,9 cm i jest o niepełna 2 cm mniejszy niż błąd dla modelu Mamdaniego oraz o 4,4 cm mniejszy niż w przypadku wartości surowych. Największa poprawa zauważalna jest dla odległości poniżej 1 m – błąd względny w przypadku wykorzystania funkcji przynależności Gaussa wyniósł dla wybranych wartości poniżej 1%. Największy błąd można zaobserwować dla odległości 15 m, wynosi on ponad 15 cm. Już na tym etapie warto jednak zaznaczyć, że w przypadku uczestników ruchu czy elementów infrastruktury miejskiej przy takiej odległości nie jest to błąd eliminujący, ponieważ jego wartość jest znacząco mniejsza niż wielkość np. samochodu czy odległości między obiektami.

Na podstawie analizy wygenerowanych zmiennych można jednak zauważyć, że istnieją pewne różnice podziału np. dla transmitowanych danych wygenerowane automatycznie zmienne lingwistyczne porównane do tych utworzonych wcześniej dla modelu Mamdaniego wyglądają w sposób przedstawiony w tabeli 24.

Tab. 24. Porównanie zmiennej lingwistycznej „liczba transmitowanych danych” dla modelu Mamdaniego oraz Sugeno

<i>Liczba danych</i>	<i>Funkcja w modelu Mamdaniego</i>	<i>Dobór na podstawie danych eksperckich</i>		<i>Dobór automatyczny</i>	
		<i>Odchylenie standardowe (szerokość)</i>	<i>Średnia (środek)</i>	<i>Odchylenie standardowe (szerokość)</i>	<i>Średnia (środek)</i>
<i>do 10 B</i>	bardzo mało	1	0	-	-
<i>10B - 25B</i>	mało	1	1	7,0031	1,0001
<i>25B - 50B</i>	średnio	1	2,5	7,0016	2,4999
<i>50B - 80B</i>	dużo	1	5	7,0000	4,9999
<i>powyżej 80B</i>	bardzo dużo	1	8	7,0000	7,9999

Taką samą analizę porównawczą wykonano dla danych ze środowiska zewnętrznego, których wyniki przedstawiono w tabeli 25.

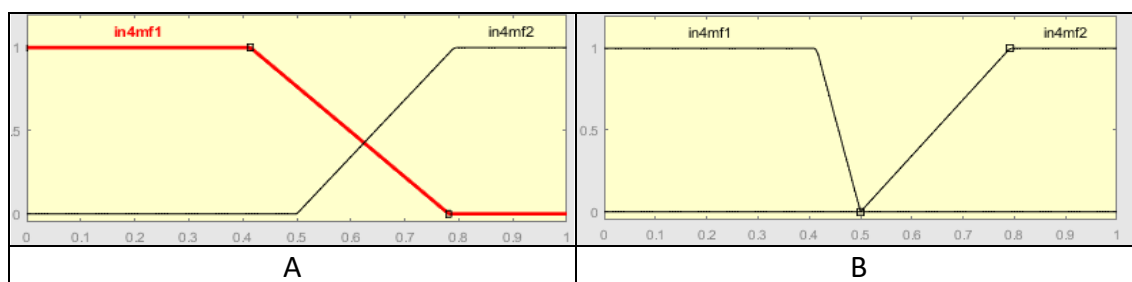
Tab. 25. Rezultaty dla korekty bazującej na modelu Sugeno w środowisku zewnętrznym.

Środowisko	Zewnętrzne					
	gbellmf		gaussmf		dsigmf	
	Odległość po filtracji [cm]	Błąd [cm]	Odległość po filtracji [cm]	Błąd [cm]	Odległość po filtracji [cm]	Błąd [cm]
<i>Funkcja przynależności</i>						
<i>Odległość referencyjna [cm]</i>						
25	24,7	0,3	25,1	0,1	24,2	0,8
50	50,8	0,8	50,8	0,8	50,5	0,5
75	74,1	0,9	73,9	1,1	74,1	0,9
100	102,0	2,0	101,7	1,7	102,3	2,3
150	148,0	2,0	147,8	2,2	148,6	1,4
200	200,0	0	200,1	0,1	200,6	0,6
300	300,0	0	300,7	0,7	299,6	0,4
400	401,2	1,2	401,0	1,0	400,3	0,3
500	499,0	1,0	498,8	1,2	499,2	0,8
600	599,9	0,1	600,1	0,1	601,0	1,0
800	800,3	0,3	800,3	0,3	799,7	0,3
1000	999,8	0,2	999,9	0,1	1000,0	0
1500	1499,4	0,6	1500,0	0	1500,0	0
2000	1999,2	0,8	1999,5	0,5	2002,1	2,1
2500	2498,6	1,4	2510,1	10,1	2500,5	0,5
3000	2999,6	0,4	3000,3	0,3	3000,0	0

Średnia różnica względem odległości referencyjnej dla trzech wskazanych funkcji przynależności w środowisku zewnętrznym wynosi 0,9 cm, co w kontekście 9,4 cm dla wartości surowych jest znaczącą poprawą. Otrzymany rezultat co do wartości jest już niższy niż dokładność urządzenia pomiarowego stanowiącego referencję do badań i pierwotnie oczekiwanych rezultatów. Największy błąd – na poziomie 10 cm – odnotowano dla funkcji przynależności Gaussa dla odległości 25 m. Dwie pozostałe funkcje największą różnicę odnotowały w zakresie 2 – 2,3 cm dla odległości 1 m. Wynika stąd, że nawet w przypadku największej niedokładności systemu UWB, po zastosowaniu proponowanej metody filtracji, powstała rozbieżność nie stanowi przeszkody do wykorzystania go do wymiarowania obiektów znajdujących się w środowisku miejskim. Ponadto rezultaty obróbki dla danych statycznych wskazują na dokładność wyższą niż deklarowana dokładność systemów walidowanych, co pozwala uznać za stosowne wykorzystanie systemu UWB do walidacji podsystemów ADAS.

4.4.1. Weryfikacja zmodyfikowanego modelu Sugeno

Dla modelu Sugeno, którego propozycję zweryfikowano w poprzednim rozdziale, dokonano korekty na podstawie danych eksperckich (związanych z wartościami zmierzonymi dla odległości referencyjnych, które zebrano na początku badań) oraz znajomości ich charakterystyki. Zmianie uległy wygenerowane funkcje przynależności, skorygowano m.in. znane, pewne wartości liczbowe czy rozkład funkcji dla środowiska i warunków widoczności w taki sposób, aby funkcje pierwotnie wygenerowane (jak pokazano na rysunku 31 A) dla zmiennych o znanej charakterystyce były rozłączne (rysunek 31 B).



Rys. 31. Zmiana rozkładu funkcji zmiennej lingwistycznej wygenerowanej (A) na rozłączną (B) dla modelu Sugeno

W rezultacie otrzymano wartości, dla których wyznaczono błąd odległości i przedstawiono w tabeli 26.

Tab. 26. Rezultaty zastosowania korekty dla zmodyfikowanego modelu Sugeno dla środowiska zewnętrznego.

Funkcja przynależności	<i>gbellmf</i>		<i>gaussmf</i>		<i>dsigmf</i>	
	Wewnętrzne	Zewnętrzne	Wewnętrzne	Zewnętrzne	Wewnętrzne	Zewnętrzne
Środowisko						
Odległość ref. [cm]	Błąd [mm]					
25	0,2	0,1	0,1	0,1	1,4	1,4
50	2,6	0,8	2,6	0,8	2,1	2,1
75	0,8	1,1	0,9	1,1	1,3	1,3
100	2,5	1,7	2,5	1,7	1,4	1,4
150	4,4	2,3	4,5	2,2	3,0	3,0
200	1,6	0,1	1,3	0,1	2,3	2,3
300	1,5	0,7	1,3	0,7	0,3	0,3
400	3,7	1,3	4,3	1,0	2,9	2,9
500	4,9	1,3	4,4	1,2	4,2	4,2
600	0,7	0,3	0,1	0,1	1,3	1,3
800	1,2	0,7	1,1	0,3	0,6	0,6
1000	0,4	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3
1500	15,7	0	15,6	0	17,6	17,6
2000	0	0	0,1	0	0	0
2500	0	0	0,7	0	0	0
3000	0	0	0	0	0	0

Z tabeli wynika, że w stosunku do funkcji wygenerowanych automatycznie zanotowano nieznaczną poprawę (w zależności od funkcji było to od 0,2 cm do niespełna 2 cm). Analogicznie jak w poprzednim przypadku, największy błąd (w zakresie do 15-17 cm) można zauważyć dla odległości 15 metrów. Dla środowiska wewnętrznego kumulacja błędów właśnie wokół tej wartości może mieć swoją genezę w charakterystyce budynku (np. pomiar ten mógł być dokonywany w sąsiedztwie drzwi ognioodpornych).

Kolejnym krokiem była weryfikacja zmodyfikowanej wersji Sugeno dla wariantów ze zmienną liczbą transmitowanych danych oraz z możliwością występowania przeszkód. W rezultacie otrzymano wyniki zestawione w tabelę 27.

Tab. 27. Błąd po zastosowaniu korekty bazującej na zmodyfikowanym modelu Sugeno.

<i>Błąd pomiaru odległości [cm]</i>					
<i>Odległość [cm]</i>	Liczba transmitowanych danych [B]	Wewnętrzne		Zewnętrzne	
		LOS	NLOS	LOS	NLOS
1000	10	0,4	0,1	2,1	2,3
1500	10	0,1	0,1	9,7	12,5
2000	10	0,4	0,2	18,7	18,4
1000	25	0,3	0,1	1,8	2,0
1500	25	0,0	0,0	8,0	12,6
2000	25	1,1	0,2	20,6	20,9
1000	50	1,3	0,1	3,1	3,3
1500	50	0,0	0,0	0,3	0,4
2000	50	5,0	0,5	36,6	34,9
1000	80	0,4	0,1	2,3	2,6
1500	80	0,0	0,0	1,4	2,2
2000	80	10,8	0,3	19,5	19,2

Na bazie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dla wszystkich przeprowadzonych scenariuszy testowych uzyskano poprawę po zastosowaniu filtracji opartej na zaproponowanych systemach logiki rozmytej, szczególnie dla zmodyfikowanego podejścia Sugeno. Najlepsze rezultaty osiągnięto dla pomiarów wewnątrz budynku. W tych warunkach największy zanotowany średni błąd dla serii po korekcie wyniósł 10,8 cm, natomiast dla wszystkich serii było to 1,6 cm z przeszkodami i poniżej 1 cm dla pomiarów w warunkach LOS. W przypadku środowiska zewnętrznego otrzymane rezultaty również wykazały zmniejszenie błędów w stosunku do wcześniej proponowanego modelu na bazie Mamdaniego. Dla pomiarów bez przeszkód jest to zmniejszenie błędów z 12 cm na niecałe 11 cm, natomiast w przypadku występowania przeszkód, średnia dla wszystkich serii wyniosła 10,3 cm, co stanowi poprawę o ponad 9 cm w stosunku do poprzedniego rozwiązania bazującego na modelu Mamdaniego.

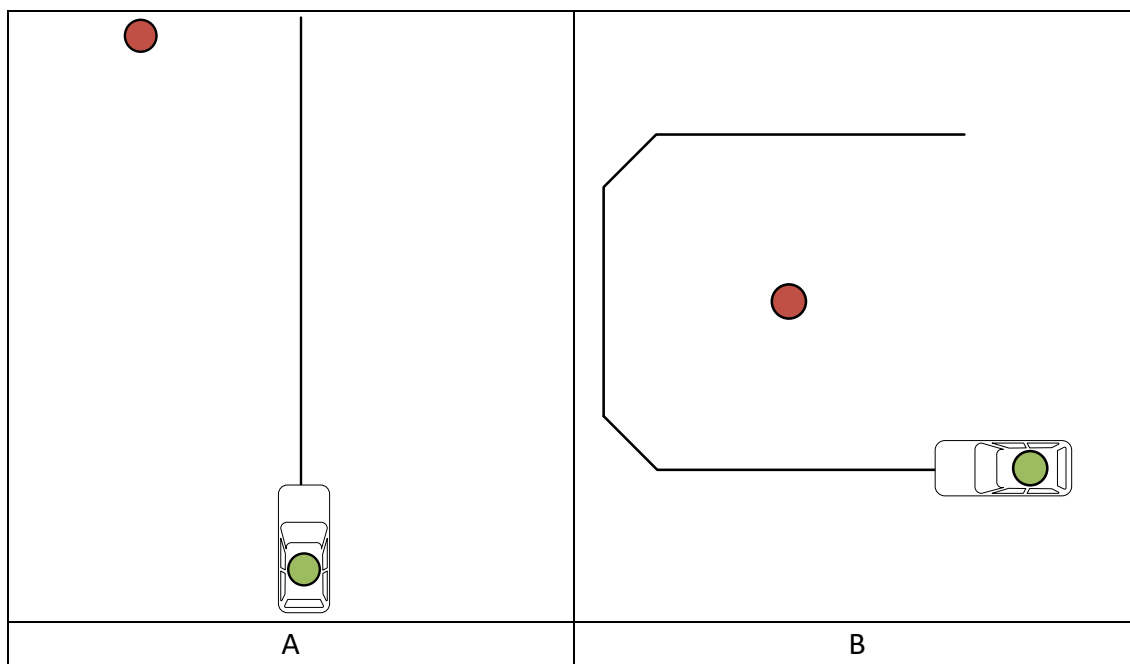
Badania te wykazały, że zastosowanie modeli logiki rozmytej wraz z odpowiednio zaprojektowaną zmienną lingwistyczną i funkcjami przynależności, umożliwiając poprawę dokładności wymiarowania w systemie UWB. Szczególnie dokładnie wyznaczone odległości udało się uzyskać dla środowiska wewnątrz budynków (co odpowiada np. parkingom podziemnym, tunelom i innym miejscom, gdzie wykorzystanie systemu UWB jest preferencyjne – ze względu na słaby sygnał GPS lub jego brak), gdzie błąd oscylował w granicach 1-2 cm.

Należy jednak pamiętać, że wszystkie otrzymane odległości związane są z pomiarami statycznymi, a więc dalszy wpływ na zwiększenie (lub redukcję) błędu mogą mieć inne etapy filtracji czy akwizycji danych. Istotnym elementem w przypadku systemów rozmytych jest też dostarczenie wszystkich wymaganych danych przez system zewnętrzny. W przypadku ich braku może zaistnieć konieczność rozszerzenia systemu np. o zastosowanie zbiorów rozmytych typu 2 [91], [92], co pozwoli na uwzględnienie niepewności lub braku aktualnych danych co do np. środowiska czy występowania przeszkód.

4.5. Analiza wyznaczania kąta

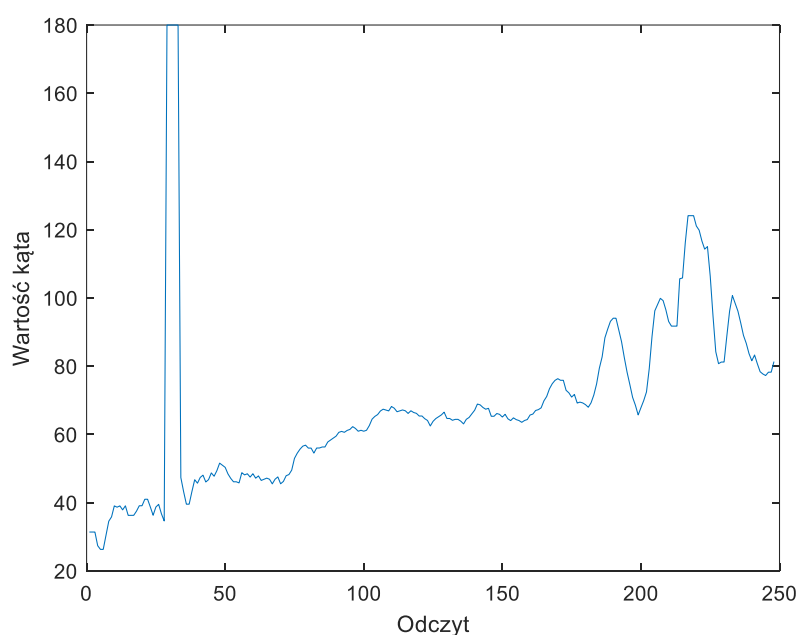
Po przeprowadzonej filtracji w celu określenia pozycji identyfikowanego obiektu względem pojazdu, należy skorzystać z jednej z dwóch możliwości. W przypadku kiedy obiekt wymiarowany jest przez pojazd z wykorzystaniem jednego lub dwóch modułów UWB, możliwy do wyznaczenia jest kąt względem osi pojazdu wraz z odległością. Jeżeli liczba punktów referencyjnych jest większa, możliwe jest wówczas przeprowadzenie trilateracji. Obie metody zostały opisane szerzej w rozdziale 3.5 „Algorytm trilateracji i określenie relacji kąt - odległość”.

W celu oceny możliwości wyznaczenia orientacji za pomocą systemu UWB z wykorzystaniem wskazanego algorytmu, przygotowane zostały dwa scenariusze bazujące na platformie poruszającej się po ścieżce wytyczonej aluminiowymi profilami. W pierwszym z nich pojazd wyposażony w moduł UWB poruszał się po prostej ścieżce, a w jej ciągu rozmieszczone zostały znaczniki UWB. Monitorowany znacznik został umieszczony w pobliżu jej końca (scenariusz A na rysunku 32). W drugim przypadku scenariusz zakładał ruch po kształcie zbliżonym do łuku, którego osią był monitorowany znacznik systemu UWB (scenariusz B na rysunku 32).



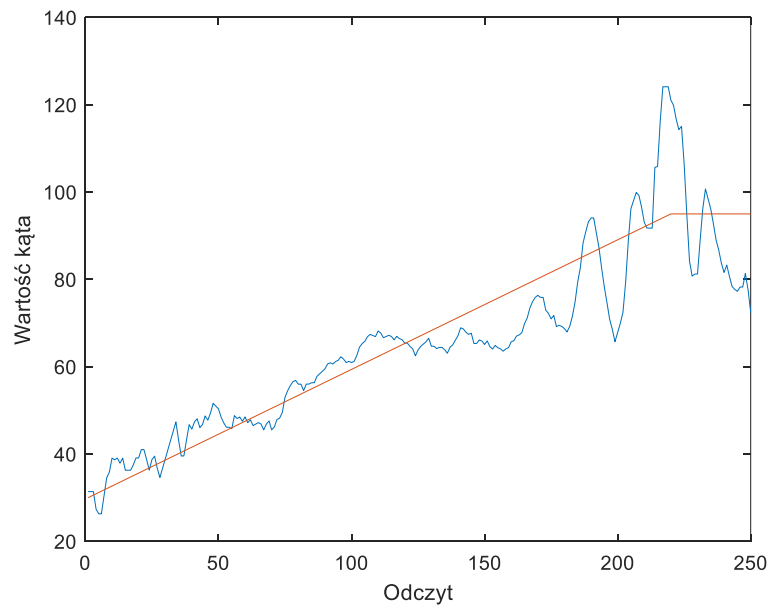
Rys. 32. Scenariusze podczas wyznaczania kąta względem ścieżki przejazdu pojazdem;
A – przejazd po linii prostej, B – przejazd po krzywej

Rezultatem przeprowadzenia obróbki danych zaproponowanej w rozdziale 3.5 „Algorytm trilateracji i określenie relacji kąt - odległość” było otrzymanie wykresów prezentujących zmianę wartości odczytywanych parametrów pozyskiwanych z poszczególnych czujników, a także wartość kąta między osią wzdłużną pojazdu a monitorowanym znacznikiem systemu UWB. Dla przejazdu po prostej przed usunięciem wartości odstających zaprezentowano ją na rysunku 33.



Rys. 33. Kąt względem osi pojazdu, ruch po prostej przed filtracją.

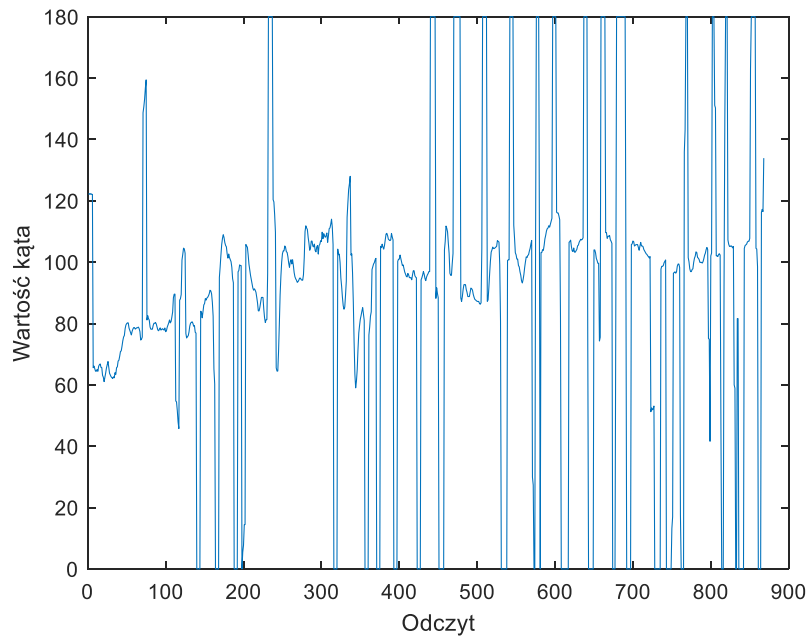
Po usunięciu wartości odstających i uzupełnieniu ich zgodnie z proponowaną wcześniej metodą (schemat, blok B) na rysunku 34.



Rys. 34. Kąt względem osi pojazdu, ruch po prostej po filtracji (niebieski) wraz z kątem referencyjnym (pomarańczowy).

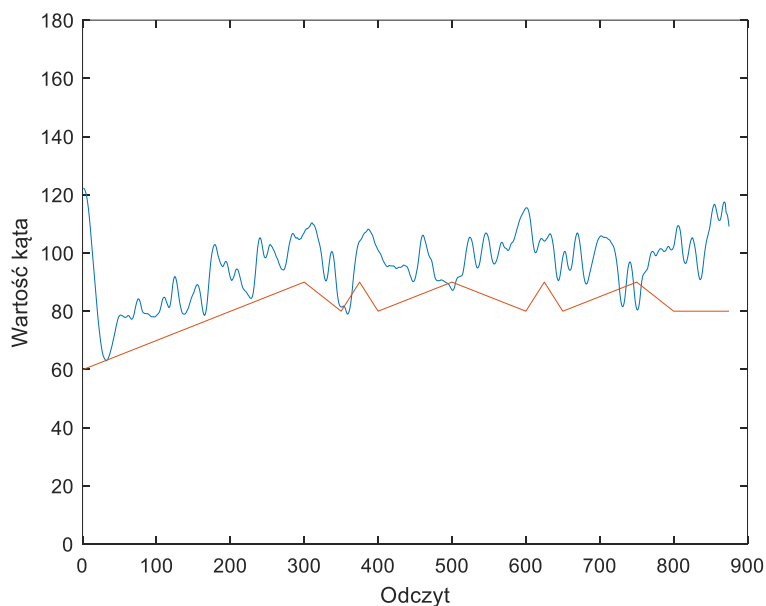
Na prezentowanym rysunku można zauważyć, że wraz z zbliżaniem się do etykietowanego obiektu (znajdującego się po jednej ze stron ścieżki ruchu) wartość kąta rośnie, a kiedy pojazd znalazł się w jego bezpośrednim sąsiedztwie następuje przekroczenie wartości 90 stopni. Ze względu na niskie odległości i prędkość wahania, wartości kąta oscylują w granicach kilkunastu stopni odczyt do odczytu, jednak przy założeniach wynikających ze skali eksperymentu oraz wartości odchylenia standardowego danych pochodzących z systemu UWB, uznano tę wartość za akceptowalną, a trajektorię za jasno wskazującą tendencję ruchu. Można także zauważyć, że wprowadzona metoda wstępnego przetwarzania otrzymywanych danych pozwoliła na wizualną poprawę jakości pozyskiwanych danych.

Drugim z omawianych przykładów był ruch po ścieżce przypominającej swoim kształtem okrąg. W przypadku tego scenariusza wartość kąta względem osi poruszania się pojazdu przedstawiono na rysunku 35.



Rys. 35. Kąt względem osi pojazdu, ruch po łuku przed filtracją.

Na rysunku można zauważyć, że w scenariuszu tym pojawiło się znacznie więcej wartości odstających. Dane takie mogą negatywnie wpłynąć na detekcję pozycji etykietowanego obiektu. Po przeprowadzeniu korekty wartości odstających oraz filtracji rezultaty przedstawiono na rysunku 36.



Rys. 36. Kąt względem osi pojazdu, ruch po łuku po filtracji (niebieski) wraz z kątem referencyjnym (pomarańczowy).

Dla drugiego z omawianych scenariuszy (B), rezultat działania proponowanej metody wykazuje eliminację wszystkich wartości skrajnie odstających natomiast

zastosowanie filtracji pozwoliło na wygładzenie otrzymana. Na podstawie otrzymanego wykresu widać, że w pierwszej fazie ruchu pojazd dojeżdża do toru odzwierciedlającego łuk, a następnie porusza się po obwodzie. Rezultatem jest kąt względem osi ruchu oscylujący wokół wartości 90 stopni. Stosowanie proponowanej metody zaleca się w warunkach, kiedy nie można wyznaczyć pozycji za pomocą trilateracji. Mimo że metoda pozwala na przybliżone określenie kąta, to odchylenia od wartości oczekiwanej wskazują na preferencyjne wykorzystanie tej metody, kiedy odległości pomiędzy pojazdem a obiektem, względem którego wyznaczany jest kąt, są znacząco większe niż odchylenie standardowe odczytów z systemu UWB. Błąd taki można zaobserwować pod koniec pierwszego z przejazdów, kiedy to odległości między antenami były niewielkie (poniżej 1m) co powodowało zauważalne zmiany wyznaczonej wartości kąta. Należy jednak zwrócić uwagę, że proponowana metoda będzie dawała lepsze wyniki wraz ze wzrostem odległości między wymiarowanymi obiektami.

4.6. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań dokonano analizy kroków zaproponowanych w ramach schematu postępowania z danymi przedstawionego na rysunku 9 w blokach B, C oraz D. W pierwszym z bloków wprowadzona została filtracja wartości odstających, pozwalająca na eliminację błędów wynikających z chwilowych nieprawidłowości w działaniu systemu, prowadzących do zaburzeń w obliczeniu czasu przelotu sygnału (np. przysłonięcia anten, odbicia sygnału). Wyeliminowanie – szczególnie dużych błędów – pozwala na wyznaczenie prędkości z systemu UWB z wyższą precyzją, a co za tym idzie na możliwość większej precyzji przy określaniu kąta, jaki znajduje się między osią pojazdu a etykietowanym obiektem. Należy jednak uwzględnić ograniczenia tej metody, którymi niewątpliwie są wprowadzane opóźnienie, oraz możliwość korekty jedynie ograniczonej liczby błędów o znacząco odbiegającej wartości odległości, które nie powinny w swojej ilości przekraczać długości okna stosowanego filtra. Innymi słowy usunięcie wartości odstających i ich ponowne wyznaczenie numerycznie jest tak długo możliwe, dopóki liczba wartości nie przekracza wielkości dopuszczalnego okna.

Blok C związany z filtracją adaptacyjną wykazał, że uzależnienie filtracji od dodatkowego parametru pozwala na zdefiniowanie wartości, które należy poddać filtracji (określić, które odległości wynikają wprost z ruchu pojazdu, a które są efektem błędnego działania systemu). Rozwiązanie to wpływa na poprawę dokładności wymiarowania, ale także na zapotrzebowanie na moc obliczeniową poprzez redukcję konieczności filtracji wszystkich przychodzących danych oraz redukcję opóźnienia wynikającego z stosowania w sposób ciągły długiego okna filtra. Zaletą tego rozwiązania jest także umożliwienie podziału danych ze względu na ich jakość (te, które wymagają filtracji oraz te z wartością w założonym zakresie) oraz określenie pewności w działaniu systemu (wskazanie jaki procent wartości w danych warunkach wymaga filtracji).

Stosowanie tej metody jest jednak uzależnione od danych pochodzących z innych systemów a pozwalających na przeprowadzenie adaptacji takich jak chociażby prędkość z magistrali CAN.

Ostatnim etapem przetwarzania odległości przedstawionym w bloku D było zastosowanie metod logiki rozmytej. Zaproponowane dwa podejścia pozwoliły na stworzenie reguł korygujących wskazania systemu UWB szczególnie w obszarach, gdzie dokładność systemu pozycjonującego UWB była niższa (do 1 m). Poprawa dokładności wymiarowania do wartości kilku cm pozytywnie wpływa na dalsze etapy obróbki danych, takie jak określenie kąta i odległości czy też trilateracja. Należy jednak pamiętać, że metoda ta została oparta o konkretne parametry wyznaczone w procesie kalibracji pod konkretne rozwiązanie sprzętowe i w przypadku chęci zastosowania jej na innej platformie, np. na docelowym pojeździe testowym służącym do rozwoju algorytmów ADAS, będzie ona wymagała dostosowania w oparciu o charakterystykę działania konkretnego systemu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że wykorzystanie filtracji adaptacyjnej wraz z logiką rozmytą prowadzi do zwiększenia dokładności wymiarowania etykietowanych elementów. Przedstawione na schemacie kroki prowadzą do bloku E, w którym na podstawie informacji o odległościach wyznaczana jest pozycja etykietowanego obiektu, jednak aspekt samego etykietowania poruszony został w kolejnym rozdziale.

5. Struktura danych do identyfikacji obiektów

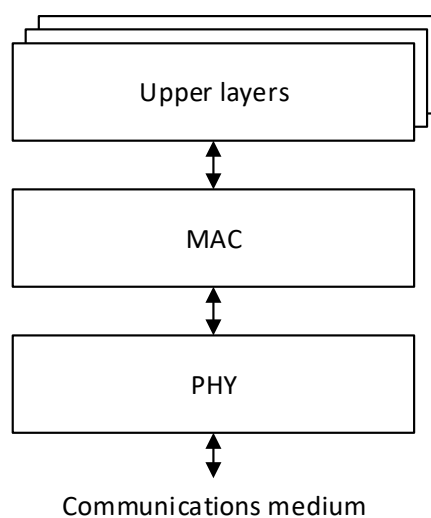
Siłą systemu pozycjonującego UWB jest możliwość równoczesnej identyfikacji i wyznaczania odległości. Umożliwiła ona wykorzystanie UWB jako systemu walidującego lub wspierającego automatyczną identyfikację obiektów znajdujących się w otoczeniu pojazdu. W tym kontekście identyfikacja to porównanie unikalnej (np. id pojazdu) lub powtarzalnej (np. informacja o barierce, słupie, hydrancie) cechy danego obiektu z informacjami na jej temat zawartymi w bazie danych oraz jej lokalizacją. Ponadto system pozwala na przesyłanie dodatkowych parametrów (metadanych związanych np. z obiektami mijanymi przez pojazd) między punktami referencyjnymi będących właśnie takimi cechami umożliwiającymi identyfikację. Można tutaj przedstawić znaczącą różnicę pomiędzy identyfikacją wykorzystywaną w przypadku obecnie wykorzystywanych systemów ADAS, a systemem bazującym na UWB. Przykładem może być technologia LIDAR-owa – w systemie tym identyfikacja obiektu (np. pieszego) może zostać zrealizowana z wykorzystaniem sieci neuronowej operującej na trójwymiarowej chmurze punktów. Należy jednak pamiętać, że rodzaj użytej sieci (np. sieci jednokierunkowe, rekurencyjne, samoorganizujące się mapy), jej parametryzacja, proces uczenia itd. wpływają na otrzymywaną dokładność identyfikacji, która w tak złożonym systemie określa tylko pewne prawdopodobieństwo wykrycia danego obiektu. W przypadku identyfikacji obiektów z wykorzystaniem technologii UWB posiadamy zestaw cech obiektu, który umożliwia poprawne i jednoznaczne dokonanie identyfikacji. W tym celu można posłużyć się na przykład unikalnym identyfikatorem urządzenia, bądź też – jeżeli wymagana identyfikacja odnosi się jedynie do klasy urządzenia – wystarczającym może się okazać zestaw innych cech (wymiary, dodatkowe parametry), który pozwoli jednoznacznie określić klasę obiektu. Pierwowzorem dla takiej koncepcji wykorzystania tagów bazujących na systemie UWB stał się system ETCS (European Train Control System). Mimo różnej technologii wykorzystywanej do transmisji danych, sam system również bazuje na tagach (zlokalizowanych w tzw. Eurobalisach), a jego celem jest zwiększenie bezpieczeństwa i przepustowości ruchu szynowego [93]–[97].

Podczas transmisji danych w systemie UWB należy zwrócić szczególną uwagę na taką konfigurację, która zachowa wystarczającą dokładność wymiarowania. Należy także określić wpływ transmisji dodatkowych danych na częstość i dokładność wymiarowania. Wyznaczenie tego wpływu umożliwiło zaproponowanie scenariuszy wykorzystania poszczególnych sposobów transmisji w zależności od sytuacji w której znajduje się pojazd tak, aby umożliwić poprawną identyfikację i lokalizację obiektów przy zmiennych parametrach zewnętrznych, jak prędkość czy czas dostarczenia informacji o obiekcie. Implementację znakowania infrastruktury drogowej proponuje się przeprowadzić w pracy w sposób dwutorowy. Pierwszym podejściem jest implementacja jedynie niezbędnych informacji służących do identyfikacji obiektów w procesie analizy offline – na rzecz walidacji podsystemów ADAS. Podejście to charakteryzuje się przesłaniem

jedynie unikalnego identyfikatora bazującego np. na EUI-64 [98]. Drugie z podejść zakłada konieczność przetwarzania danych w trybie online. W tym przypadku dodatkowe opóźnienie wynikające z odpytania zewnętrznej bazy danych może w sposób znaczący wydłużyć proces identyfikacji, dlatego też zdecydowano się wykorzystać dwie większe ramki – 32B i 80B, w ramach których przesyłane są dodatkowe informacje o obiekcie i infrastrukturze. Aby to zrobić przeprowadzono analizę elementów infrastruktury drogowej oraz struktury ramki UWB, określono w ten sposób jakie informacje i w jakiej ilości mogą być transmitowane. Następnie przeanalizowano sposoby znakowania obiektów infrastruktury drogowej, na podstawie którego zaproponowane zostały dwie ramki danych i schemat klasyfikacji obiektów, co opisują kolejne podrozdziały.

5.1. Wpływ długości identyfikatora obiektu na pozycjonowanie

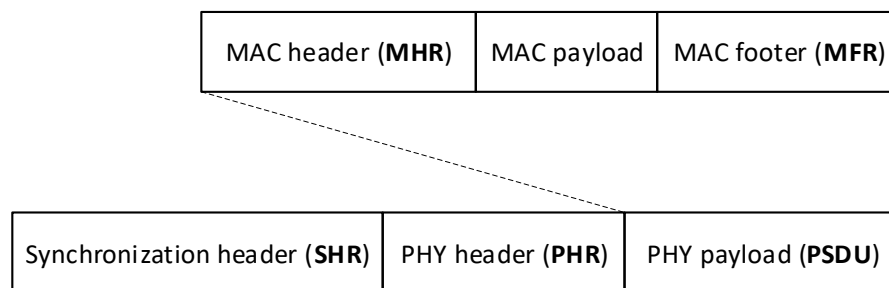
Działanie technologii UWB zostało zawarte w standardzie IEEE 802.15.4, opisującym sieci wykorzystywane w niedrogich urządzeniach niskiej mocy tworzących tzw. WPAN (Wireless Personal Area Network) czyli bezprzewodowe sieci o zasięgu osobistym. Poza systemem bazującym na UWB do tych technologii zaliczamy takie rozwiązania jak Bluetooth, ZigBee, IrDA czy HomeRF. Standard ten w ramach bezprzewodowych sieci osobistych definiuje parametry i funkcje warstwy fizycznej – PHY (physical layer) – i podwarstwy kontroli dostępu do medium – MAC (medium access control). W ramach pracy dokonano analizy komunikacji oraz wskazano miejsca możliwej transmisji danych w procesie wymiarowania wraz z istniejącymi obecnie ograniczeniami. Architektura komunikacji sieciowej jest podzielona na warstwy (jak na rysunku 37). Rozmieszczenie poszczególnych warstw (medium komunikacji, warstwa PHY i podwarstwa MAC) pokazuje enkapsulację zachodzącą w procesie komunikacji omawianego standardu.



Rys. 37. Architektura sieci oparta na warstwach

PHY zarządza radioaparatem nadawczo-odbiorczym (transceiverem), jest odpowiedzialny za wysyłanie i odbieranie pakietów danych protokołu PHY (PPDU – PHY Protocol Data Units) i odbieranie ich z fizycznych nośników (fale radiowe). Podwarstwa MAC jest odpowiedzialna za wysyłanie i odbieranie jednostek danych protokołu MAC (MPDU). Ponadto waliduje ramki, potwierdza dostarczenie ramek, zarządza dostępem do kanałów i umożliwia implementację mechanizmów bezpieczeństwa.

Struktura pakietów danych protokołu PPDU opiera się na trzech głównych polach – nagłówku synchronizacji (SHR), nagłówku PHY (PHR) oraz danych (PSDU). Ogólna struktura przedstawiona jest na rysunku 38. Format nagłówków SHR i PHR zależy od wykorzystanej metody modulacji. W przypadku systemu UWB dla PHY wykorzystywana jest kombinacja modulacji pozycji impulsu (BPM – Burst Position Modulation) oraz binarnego kluczowania fazy (BPSK – Binary Phase-Shift Keying). Preambuła SHR zawiera dwa pola SYNC, które mogą przyjmować długość 31 lub 127 bitów każdy.



Rys. 38. Struktura PPDU

Nagłówek PHR (patrz rysunek 39) składa się z 19 bitów i przesyła informacje, które są wymagane do pomyślnego zdekodowania pakietu. Maksymalny (w oparciu o standard IEEE) rozmiar PSDU to 127 oktetów.

Bit	0-1	2-8	9	10	11-12	13-18
Field	Data rate	Frame length	RP	HE	PD	Check Bits
RP - Ranging Packet HE - Header Extension PD - Preamble Duration						

Rys. 39. Struktura PHR

W ogólnej postaci ramki MAC kolejność pól jest określona, jednak nie każde pole musi znajdować się w ramce - struktura ramki zależy od jej typu. Zarówno nagłówek, jak i ładunek ramki mogą mieć zmienną długość. Jako że format ramki zależy od jej typu, a także od konkretnej implementacji (w zależności od konkretnej aplikacji lub modułu podejmowana jest decyzja o tym, które pola będą używane), w dalszych rozważaniach omówiona zostanie standardowa długość ramki danych używanej w modułach DW1000. Założono również, że w sieci używane są krótkie adresy 16-bitowe (hipotetyczna pojemność sieci wynosi wówczas do 65 536 unikalnych urządzeń na danym obszarze), jednak w przypadku powszechnego zastosowania np. w samochodach może się okazać konieczne rozszerzenie tej wartości np. do 32 bitów (co da ponad 4 miliardy dostępnych adresów).

Przy powyższych założeniach strukturę ramki przedstawiono na rysunku 40 [99].

Octets	2	1	2	2	2	variable	2
Fields	Frame Control	Seq. Number	Dest. PAN Identifier	Dest. Address	Source Address	Ranging Message	FCS
	MHR					MAC Payload	MFR

Rys. 40. Ramka danych MAC używana przez DW1000 (tryb krótkiego adresowania)

Podczas procedury wymiarowania używane są różne typy formatów ramki. Te komunikaty są umieszczane w polu MAC Payload. W tabeli 28 przedstawiono komunikaty, które są wysyłane przez węzły DW1000 podczas procesu określania odległości [100], jak przedstawiono także na schemacie wymiarowania w rozdziale 2.4 „Techniki i pojęcia wykorzystywane w pozycjonowaniu”.

Tab. 28. Komunikaty i ich rozmiar, biorące udział podczas procesu określania odległości przez węzły DWM1001 (radioaparat DW1000)

Ramka Poll					
Oktety	1	115			
Pola	Kod funkcji	Opcjonalne dane użytkownika			
	0x21	-			

Ramka Response				
Oktety	1	1	2	112
Pola	Kod funkcji	Activity	Activity Parameter	Opcjonalne dane użytkownika
	0x10	0x02	-	-

Ramka Final					
Oktety	1	5	5	5	100
Pola	Kod funkcji	Znacznik czasowy wiadomości Poll (TX Time-tamp)	Znacznik czasowy wiadomości Response (RX Time-stamp)	Przewidywany znacznik czasowy wiadomości Final (TX Time-stamp)	Opcjonalne dane użytkownika
	0x29	-	-	-	-

Ramka Report			
Oktety	1	5	110
Pola	Kod funkcji	Wyznaczony ToF	Opcjonalne dane użytkownika
	0x2A	-	-

Tak więc na potrzeby transmisji danych pozostaje różnica będąca wynikiem odejmowania od maksymalnej wielkości PSDU wielkości nagłówka (MHR + MFR) oraz wielkości komunikatu wymiarującego. Dla ramek używanego systemu wartości te zostały przedstawione w tabeli 29.

Tab. 29. Liczba dostępnych bajtów na rzecz dodatkowej transmisji przez użytkownika.

Wiadomość	Wielkość nagłówka (MHR + MFR) [B]	Wielkość wiadomości wymiarującej [B]	Maksymalna wielkość PSDU [B]	Opcjonalne dane użytkownika [B]
Poll	11	1	127	115
Response		4		112
Final		16		100
Report		6		110

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, że ramka UWB pozwala na transmisję danych, której liczba uzależniona jest od rodzaju przyjętych parametrów oraz procesu wymiarowania. W przypadku wymiarowania liczba danych, którą można transmitować jest uzależniona od typu ramki. Najwięcej danych można transmitować w ramce Poll, jest to też pierwsza transmitowana ramka, w związku z czym proponuje się, aby właśnie tą ramkę wykorzystać do transmisji dodatkowych danych. Porównanie czasowe transmitowanych danych zostanie przedstawione w rozdziale 0.

Główna teza pracy zakłada możliwość poprawnej identyfikacji i w tym właśnie celu proponuje się wykorzystać zajmujący 8 bajtów identyfikator zgodny z standardem EUI-64 [98] pozwalający na zaadresowanie do 2^{64} urządzeń (co daje ponad 18 trylionów urządzeń). Równocześnie uwzględniając potencjalne potrzeby wynikające z rozwoju infrastruktury uwzględnione zostały dwie dodatkowe ramki, które umożliwiają transmisję dodatkowych informacji na temat infrastruktury drogowej.

Propozycja wynika z chęci zarówno etykietowania obiektów w celu walidacji algorytmów ADAS (jako proces możliwy do realizacji offline), jak i możliwej komunikacji z bazą danych (proces dostarczający danych do pojazdu online). Proces online, pociąga jednak za sobą niezdeterminowany czas opóźnienia – zależny od dostępności kanału komunikacyjnego i jego przepustowości. Łącząc wiele elementów jak mapy 5D, architekturę sieci, wymiarowanie itp. wymaga jednak zapewnienia niezbędnych informacji związanych np. z bezpieczeństwem na co pozwalają dodatkowe dane transmitowane w większych ramach. Aby oszacować ilość potrzebnego miejsca na dodatkowe dane oraz określić jakie parametry mogą być istotne z punktu widzenia systemu zdecydowano się przeprowadzić także przegląd elementów infrastruktury drogowej który został przedstawiony w rozdziale 5.2.

5.2. Elementy infrastruktury drogowej

Ze względu na świadomość odmiennej specyfiki światowej infrastruktury drogowej, system – zarówno w swojej podstawowej formie dla ramki jedynie identyfikującej, jak i dla ramek rozszerzonych – starano się zaprojektować tak, aby był jak najbardziej uniwersalny, jednak w specyficznych przypadkach koncentruje się on wokół rozwiązań prawnych obejmujących teren Rzeczypospolitej Polskiej (jak na przykład Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie Dz. U. z 2016 r. poz. 124 t.j.). Aby jak najbardziej zunifikować wszystkie zawarte w tym dokumencie odniesienia do infrastruktury, wykorzystano powszechnie używane oznaczenia oraz ich polskie tłumaczenia z OpenStreetMap (OSM). Poniżej przedstawiono elementy infrastruktury drogowej, które są określone na podstawie znaków, mających swą genezę na stronie internetowej OSM i w jej dokumentacji. Elementy opisane poniżej przypisano do trzech podkategorii, a ich przedstawienie ma na celu nakreślenie tego, jak złożonym problemem jest przygotowanie odpowiedniej ramki danych oraz jak wiele elementów może mieć wpływ na decyzję systemów wspomagających (ADAS) podczas wyznaczania trasy oraz nieustannego zapewniania bezpieczeństwa uczestnikom ruchu drogowego. Rolą autora było jednak nie tyle zebranie wszystkich możliwych przypadków, ale zaproponowanie jak najbardziej uniwersalnej ramki dla przypadków najczęściej spotykanych. W związku z powyższym proponuje się następujący podział:

1. Rodzaj szlaku - opisuje rodzaj drogi jej parametry i główne przeznaczenie,
 - droga
 - rodzaj drogi (autostrady, ekspresowe, ruchu przyspieszonego, główne, zbiorcze, lokalne, dojazdowe),
 - występowanie ścieżki (po prawej, po lewej, dodatkowy pas po prawej, dodatkowy pas po lewej, na buspasie, współdzielona),
 - droga serwisowa (aleja, podjazd, parking),
 - ścieżka
 - ruch pieszy i place
 - współdzielenie (dozwolony ruch rowerzystów, dozwolony ruch koni)
 - stopień trudności (chodnik miejski, turystyka, turystyka górską, wymagająca turystyka górską, turystyka wysokogórską, wymagająca turystyka wysokogórską, trudna turystyka wysokogórską),
 - ścieżka rowerowa
 - schody
 - ścieżka niesprecyzowana
 - Szczególne przypadki dojazdu do pól i lasów, droga do autobusów (nie pas dla autobusów), awaryjna droga hamowania, tor wyścigowy, droga o nieznanym klasyfikacji)

2. Dodatkowe parametry dróg - przedstawia dodatkowe informacje o trasie, istotne z punktu widzenia pojazdu autonomicznego,

- jednokierunkowość (tak, nie), prawo-, lewostronność (ruch prawostronny, ruch lewostronny), most (tak, nie), wiadukt (tak, nie), tunel (tak, nie),
- ilość pasów ruchu (zwykłych [liczba]), buspasów [liczba]),
- ograniczenia co do rodzaju pojazdu poruszającego się po drodze
 - co do klasyfikacji (pojazdy samochodowe, pojazdy do 3.5t, ciągniki siodłowe, ciągniki siodłowe z przyczepą, maszyny rolnicze)
 - co do parametru (ze względu na masę, nacisk na oś, ze względu na rozmiar [długość, szerokość, wysokość]),
- skrzyżowania
 - ze względu na kształt (X, T, Y, rondo),
 - ze względu na pierwszeństwo przejazdu (bezkolizyjne, równorzędne, nierównorzędne, o ruchu kierowanym [z sygnalizacją świetlną, przez osobę wyznaczoną]),
- ograniczenia skrętu,
- bród/przeprawa przez rzekę wymagająca częściowego zanurzenia pojazdu,
- droga okresowa (funkcjonuje głównie w czasie zimy, funkcjonuje głównie w czasie lata, okres przejezdności [daty]),
- przejścia dla pieszych,
- Utrudnienia, obiekty spowalniające i uspokajające ruch na obszarach miejskich (próg zwalniający, garb, poduszka, pinezka, próg wyspowy, inne),
- bariery, szlabany,
- nawierzchnia
 - typ (utwardzony, nieutwardzony [o jakości od 1 do 5]),
 - rodzaj (asfalt, beton, kostka brukowa, kostka, brukowiec, metal, drewno, zagęszczony, drobny żwir, żwir, kamień żwirowy, układana trawa, trawa, brud, ziemia, błoto, piasek),
- nawierzchnia o specjalnej fakturze, pomocna dla osób niewidomych,
- szerokość,
- występowanie i rodzaj oświetlenia,
- liczba pasów ruchu wraz z atrybutami,
- najbliższe otoczenie.
 - parkowanie wzdłuż jezdni (równoległe, po przekątnej, prostopadłe, zgodnie z oznaczeniami, zakaz parkowania, zakaz zatrzymywania, droga pożarowa),
 - chodniki
 - drogi rowerowe

3. Obiekty na obszarze - oprócz ścieżki pojawiają się również informacje o elementach infrastruktury istotnych dla samochodów autonomicznych i pojazdów poruszających się po obszarze inteligentnych miast przyszłości.

- strefa zamieszkania,
- skrzyżowania, infrastruktura autobusowa, Infrastruktura tramwajowa,
- barierki (z wyszczególnieniem rodzajów), lampy, iluminacje uliczne,
- parkowanie (podział ze względu na miejsce, sposób zatrzymania się pojazdu, obostrzenia w czasie np. dzień tygodnia, parzyste, nieparzyste i rodzaju pojazdu który może się zatrzymać np. parking tylko dla samochodów osobowych, autobusów, tirów, opłaty i dostępność np. płatny, bezpłatny, miejsca dla inwalidów, mieszkańców itp.),
- charakterystyka obszaru (mieszkalny, przemysłowy, rolniczy, las, zbiornik wodny itp.)

Przykładowo, na rysunku 41 przedstawiono i opisano poszczególne elementy infrastruktury znajdujące się tylko na niewielkim wycinku przestrzeni w okolicy kampusu Politechniki Śląskiej w Gliwicach.



Rys. 41. Przykład opisu elementów znajdujących się na OSM (i) typ wejście do obiektu parametr główne, (ii) typ bariera parametr szlaban, (iii) typ ratownictwo parametr hydrant ogniowy; szczegółowe parametry: średnica, umiejscowienie, typ, (iv) typ udogodnienia parametr fontanna, (v) typ udogodnienia; parametr ławka; dodatkowe parametry: oparcia, kolor, materiał, liczba miejsc, (vi) typ środowisko naturalne; parametr drzewo, (vii) typ udogodnienia; parametr: wypożyczalnia rowerów; dodatkowe parametry: pojemność, nazwa, sieć, operator, (viii) typ drogi parametr przejście dla pieszych.

Przedstawione powyżej elementy infrastruktury wskazują na mnogość kategorii, które występują w tworzonych mapach. Z perspektywy systemu etykietowania ważne pozostają elementy występujące na drodze lub w jej bezpośrednim otoczeniu. Niemniej jednak w perspektywie dalszych prac należałoby włączać również te, które niosą dodatkowe informacje o otoczeniu, a nie tylko te, które wykorzystuje się do

etykietowania na potrzeby walidacji systemów ADAS. Informacje te mimo że są liczne mają jedynie wpływ na ramkę którą proponuje się wykorzystywać w systemie pracującym w trybie online. Na potrzeby etykietowania obiektów, ogromna liczba etykiet jaką można zawrzeć w proponowanym rozwiązaniu zdaje się wystarczająca w kontekście obecnych potrzeb. Ponadto należy pamiętać, że transmisja dodatkowych danych ma wpływ na długość ramki, a więc i czas transmisji.

5.3. Etykietowanie obiektów infrastruktury - ramka danych

Proces etykietowania obiektów pociąga za sobą konieczność utworzenia uniwersalnej struktury danych, która będzie umożliwiała prawidłową identyfikację obiektów infrastruktury drogowej. Wprowadzenie dodatkowych danych do komunikacji pomiędzy poszczególnymi elementami systemu pozycjonującego UWB stanowi zagrożenie związane z wydłużeniem czasu przelotu sygnału, w tym czasu potrzebnego na przetworzenie danych w urządzeniu odpytywanym. Pociąga to za sobą konieczność skonstruowania ramki danych, która będzie gwarantowała zarówno podstawowe informacje umożliwiające identyfikację, jak i dodatkowe dane niezbędne w procesie etykietowania [101].

Na podstawie informacji o dostępnej przestrzeni na dane w ramce UWB oraz zgromadzonych informacjach o elementach infrastruktury drogowej, zaproponowano trzy warianty ramek dla systemu UWB oraz ich strukturę umożliwiającą transmisję etykiet obiektów znajdujących się w bezpośrednim otoczeniu pojazdu i/lub dodatkowych danych. Przyjęto, że dla systemu działającego offline (etykietowanie na rzecz walidacji ADAS będące głównym przedmiotem pracy) najlepszym rozwiązaniem jest ramka poszerzona jedynie o unikalny identyfikator (najmniejsza). Informacja o odległości, jest traktowana priorytetowo i występuje w każdym typie transmisji. Na tym etapie dokonano również założeń związanych z tym jakie informacje niezbędne są na rzecz etykietowania i bezpieczeństwa (podstawowa ramka do trybu online), a jakie można traktować z niższym priorytetem (ramka rozszerzona transmitowana online jedynie na żądanie). W związku z powyższym proponuje się transmisję ramek jak na rysunku 42, gdzie kolorem zielonym oznaczone zostały dodatkowe dane na identyfikator, oraz dwa dodatkowe pakiety danych 32B i 80B).

Ramki danych z danymi wymiarującymi				
Poll	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [1B]	Dane opcjonalne [115B]	
Response	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [4B]	Dane opcjonalne [112B]	
Final	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [16B]	Dane opcjonalne [100B]	
Report	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [6B]	Dane opcjonalne [110B]	
Proponowane ramki na rzecz etykietowania				
Minimalna	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [1B]	Etykieta 8B	Dane opcjonalne [107B]
Podstawowa	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [1B]	Etykieta 32B	Dane opcjonalne [83B]
Rozszerzona	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [1B]	Etykieta 80B	Dane opcjonalne [35B]

Rys. 42. Proponowane ramki z dodatkowymi danymi oznaczonymi kolorem zielonym.

Zakład się, że podstawową formą komunikacji jest ramka zawierająca informacje o odległości oraz podstawowe informacje identyfikujące (etykietę), urządzenie końcowe może jednak próbować odpytać infrastrukturę o dane szczegółowe, a także – może kontynuować transmisję jedynie przesyłając informację o pozycji. Przykładem żądania szczegółowego może być sytuacja, w której system nadrzędny wymaga bardziej szczegółowych informacji o obiekcie trzecim (np. aby doprecyzować etykietę) lub też ma więcej czasu na wykonanie transmisji danych (np. samochód zatrzymujący się na skrzyżowaniu na czerwonym świetle).

System pracujący w trybie online powinien cechować się możliwością określenia pozycji obiektu etykietowanego oraz jego identyfikacji, przy jednoczesnym określeniu ewentualnych zagrożeń oraz możliwej transmisji danych opcjonalnych. Założono więc, że podstawowa ramka danych dla systemu online zawiera:

- Kluczowe informacje:
 - Wymiarowanie – informacja o odległościach (które pozwalają na określenie kąta i odległości lub pozycji).
 - Główny identyfikator obiektu – bazujący na EUI-64.
 - Pozycja GPS obiektu – informacja która jest istotna przy umieszczaniu obiektu na lokalnej mapie referencyjnej pojazdu.
- Informacje dodatkowe, które mogą zostać dostosowane do potrzeb systemu. W ramach propozycji przedstawiono te, które są istotne z punktu działania systemu online:
 - Cechy obiektu (np. gabaryty fizyczne) – istotą tego parametru jest chęć zapewnienia jak najdokładniejszej informacji umożliwiającej zobrazowanie obiektu podczas procesu walidacji.
 - Informacje o właściwościach obiektu, które stanowią potencjalne zagrożenie (np. informacja o osobach i/lub przedmiotach, które mogą znajdować się na danym obszarze, urządzeniach elektrycznych, gazie itp.).

Informacje o cechach obiektu, które stanowią potencjalne zagrożenie, zostały określone w systemie opartym na dokumentach Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ (EKG ONZ) - Rady Ekonomiczno-Społecznej ONZ [102]. Ponadto proponuje się, aby zamieścić informacje o zagrożeniach, jakie może spowodować obecność ludzi (np. w przypadku kiedy system umieszczony zostanie na przystanku autobusowym czy stacji paliw). Informacje te istotne z punktu systemu działającego w czasie rzeczywistym, mogą posłużyć np. do dostosowania właściwej prędkości do bieżących zagrożeń.

Zgodnie z przeprowadzoną analizą przygotowano ramkę UWB, którą można wykorzystać do podstawowego znakowania i identyfikacji elementów infrastruktury drogowej, co przedstawiono w tabeli 30.

Tab. 30. Propozycja ramki UWB do celów znakowania infrastruktury drogowej w trybie online.

Typ informacji	Proponowana ilość danych	
<i>Informacje kluczowe</i>		
Wersja ramki	<i>Kod</i>	<i>4 bity</i>
Adres urzędnika	<i>Na podstawie standardu EUI-64 [98]</i>	<i>8 bajtów</i>
Pozycja GPS	<i>Szerokość geograficzna</i>	<i>26 bitów</i>
	<i>Informacja N S</i>	<i>1 bit</i>
	<i>Długość geograficzna</i>	<i>27 bitów</i>
	<i>Informacja W E</i>	<i>1 bit</i>
Informacje proponowane (lub miejsce na dane użytkownika)		
Cechy (np. rozmiar)	<i>Szerokość, Długość, Wysokość</i>	<i>30 bitów</i>
Pozycja anteny	<i>Szerokość, Długość, Wysokość, znaki</i>	<i>30 bitów</i>
Niebezpieczeństwo	<i>Kod</i>	<i>3 bajty</i>
Łącznie		<i>32 bajtów</i>

W tabeli zarezerwowano następujące wielkości na poszczególne dane:

- Wersja ramki (wymagane) – 4 bity pozwalają zmieścić do 16 informacji. Założono, że w obecnej wersji jest to wartość wystarczająca, zważywszy na brak konieczności ciągłego iterowania wersji ramki.
- Adres urzędnika (wymagane) – rozmiar 8 bajtów zdefiniowany jest przez standard na którym zdecydowano się bazować.
- Pozycja GPS (wymagane) – dla szerokości i długości geograficznej zarezerwowano odpowiednio 26 bitów (pozwalających na zakodowanie 90.XXXXXX) oraz 27 bity (pozwalające na zakodowanie 180.XXXXXX). Daje to możliwość zakodowania standardowo przyjętych sześć znaków mantysy oraz niezbędnego wykładnika dla zadanych własności geograficznych. Ponadto przewidziano po jednym znaku na zakodowanie informacji Północ (1) – Południe (0), oraz Wschód (1) – Zachód (0).
- Rozmiar (opcjonalne) – założono przestrzeń 10 bitów, która pozwala na zakodowanie wartości do 1023.
- Pozycja anteny (opcjonalne) – wskazuje na umiejscowienie znacznika względem środka obiektu. Przy znanej pozycji GPS pozwala to na szacunkowe przedstawienie obiektu na mapie pojazdu.
- Niebezpieczeństwo (opcjonalne) – to miejsce na 3 bajty reprezentujące informację o zagrożeniu których struktura wynika wprost w przywołanego wcześniej dokumentu ONZ.

Trzecia ramka danych, będąca propozycją znakowania w szerszej perspektywie czasowej, zawiera informacje, które zostaną pozyskane ze znacznika tylko wtedy, gdy istnieje czasowa możliwość na wykonanie dodatkowej transmisji. Zakłada się, że ramka ta będzie miała zastosowanie tylko podczas wymiarowania online, ponieważ przekazuje informacje istotne dopiero w trakcie jazdy. Na podstawie informacji uzyskanych podczas przeglądu elementów infrastruktury drogowej proponuje się dokonać podziału na trzy podkategorie:

- ścieżka i jej parametry – zawiera informacje o rodzaju ścieżki, parametrach, rodzaju i liczbie pasów ruchu, ograniczeniach dotyczących dopuszczalnego typu pojazdu, towarów niebezpiecznych, parametrów pojazdów np.;
- informacje o skrzyżowaniach i znakach – jest to sekcja przeznaczona dla informacji o obiektach infrastruktury mających wpływ na bieżący ruch: znakach, światłach, elementach tłumiących, szlabanach, ale także o układzie skrzyżowań;
- informacje o infrastrukturze i budynkach w sąsiedztwie drogi – zawiera szeroko rozumiane POI (Point Of Interest) takie jak przystanki, parkingi, latarnie, bramy, barierki, infrastruktura gazowa czy elektryczna, ale też mosty czy tunele.

W ramach zaprojektowanej ramki powstało również miejsce, które będzie można wykorzystać w przyszłych wersjach proponowanego rozwiązania. Propozycję drugiej ramki, która będzie zawierała rozszerzony zestaw informacji, przedstawiono w tabeli Tab. 31.

Tab. 31. Propozycja rozszerzonej ramki UWB do celów tagowania infrastruktury drogowej.

<i>Typ informacji</i>		<i>Proponowana wielkość danych</i>
<i>Wersja ramki</i>	Kod	4 bity
<i>Adres urzędnika</i>	Na podstawie standardu EUI-64	8 bajtów
	<i>Ścieżka i jej parametry</i>	6 bajtów
	<i>Skrzyżowania i znaki</i>	13 bajtów
<i>Infrastruktura</i>	Liczba obiektów	4 bity
	Właściwości obiektów (max 16x3 bajty, ale też np. 8x6 bajtów np.)	16 * 3 bajty
	<i>Dodatkowe informacje</i>	4 bajty
<i>Łącznie</i>		80 bajtów

5.4. Analiza czasów transmisji danych

Długość ramki wpływa zarówno na czas wymagany do umieszczenia jej w buforze nadawczym jak i do jej przesłania. W związku z czym dokonano analizy czasu transmisji danych dla ramek bazowych oraz dla ramki Poll poszerzonej o dodatkowe dane, zgodnie z propozycją w podrozdziale 5.3.

Do badań wykorzystane zostały moduły DWM1001, a poszczególne serie realizowane były przy zachowaniu odległości 1 metra między modułami. Jako całkowity czas transmisji ramki – t_{fdt} przyjęto czas, przez jaki ramka jest umieszczana w buforze nadawczym – t_{fb} oraz czas wymagany do pomyślnego wystąpienia pełnej ramki (czas wymagany do opuszczenia węzła przez pełną ramkę) – t_{ftx} (55).

$$t_{fdt} = t_{fb} + t_{ftx} \quad (55)$$

Badania prowadzone były przy następującej konfiguracji:

- szybkość transmisji – 110 kbps,
- częstotliwość powtarzania impulsów (PRF) – 64 MHz,
- rozmiar preambuły – 1 024 symbole,
- numer kanału – 2.

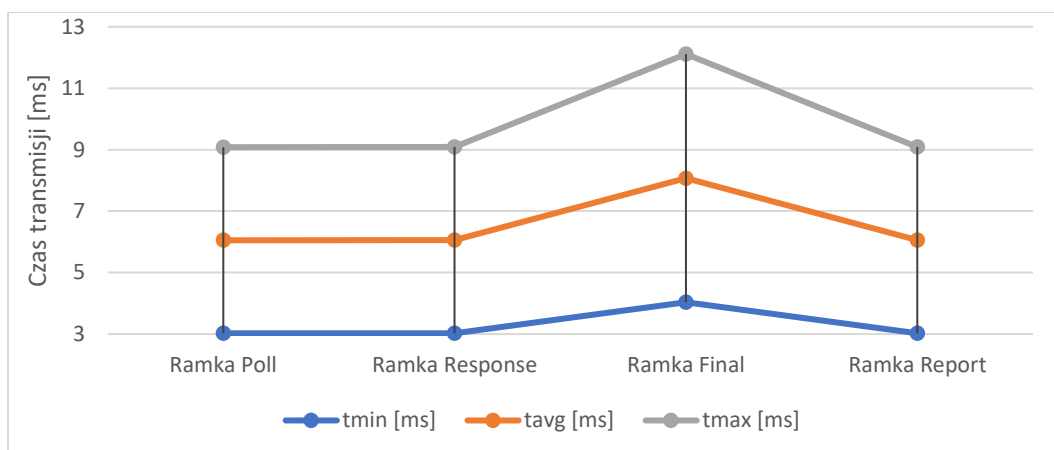
W trakcie pomiarów dla ramek domyślnych (Poll, Response, Report i Final) dokonano transmisji jedynie minimalnej ilości danych wymaganych do wymiarowania (jak na rysunku 42, natomiast bez danych opcjonalnych), co stanowi wartość referencyjną wpływu transmisji dodatkowych danych. W ramach prowadzonego badania pominięto przetwarzanie danych, które nie jest bezpośrednio zależne od modułu UWB (np. obliczanie odległości, komunikacja przez różne interfejsy). Efektem są czasy przedstawione w tabeli 32.

Tab. 32. Czas potrzebny na przeprowadzenie transmisji ramki danych pomiędzy węzłami w sieci UWB.

Wielkość ramki [B]	$t_{fdt_{min}}$ [ms]	$t_{fdt_{avg}}$ [ms]	$t_{fdt_{max}}$ [ms]	Opis
12	3,025	3,027	3,030	Ramka Poll
15	3,027	3,029	3,032	Ramka Response
27	4,035	4,037	4,040	Ramka Final
17	3,029	3,031	3,033	Ramka Report

Z przeprowadzonego eksperymentu wynika, że najszybciej przebiega transmisja ramki Poll – jest to najmniejsza ramka, a jej czas wyniósł średnio 3,027 ms. Najwięcej czasu, bo średnio 4,037 ms zajęła transmisja ramki Final. Różnica w stosunku

minimalnego czasu transmisji, a średniego wynosi 0,002 ms dla wszystkich typów ramki, natomiast do czasu najwyższego jest to 0,002 – 0,003 ms w zależności od typu transmisji. Wartości zostały również przedstawione w postaci wykresu skumulowanego (lepsza prezentacja danych – rysunek 43) na którym można zauważyć wyraźną różnicę w czasie transmisji ramki Final.



Rys. 43. Eksperymentalnie wyznaczony czas potrzebny na przeprowadzenie transmisji ramki danych pomiędzy węzłami w sieci UWB

Następnie wyznaczono czas, jaki jest potrzebny na transmisję ramki zawierającej dodatkowe dane odpowiadające proponowanym w rozprawie ramkom danych (dla transmisji danych minimalnych, podstawowe i rozszerzonej ramki informacyjnej oraz maksymalnej liczby danych – odpowiednio wielkości 20, 32, 80 i 115B). Badanie zostało zrealizowane w sposób analogiczny jak dla ramek standardowych, a dodatkowe dane zostały umieszczone w ramce Poll, zgodnie z wcześniejszą propozycją. Otrzymane rezultaty zostały zebrane w tabeli 33.

Tab. 33. Czasy transmisji danych dla ramki Poll poszerzonej o dodatkowe dane

Rozmiar pełnej ramki MAC [B]	$t_{fdt_{min}}$ [ms]	$t_{fdt_{avg}}$ [ms]	$t_{fdt_{max}}$ [ms]	Wielkość ramki Poll z danymi użytkownika [B]
20	3,828	3,830	3,833	8
44	6,041	6,043	6,050	32
92	9,085	9,086	9,087	80
127	12,111	12,112	12,120	115

Wyznaczone czasy wskazują, że dla ramki Poll powiększonej o 8B (ramki minimalnej do identyfikacji offline) czas transmisji wynosi nieco ponad 3.8ms. Dla Poll powiększonej o 32 B (dla danych identyfikacyjnych proponowanej krótkiej ramki) czas

transmisji wynosi nieco ponad 6 ms. Wartość ta zwiększa się do 9,086 ms w przypadku transmisji drugiej z proponowanych ramek do celów identyfikacji online. Dla długiej ramki czas ten wynosi 12,112 ms i jest dwukrotnie dłuższy niż w przypadku najkrótszej z ramek w wersji online. Badanie wykazało, że wolne miejsce w ramce można wykorzystać do przesyłania różnych typów danych między węzłami sieci. Dane te pozwalają przyporządkować unikatowy identyfikator do obiektu.

Należy jednak zauważyć, że długość wysyłanych informacji, a także typ ramki wymiarującej wpływają na czas wymagany do wymiany komunikatów podczas procesu określania odległości. Wraz ze wzrostem rozmiaru przesyłanych danych zmniejsza się częstotliwość otrzymywania informacji, a także wzrasta opóźnienie tej informacji, co zostanie przedstawione w kolejnym rozdziale.

5.5. Wpływ rodzaju transmisji, prędkości i liczby węzłów na opóźnienie

Wraz z zmianą wielkości ramki wzrasta również czas potrzebny na transmisję. Podczas wymiarowania obiektu będącego w ruchu czas ten wpływa bezpośrednio na przesunięcie informacji o etykiecie. Ponadto w prezentowanym modelu komunikacji każda transmisja rezerwuje dany węzeł na czas transmisji na wyłączność. W związku z tym istotna jest liczba węzłów w sieci, szczególnie tych umieszczonych na pojeździe, które zostaną użyte do określenia pozycji. Należy również określić, wpływ dołączania kolejnych węzłów systemu UWB na częstość pozyskiwania danych, co ma istotny wpływ na wymiarowanie. Dlatego też zdecydowano się na przeprowadzenie symulacji wpływu rozmiaru pakietu danych na odległość, jaką pokona uczestnik ruchu drogowego przy zadanej prędkości. W tym celu uwzględniono czasy wymiarowania dla pełnej komunikacji (Poll, Response, Final i Report) przy ramce podstawowej oraz dla zaproponowanych wariantów identyfikacyjno-informacyjnych.

Na ich podstawie zostały wyznaczone odległości (wzór (56)) jakie pokona obiekt poruszający się zadaną prędkością.

$$\Delta s = v * \sum_{x \in S} t_{ftd_{avg}}(x) \quad (56)$$

$$S = \{Poll, Response, Final, Report\}$$

W celu przedstawienia referencyjnych wartości odległości pokonanej przy zadanych parametrach transmisji zebrano także informacje o prędkościach poruszania się poszczególnych uczestników ruchu drogowego [103]–[105], które zebrano w tabeli 34.

Tab. 34. Prędkości poruszania się etykietowanych obiektów w środowisku miejskim

Obiekt	Prędkość [km/h]	Prędkość [m/s]
Pieszy (ID_1)	4,8	1,3
Rowerzysta amator (ID_2)	15,6	4,3
Rower/UTO – prędkość dopuszczalna prawnie (ID_3)	25	6,9
Samochód na drodze osiedlowej (duże natężenie ruchu) (ID_4)	18,1	5,0
Samochód na drodze osiedlowej (małe natężenie ruchu) (ID_5)	22,8	6,3
Samochód w ruchu miejskim (duże natężenie ruchu) (ID_6)	35,6	9,9
Samochód w ruchu miejskim (małe natężenie ruchu) (ID_7)	49,2	13,7
Samochód ważniejsze arterie i obwodnice miast (ID_8)	70	19,4
Samochód poza obszarem zabudowanym (ID_9)	90	25,0
Samochód droga ekspresowa (ID_10)	120	33,3

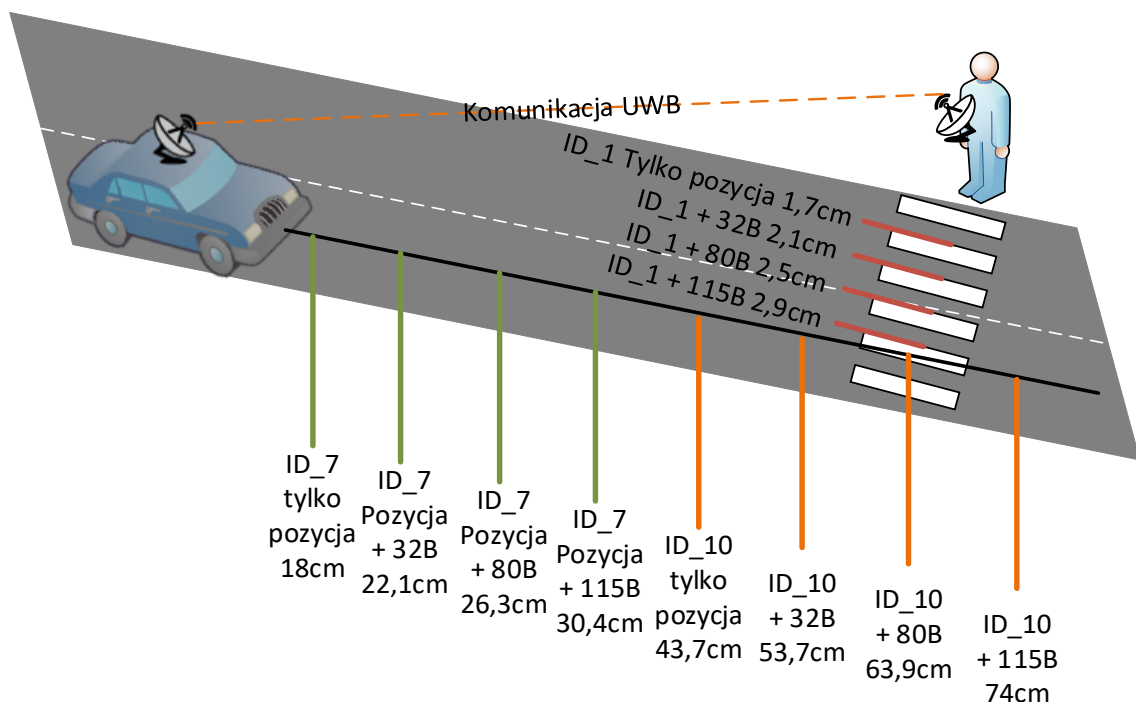
Na podstawie znanych prędkości oraz czasu trwania transmisji wyznaczono, jakie jest bazowe przemieszczenie [cm] obiektu, wynikające z transmisji danych zgodnie z opisaną wcześniej metodologią. Wyniki przedstawiono w tabeli 35, a wybrane z nich na schemacie widocznym na rysunku 44.

Tab. 35. Przemieszczenie etykietowanego obiektu [cm] dla trzech wariantów ramek.

Obiekt	Ramki komunikacji				Transmisja z danymi				
	Poll	Response	Final	Report	Tylko pozycja	Pozycja + 8B	Pozycja + 32B	Pozycja + 80B	Pozycja + 115B
	3,027	3,029	4,037	3,031	13,124	13,927	16,140	19,183	22,209
ID_1	0,4	0,4	0,5	0,4	1,7	1,8	2,1	2,5	2,9
ID_2	1,3	1,3	1,7	1,3	5,6	6,0	6,9	8,2	9,5
ID_3	2,1	2,1	2,8	2,1	9,1	9,6	11,1	13,2	15,3
ID_4	1,5	1,5	2,0	1,5	6,6	7,0	8,1	9,6	11,1
ID_5	1,9	1,9	2,5	1,9	8,3	8,8	10,2	12,1	14,0
ID_6	3,0	3,0	4,0	3,0	13,0	13,8	16,0	19,0	22,0
ID_7	4,1	4,1	5,5	4,2	18,0	19,1	22,1	26,3	30,4
ID_8	5,9	5,9	7,8	5,9	25,5	27,0	31,3	37,2	43,1
ID_9	7,6	7,6	10,1	7,6	32,8	34,8	40,4	48,0	55,5
ID_10	10,1	10,1	13,4	10,1	43,7	46,4	53,7	63,9	74,0

Z tabeli wynika, że w przypadku transmisji wyłącznie identyfikatora na potrzeby walidacji algorytmów w trybie offline (ramka 8B), przesunięcie wynikające

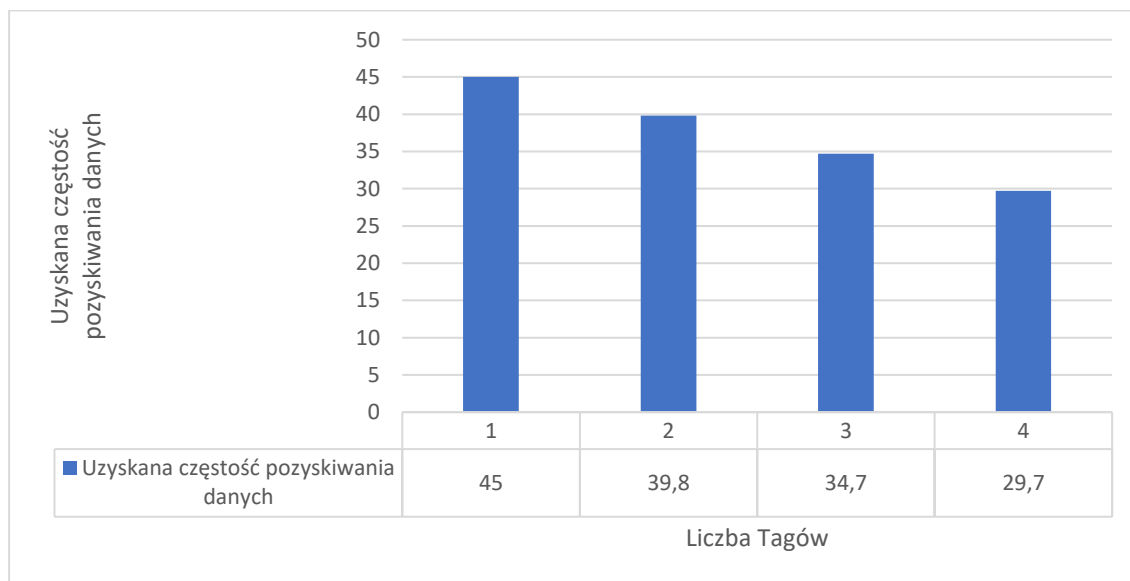
z dodatkowych danych nieznacznie tylko wpływa na otrzymywaną informację. Przykładowo, dla prędkości oznaczonej jako ID_1 jest to 1 mm różnicy, dla ID_6 to niespełna 1 cm, natomiast dla najwyższej analizowanej prędkości różnica wyniosła 2,7cm. Podobnie ma się sytuacja w przypadku transmisji ramki danych dla systemu pracującego w trybie online przy małych prędkości odpowiadających np. truchtowi, ruchowi pojazdu na parkingu czy wolnej jeździe na rowerze. Przemieszczenie wynikające z założonej prędkości Δs wynosi wówczas poniżej 10 cm. Przemieszczenie jest porównywalne z błędem, który wynika z odchylenia standardowego informacji o odległości między punktami referencyjnymi zebranych w sposób statyczny [106]. Sugeruje to preferencyjne korzystanie z transmisji dodatkowych danych (ponad te niezbędne do identyfikacji) tylko w tej fazie ruchu (powolny ruch, postój na światłach np.). Umożliwia to także przygotowanie szczegółowych map na rzecz etykietowania obiektów podczas ruchu z ograniczoną w taki sposób prędkością na torach testowych. Inaczej należy patrzeć na transmisję danych i Δs kiedy pojazd porusza się z prędkością 90 czy 120 km/h. W tym przypadku różnica pomiędzy odległością jaką pokona pojazd podczas transmisji wyłącznie informacji o pozycji, a informacji o pozycji wzbogaconej o dodatkowe dane wzrasta do ponad 30 cm. Istotnym aspektem dla algorytmów ADAS jest fakt, że przy dla tak zagregowanego przesunięcia należy przeprowadzić adaptacyjną synchronizację danych odpowiadającą przesunięciu w tabeli. Na rysunku 44 przedstawiono schematycznie trzy warianty – dla ruchu z prędkością pieszego (ID_1), oraz dla pojazdu przy prędkości odpowiadającej ruchowi miejskiemu z małym natężeniem ruchu (ID_7) oraz dla prędkości drogi ekspresowej (ID_10).



Rys. 44. Schemat przemieszczenia etykietowanych obiektów w zależności od transmitowanych danych w trybie online

Z schematu wynika, że etykietowanie obiektów na potrzeby walidacji algorytmów ADAS w trybie online jest możliwe szczególnie w środowisku miejskim, gdzie przesunięcie pozycji wynikające z samego etykietowania jest relatywnie niskie, możliwe do wyznaczenia i ewentualnej korekty na podstawie znanych odczytów z odometrii pojazdu. Dysponując jednak znanym przesunięciem czasowym, możliwe jest także zastosowanie etykiet zebranych przy większych prędkościach, jednak ich pozycje muszą zostać odpowiednio skorygowane na etapie uczenia algorytmów.

Na podstawie przedstawionej analizy można wskazać, że za pomocą systemu UWB, a w zasadzie protokołu komunikacyjnego bazującego na technologii UWB, możliwe jest przesyłanie identyfikatora obiektu, jednak należy mieć na względzie okoliczności w jakich ten proces ma miejsce. W przypadku dużych prędkości, korzystniejsze jest zrezygnowanie z transmisji informacji o otoczeniu (szczególnie w ich rozszerzonej formie) i przejście np. na wymiarowanie 1D lub 2D, ponieważ skróci to czas pozyskania informacji o pozycji. Pozytywnie wpłynie to na czas otrzymania informacji o pozycji obiektu oraz zminimalizowanie błędu jaki jest związany z przemieszczeniem się pojazdu. Obrazują to badania nad częstością pozyskiwania danych dla systemu bazującego na modułach DWM3000 przy różnej liczbie węzłów w sieci, których rezultaty zostały przedstawione na rysunku 45.



Rys. 45. Częstość pozyskiwania danych z systemu w konfiguracji 4 – N w zależności od liczby wymiarowanych obiektów.

Badania wykazały, że przy modelu czterech kotwic i jednego znacznika system pracuje z częstością czterdziestu pięciu ramek na sekundę. Dodawanie kolejnych znaczników do systemu 4-4 (znaczniki – kotwice) powoduje spadek częstości pozyskiwania informacji. Prowadzi to do wniosku, że system bazujący na jednej kotwicy może informować o odległości do oznakowanego obiektu oraz dokonywać jego identyfikacji z częstością 45 odczytów na sekundę. Jeżeli 4 pojazdy wymiarują na tym

samym obszarze równocześnie dwa obiekty, to możliwe jest wyznaczanie do 40 razy na sekundę informacji o odległości i kącie do najbliższych czterech przeszkód. Jeżeli są to trzy lub więcej obiektów, częstość pozycjonowania wyniesie do 35 odczytów na sekundę, przy jednoczesnej identyfikacji tych obiektów. Warto zauważyć, że wraz ze wzrostem liczby kotwic na jednym pojeździe, rośnie również dokładność – jednak jak wynika z przeprowadzonego eksperymentu, system będzie pozyskiwał dane z niższą częstością. W gęsto zabudowanej infrastrukturze z dużą liczbą znaczników i pojazdów odpowiedzią na ten problem może być wykorzystanie innego modelu transmisji np. broadcastu, co wymusza jednak inną charakterystykę pracy systemu.

W sytuacji, kiedy uczestnik ruchu drogowego porusza się z mniejszą prędkością, system będzie mógł sam ograniczyć częstość pozyskiwania informacji o otoczeniu i przeprowadzać wyłącznie wymiarowanie. Jednak przy małych prędkościach różnica pomiędzy informacją wyłącznie o pozycji a największą możliwą ramką danych wpływa na zwiększenie błędu nieznacznie – o około 6,2cm, co pozwala na swobodną transmisję nawet szczegółowych informacji zarówno na potrzeby etykietowania elementów infrastruktury (na rzecz rozwoju algorytmów ADAS), ale także dodatkowych informacji pozwalających na lepsze rozpoznanie otoczenia pojazdu w przypadku przetwarzania danych w wariancie online.

Zaproponowane ramki danych oraz badania związane z ich transmisją miały odzwierciedlać sytuacje występujące w środowisku miejskim. Celem było wskazanie możliwości manipulacji parametrem związanym z wielkością transmitowanych danych na czas transmisji, czego bezpośrednią konsekwencją jest dystans o jaki przemieści się wymiarowany obiekt będący w ruchu. Zastosowanie technologii UWB na potrzeby znakowania elementów jest możliwe, szczególnie w ramach koncepcji inteligentnego miasta przyszłości [107]. Możliwe są zatem rozwiązania, w których ręczne znakowanie elementów infrastruktury w procesie uczenia algorytmów ADAS zastąpione zostaje z wykorzystaniem znaczników w technologii UWB, ponieważ spełniona jest potrzeba zarówno komunikacji danych jak i dokładności pozycjonowania. Oprócz informacji o pozycji należy także zwrócić uwagę na to, że każde urządzenie transmitujące dane w tym wariancie komunikacji jest zarezerwowane (w trakcie transmisji) na wyłączność tj. komunikuje się tylko z jednym węzłem umieszczonym np. na pojeździe. Ograniczenie ilości przesyłanych danych, zwłaszcza w obszarach o dużym natężeniu ruchu i zagęszczeniu użytkowników systemu, pozwoliłoby na zmniejszenie opóźnienia wynikającego z zajętości pasma komunikacji, co pozytywnie wpłynęłoby na komunikację między większą liczbą użytkowników dróg. Podczas prowadzonych na Uczelni badań dla modelu SS-TWR system UWB podczas komunikacji punkt–punkt wykazywał możliwą częstotliwość pozyskiwania informacji o pozycji powyżej 400Hz, co pozytywnie mogłoby wpłynąć np. na broadcast informacji o identyfikatorze, jednak sposób wymiarowania negatywnie wpływa na dokładność pozyskiwanych informacji o wymiarowaniu.

Podsumowując proponuje się następujące zastosowanie wymiarowania wraz z etykietowaniem (tabela 36) dla 3 alternatywnych struktur ramki danych. Równocześnie można stwierdzić, że nawet w najdłuższym z proponowanych scenariuszy łączny czas wymiany wszystkich pakietów danych trwa 22 ms, co przy założeniu dwukrotnego narzutu na ten czas związanego z obróbką danych i przesłaniem do systemu nadrzędnego daje czas poniżej 50 ms. Jest to czas kluczowy z punktu widzenia systemów czasu rzeczywistego, przyjętych praktyk inżynierskich i obecnie dostępnych na rynku systemów [108], [109].

Tab. 36. Proponowane zasady stosowania równoczesnego wymiarowania wraz z transmisją danych

Wariant	Proponowane scenariusze
Transmisja wyłączenie danych wymiarujących	Zaleca się wykorzystywać jedynie w przypadkach, kiedy częstość pozyskiwania danych ma kluczowe znaczenie lub zmienność otoczenia nie następuje (np. ruch z bardzo wysoką prędkością lub manewr parkowania, gdzie znane jest otoczenie, a niezbędne jest częste wymiarowanie).
Transmisja danych wymiarujących i etykiety [8B]	Zaleca się wykorzystywać podczas prac rozwojowych nad systemami ADAS (w trybie offline kiedy dane o obiektach można powiązać a posteriori, lub jeżeli pojazd porusza się po stałej trasie i posiada łączność z siecią, gdzie informacje powiązane z identyfikatorami obiektów są na stałe przechowywane i na bieżąco aktualizowane z zewnętrznej bazy danych z wykorzystaniem szerokopasmowego łącza (np. 5G).
Transmisja danych wymiarujących i małej ramki [32B]	Zaleca się wykorzystywać podczas standardowego ruchu pojazdu w trybie online, gdzie nie mamy możliwości pobrania danych w akceptowalnym czasie z zewnętrznej bazy danych, a chcemy korzystać z możliwości identyfikacji obiektów i potencjalnego zagrożenia. Możliwość wykorzystania zarówno w ruchu miejskim, jak i przy większych prędkościach.
Transmisja danych wymiarujących i dużej ramki [80B]	Zaleca się wykorzystywać podczas ruchu o niższej prędkości, kiedy czas transmisji nie wprowadza opóźnienia przekładającego się na konieczność korekty odległości. Przykładem zastosowania może być np. postój samochodu na światłach, przejściu dla pieszych czy podczas jazdy w korku.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Rozwój systemów samochodowych wymusza stałe poszukiwanie narzędzi i technologii umożliwiających szybkie i stabilne wdrażanie nowych, dokładniejszych systemów, w tym systemów wykorzystujących informacje o rozmieszczeniu infrastruktury i lokalizacji innych uczestników ruchu drogowego. Przykładem systemu, który posiada potencjał wdrożeniowy jest system oparty na technologii UWB, jednak jego implementacja wymaga odpowiedzi na wiele pytań związanych z jego dokładnością pozycjonowania, możliwościami transmisji danych oraz wpływem tychże na opóźnienia wynikające z zastosowanych algorytmów. Zaproponowanie adekwatnych rozwiązań i algorytmów w postaci filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS stało się przedmiotem badań związanych z niniejszą dysertacją doktorską.

Etykietowanie obiektów w otoczeniu samochodu nie jest zadaniem łatwym, czego dowodzą obecnie stosowane technologie i intensywne wysiłki branży samochodowej właśnie w tym obszarze. W pracy tej przedstawiono efektywną metodę pozwalającą zarówno na etykietowanie obiektów, jak i pozyskiwanie ich pozycji względem pojazdu. Niezbędnym w jej powstaniu było także opracowanie procedury przetwarzania danych oraz opracowanie algorytmów pozwalających na pozycjonowanie z jak największą dokładnością, przy jednoczesnym determinizmie czasowym procesu wymiarowania, szczególnie podczas transmisji dodatkowych danych.

W zaproponowanym podejściu opracowano etap wstępnego przetwarzania danych, gdzie zastosowano szybkie w działaniu algorytmy filtracji z kroczącym oknem, co jest szczególnie istotne dla implementacji przemysłowej i samochodowej, gdzie redukcja kosztu (w sensie finansowym i energetycznym) będzie priorytetem. W jej przypadku przedstawione zostały zalety oraz zagrożenia związane z czasem odpowiedzi filtracji przy określonym oknie. Ponadto zaproponowano połączenie tych metod wraz z filtracją umożliwiającą adaptację do bieżących warunków oraz informacji z systemów nadrzędnych, takich jak na przykład prędkość. Dalej opracowano metodę korekty odległości na podstawie dwóch modeli logiki rozmytej – Mamdaniego oraz Takagi-Sugeno.

Zastosowanie wielostopniowej filtracji pozwoliło na poprawę dokładności otrzymywanej informacji o pozycji. W zależności od warunków system pozwala na wyznaczenie odległości pomiędzy węzłami z dokładnością do 6 cm. Możliwość precyzyjnego określenia informacji o odległości obiektu przekłada się bezpośrednio – np. w procesie trilateracji – na dokładność uzyskiwanej pozycji lub też kąta i odległości od etykietowanego obiektu.

W pracy zaproponowano także sposób etykietowania, która po szczegółowej analizie standardu oraz wymagań związanych z otoczeniem pojazdu i drogą, pozwoli na identyfikację zarówno uczestników ruchu drogowego, jak i infrastruktury tak w trybie offline na potrzeby walidacji ADAS jak i online (przyszłościowe zastosowanie technologii UWB w smartcities). Dokonano również analizy proponowanych wariantów ramki danych pod kątem czasu transmisji oraz wynikających z nich opóźnień – przesunięć – podczas poruszania się z różną prędkością. Pozwala to na dopasowanie konkretnej ramki do potrzeb związanych z szczegółowymi przypadkami potencjalnego wdrożenia.

Wykazana możliwość identyfikacji i lokalizacji, przy jednoczesnym wykorzystaniu filtracji adaptacyjnej wraz z logiką rozmytą, pozwala na zastosowanie systemu UWB na rzecz walidacji systemów ADAS. Dokładność zaproponowanego rozwiązania w odniesieniu do dokładności innych systemów omawianych w literaturze (rozdział 1) jest lepsza lub też porównywalna, przy jednoczesnej korzyści wynikającej z możliwości identyfikacji czy pracy w warunkach nieosiągalnych dla innych systemów (np. NLOS). Na innowacyjny charakter prowadzonych badań najlepiej wskazuje dotychczasowy brak pozycji literaturowych, które poruszałyby tematykę systemów pozycjonowania wykorzystujących technologię UWB, szczególnie w kontekście zastosowań na zewnątrz budynków, w obszarze technologii samochodowych. W związku z powyższym za oryginalne elementy pracy Autor uważa:

- stworzenie uniwersalnej procedury do równoczesnej identyfikacji i pozycjonowania obiektów na potrzeby ich etykietowania,
- opracowanie adaptacyjnego sposobu filtracji danych opartego na aktualnej prędkości pojazdu,
- wykorzystanie logiki rozmytej do filtracji odległości pozyskiwanych z systemu wymiarowania opartego na technologii UWB,
- stworzenie ramki danych mającej na celu efektywną identyfikację obiektów infrastruktury drogowej,
- analiza wpływu różnych wariantów ramki danych i prędkości pojazdu na dokładność wymiarowania obiektów,
- określenie wpływu różnej liczby urządzeń UWB na pojeździe na dokładność pozycjonowania obiektu,
- wskazanie sposobu określania pozycji etykietowanego obiektu w zależności od liczby dostępnych urządzeń UWB,
- opracowanie zasad stosowalności równoczesnej lokalizacji i identyfikacji na potrzeby etykietowania, tj. walidacji nowych algorytmów stosowanych w podsystemach ADAS.

W związku z powyższym, można stwierdzić, że cel pracy „**Wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS**” został zrealizowany, a tezy pracy

- Zastosowanie technologii UWB w postaci lokalnego układu odniesienia, który umiejscowiony jest na obiekcie głównym, umożliwia poprawną identyfikację i lokalizację obiektów trzecich znajdujących się w otoczeniu obiektu głównego w akceptowalnym czasie i z zachowaniem ograniczonej prędkości.
- Wprowadzenie filtracji adaptacyjnej wraz z logiką rozmytą pozwala polepszyć dokładności lokalizacji oznaczonych obiektów znajdujących się w otoczeniu pojazdu.
- Opracowanie odpowiedniej struktury danych opisujących obiektów zewnętrznych ułatwia prawidłową identyfikację przy zachowaniu akceptowalnego czasu wyznaczania pozycji obiektu zewnętrznego.

Zostały udowodnione.

Przedstawione rozwiązanie może znaleźć zastosowanie w szybko rozwijającej się gałęzi technologii samochodowych, pozwalając tym samym na minimalizację kosztów związanych z opracowaniem i prototypowaniem nowych systemów. Szczególnym obszarem, w którym technologia UWB mogłaby znaleźć zastosowanie, są systemy związane z przygotowaniem map zajętości przestrzeni wokół pojazdu, ale także z bezpieczeństwem, w tym bezpieczeństwem innych niż samochody uczestników ruchu drogowego, którzy z reguły są narażeni na dużo większe konsekwencje kolizji czy wypadków. System taki pozwoliłby zarówno na walidację określenia odległości, jak i na identyfikację obiektu, przez co można by wdrożyć protokół bezpieczeństwa właściwy dla danego zdarzenia.

Konkluzje będące efektem prowadzonych badań wskazują na to, że w oparciu o technologię UWB z powodzeniem może powstać system, pozwalający na szybką identyfikację obiektów (infrastruktury, pojazdów, osób), ich precyzyjną lokalizację i monitorowanie właściwości. Technologia ta nadaje się zarówno do rozwoju systemów ADAS poprzez ich walidację, jak również do monitorowania sytuacji zagrożenia kolizją aż do momentu wykluczenia lub wyeliminowania takiego ryzyka przez składowe ADAS.

Część elementów niniejszej rozprawy jest wynikiem współpracy z firmami zajmującymi się rozwiązaniami ADAS oraz wynikiem konsultacjami z osobami zaangażowanymi w projekty z sektora motoryzacyjnego. Otrzymane rezultaty badań są odpowiedzią na wskazane przez nie problemy. Pewne elementy niniejszej pracy zostały już zaimplementowane i zweryfikowane w ramach projektu pt. "Innowacyjna technologia tworzenia wydarzeń multimedialnych opartych o walki dronów z synergią między poziomami: wirtualnym, rozszerzonym i fizycznym". Część opracowanych metod

została również wdrożona w projekcie pt. "CoBoAGV: Automated Guided Vehicles integrated with Collaborative Robots for Smart Industry Perspective". Planuje się wykorzystać je również podczas realizacji projektów pt. "WrightBroS: Working in a Collaborative Factory of the Flight Simulators Branch of RISE" oraz "ReACTIVE Too: Reliable Electronics for Tomorrow's Active Systems".

7. Bibliografia

- [1] Narodowy Instytut Dziedzictwa, „Wykaz zabytków nieruchomych wpisanych do rejestru zabytków na terenie województwa wielkopolskiego”. Narodowy Instytut Dziedzictwa. Dostęp: 11 grudzień 2021. [Online]. Dostępne na: http://www.nid.pl/pl/Informacje_ogolne/Zabytki_w_Polsce/rejestr-zabytkow/zestawienia-zabytkow-nieruchomych/WLK-rej.pdf
- [2] U. Theobald, „Chinese Literature - Pingzhou ketan 萍洲可談 (www.chinaknowledge.de)”. <http://www.chinaknowledge.de/Literature/Novels/pingzhouketan.html> (dostęp 11 grudzień 2021).
- [3] M. A. J. Larsen, „BLE Indoor positioning system”, Master theses, Roskilde University Center, 2018. Dostęp: 11 grudzień 2021. [Online]. Dostępne na: https://rucforsk.ruc.dk/ws/portalfiles/portal/62902182/BLE_Indoor_Position_System.pdf
- [4] K. Hanzel, K. Paszek, i D. Grzechca, „Possibilities of using data from the UWB system for the validation of ADAS subsystems”, w *Networking issues in innovative applications based on cyber-physical systems paradigm*, null: null, 2020.
- [5] C. Yang i H. Shao, „WiFi-based indoor positioning”, *IEEE Communications Magazine*, t. 53, nr 3, s. 150–157, mar. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7060497.
- [6] E. Mok i G. Retscher, „Location determination using WiFi fingerprinting versus WiFi trilateration”, *Journal of Location Based Services*, t. 1, nr 2, s. 145–159, cze. 2007, doi: 10.1080/17489720701781905.
- [7] L. Koski, T. Perälä, i R. Piché, „Indoor positioning using WLAN coverage area estimates”, w *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, wrz. 2010, s. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2010.5648284.
- [8] Y. Wang, Xu Yang, Yutian Zhao, Yue Liu, i L. Cuthbert, „Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods”, w *2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, sty. 2013, s. 837–842. doi: 10.1109/CCNC.2013.6488558.
- [9] R. Faragher i R. Harle, „An analysis of the accuracy of bluetooth low energy for indoor positioning applications”, wrz. 2014. Dostęp: 28 styczeń 2020. [Online]. Dostępne na: https://www.researchgate.net/publication/290781636_An_analysis_of_the_accuracy_of_bluetooth_low_energy_for_indoor_positioning_applications
- [10] M. G. Wing, A. Eklund, i L. D. Kellogg, „Consumer-Grade Global Positioning System (GPS) Accuracy and Reliability”, *J for*, t. 103, nr 4, s. 169–173, cze. 2005, doi: 10.1093/jof/103.4.169.
- [11] „GPS.gov: GPS Accuracy”. <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/> (dostęp 28 styczeń 2020).
- [12] D. Pan i Y. Yu, „Design of Indoor Position System Based on DWM1000 Modules”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, t. 585, s. 012067, sie. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/585/1/012067.
- [13] Z. Song, G. Jiang, i C. Huang, „A Survey on Indoor Positioning Technologies”, w *Theoretical and Mathematical Foundations of Computer Science*, Berlin, Heidelberg, 2011, s. 198–206. doi: 10.1007/978-3-642-24999-0_28.

- [14] D. Grzechca, **K. Hanzel**, i K. Paszek, „Accuracy analysis for object positioning on a circular trajectory based on the UWB location system”, luty 2018, s. 69–74. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336158.
- [15] D. Grzechca i **K. Hanzel**, „The positioning accuracy based on the UWB technology for an object on circular trajectory”, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, t. 64, nr 4, s. 487–494, paź. 2018.
- [16] D. Grzechca, K. Tokarz, **K. Hanzel**, i S. Pokucinski, „On fundamental issues on creating autonomous platform for UWB navigation system”, *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, t. 22, nr 1, Art. nr 1, mar. 2020.
- [17] „Mobile positioning in CDMA cellular networks”, *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/3819570_Mobile_positioning_in_CDMA_cellular_networks (dostęp 28 styczeń 2020).
- [18] S. T. Yogesh i S. S. Pramila, „Mobile Positioning in Cellular Networks”, *International Journal of Trend in Research and Development*, t. 3, nr 5, paź. 2016, Dostęp: 28 styczeń 2020. [Online]. Dostępne na: <http://www.ijtrd.com/ViewFullText.aspx?Id=4092>
- [19] S. S. Saab i Z. S. Nakad, „A Standalone RFID Indoor Positioning System Using Passive Tags”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, t. 58, nr 5, s. 1961–1970, maj 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2055774.
- [20] A. Lilienthal i T. Duckett, „An absolute positioning system for 100 euros”, w *1st International Workshop on Robotic Sensing, 2003. ROSE' 03.*, cze. 2003, s. 6 pp.-. doi: 10.1109/ROSE.2003.1218705.
- [21] M. Yuda, Z. Xiangjun, S. Weiming, i L. Shaofeng, „Target accurate positioning based on the point cloud created by stereo vision”, w *2016 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, lis. 2016, s. 1–5. doi: 10.1109/M2VIP.2016.7827268.
- [22] M. Pongratz i K. Mironov, „Accuracy of positioning spherical objects with a stereo camera system”, w *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, mar. 2015, s. 1608–1612. doi: 10.1109/ICIT.2015.7125326.
- [23] J.-Y. Lee i W. Yu, „Robust self-localization of ground vehicles using artificial landmark”, w *2014 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, lis. 2014, s. 303–307. doi: 10.1109/URAI.2014.7057439.
- [24] H. K. Kim, Y. Chung, i M. Kim, „Effect of Enhanced ADAS Camera Capability on Traffic State Estimation”, *Sensors*, t. 21, nr 6, Art. nr 6, sty. 2021, doi: 10.3390/s21061996.
- [25] S. Feng, X. Li, R. Zhang, M. Jiang, i L. Hanzo, „Hybrid Positioning Aided Amorphous-Cell Assisted User-Centric Visible Light Downlink Techniques”, *IEEE Access*, t. 4, s. 2705–2713, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2567218.
- [26] L. Bai, Y. Yang, C. Guo, C. Feng, i X. Xu, „Camera Assisted Received Signal Strength Ratio Algorithm for Indoor Visible Light Positioning”, *IEEE Communications Letters*, t. 23, nr 11, s. 2022–2025, lis. 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2019.2935713.
- [27] Y. Li, Z. Ghassemlooy, X. Tang, B. Lin, i Y. Zhang, „A VLC Smartphone Camera Based Indoor Positioning System”, *IEEE Photonics Technology Letters*, t. 30, nr 13, s. 1171–1174, lip. 2018, doi: 10.1109/LPT.2018.2834930.
- [28] „An IR Local Positioning System for Smart Items and Devices”, *ResearchGate*. Dostęp: 29 styczeń 2020. [Online]. Dostępne na:

https://www.researchgate.net/publication/4017203_An_IR_Local_Positioning_System_for_Smart_Items_and_Devices

- [29] A. L. Rodrigues Gonçalves, Á. Henrique Alves Maia, M. Rodrigues Santos, D. Alves de Lima, i A. Miranda Neto, „Visible Light Positioning and Communication Methods and Their Application in the Intelligent Mobility”, *IEEE Latin America Transactions*, t. 19, nr 11, s. 1883–1894, lis. 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9475622.
- [30] T. Ogawa, H. Sakai, Y. Suzuki, K. Takagi, i K. Morikawa, „Pedestrian detection and tracking using in-vehicle lidar for automotive application”, w *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, cze. 2011, s. 734–739. doi: 10.1109/IVS.2011.5940555.
- [31] J. Moras, F. S. A. Rodríguez, V. Drevelle, G. Dherbomez, V. Cherfaoui, i P. Bonnifait, „Drivable space characterization using automotive lidar and georeferenced map information”, w *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, cze. 2012, s. 778–783. doi: 10.1109/IVS.2012.6232252.
- [32] M. Kutila, P. Pyykönen, W. Ritter, O. Sawade, i B. Schäufele, „Automotive LIDAR sensor development scenarios for harsh weather conditions”, w *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, lis. 2016, s. 265–270. doi: 10.1109/ITSC.2016.7795565.
- [33] R. H. Rasshofer i K. Gresser, „Automotive Radar and Lidar Systems for Next Generation Driver Assistance Functions”, *ResearchGate*, t. 3, s. 205–209, 2005, doi: <https://doi.org/10.5194/ars-3-205-2005>.
- [34] D. Grzechca *i in.*, „How Accurate Can UWB and Dead Reckoning Positioning Systems Be? Comparison to SLAM Using the RPLidar System”, *Sensors*, t. 20, nr 13, Art. nr 13, sty. 2020, doi: 10.3390/s20133761.
- [35] M. E. Warren, „Automotive LIDAR Technology”, w *2019 Symposium on VLSI Circuits*, cze. 2019, s. C254–C255. doi: 10.23919/VLSIC.2019.8777993.
- [36] N. Obeid, M. Heddebaut, F. Boukour, C. Loyez, i N. Rolland, „Millimeter Wave Ultra Wide Band Short Range Radar Localization Accuracy”, w *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, kwi. 2009, s. 1–5. doi: 10.1109/VETECS.2009.5073669.
- [37] H. Rohling, S. Heuel, i H. Ritter, „Pedestrian detection procedure integrated into an 24 GHz automotive radar”, w *2010 IEEE Radar Conference*, maj 2010, s. 1229–1232. doi: 10.1109/RADAR.2010.5494432.
- [38] S. Sun, A. P. Petropulu, i H. V. Poor, „MIMO Radar for Advanced Driver-Assistance Systems and Autonomous Driving: Advantages and Challenges”, *IEEE Signal Processing Magazine*, t. 37, nr 4, s. 98–117, lip. 2020, doi: 10.1109/MSP.2020.2978507.
- [39] J. Borenstein, „Experimental evaluation of a fiber optics gyroscope for improving dead-reckoning accuracy in mobile robots”, w *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, maj 1998, t. 4, s. 3456–3461 t.4. doi: 10.1109/ROBOT.1998.680972.
- [40] D. Grzechca, K. Tokarz, K. Paszek, i D. Poloczek, „Using MEMS Sensors to Enhance Positioning When the GPS Signal Disappears”, w *Computational Collective Intelligence*, wrz. 2017, s. 260–271. doi: 10.1007/978-3-319-67077-5_25.
- [41] X. Ning i J. Fang, „Spacecraft autonomous navigation using unscented particle filter-based celestial/Doppler information fusion”, *Meas. Sci. Technol.*, t. 19, nr 9, s. 095203, lip. 2008, doi: 10.1088/0957-0233/19/9/095203.

- [42] M. Komorkiewicz, K. Turek, P. Skruch, T. Kryjak, i M. Gorgon, „FPGA-based Hardware-in-the-Loop environment using video injection concept for camera-based systems in automotive applications”, w *2016 Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP)*, paź. 2016, s. 183–190. doi: 10.1109/DASIP.2016.7853817.
- [43] O. Haraz, „Why do we need Ultra-wideband? (1)”, *VLSI-Egypt*, 19 listopad 2012. <http://www.vlsiegypt.com/home/?p=518> (dostęp 8 lipiec 2017).
- [44] D. Grzechca *i in.*, „Monitoring the Gait Process During the Rehabilitation of Patients Using Computer Vision Techniques and UWB Technology”, w *Information Systems*, t. 381, M. Themistocleous i M. Papadaki, Red. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 419–437. doi: 10.1007/978-3-030-44322-1_31.
- [45] R. Fayadh, H. Fadhil, F. Abdullah, M. AbdulMalek, i S. Dawood, *Selective update euclidean direction search algorithm for adaptive filtering in indoor wireless rake-receiver*. 2014, s. 332. doi: 10.1109/I4CT.2014.6914199.
- [46] S. Gezici *i in.*, „Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks”, *IEEE Signal Processing Magazine*, t. 22, nr 4, s. 70–84, lip. 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458289.
- [47] R. A. Scholtz i M. Z. Win, „Impulse radio: how it works”, *IEEE Communications Letters*, t. 2, nr 2, s. 36–38, luty 1998, doi: 10.1109/4234.660796.
- [48] R. A. Scholtz i M. Z. Win, „On the robustness of ultra-wide bandwidth signals in dense multipath environments”, *IEEE Communications Letters*, t. 2, nr 2, s. 51–53, luty 1998, doi: 10.1109/4234.660801.
- [49] USB Implementers Forum, Inc., „Wireless USB Specification Revision 1.1”, *Wireless USB Documents*, 9 wrzesień 2010. <http://www.usb.org/developers/wusb/docs/> (dostęp 8 lipiec 2017).
- [50] A. Alarifi *i in.*, „Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances”, *Sensors*, t. 16, nr 5, s. 707, maj 2016, doi: 10.3390/s16050707.
- [51] A. Abdullah, A. Ahmad, M. S. Sauti, Y. Erana, S. A. Shaaya, i I. S. Mustafa, „Simulation Study of UWB Interference Effects on GSM 900 System”, w *2008 6th National Conference on Telecommunication Technologies and 2008 2nd Malaysia Conference on Photonics*, sie. 2008, s. 386–391. doi: 10.1109/NCTT.2008.4814308.
- [52] J. Lee, Y. Su, i C. Shen, „A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, w *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, lis. 2007, s. 46–51. doi: 10.1109/IECON.2007.4460126.
- [53] E. Karapistoli, F. N. Pavlidou, I. Gragopoulos, i I. Tsetsinas, „An overview of the IEEE 802.15.4a Standard”, *IEEE Communications Magazine*, t. 48, nr 1, s. 47–53, sty. 2010, doi: 10.1109/MCOM.2010.5394030.
- [54] „IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks - Amendment 5: Enabling/Updating the Use of Regional Sub-GHz Bands”, *IEEE Std 802.15.4v-2017 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2015, as amended by IEEE Std 802.15.4n-2016, IEEE Std 802.15.4q-2016, IEEE Std 802.15.4u-2016, and IEEE Std 802.15.4t-2017)*, s. 1–35, cze. 2017, doi: 10.1109/IEEESTD.2017.7964803.
- [55] „IEEE 802.15.4z-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks--Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques”. https://standards.ieee.org/standard/802_15_4z-2020.html (dostęp 13 kwiecień 2021).

- [56] R. Zafar, „iPhone 11 Has UWB With U1 Chip - Preparing Big Features For Ecosystem”, *Wccftech*, 3 listopad 2019. <https://wccftech.com/iphone-11-u1-chip-uwb/> (dostęp 13 kwiecień 2021).
- [57] „Google has added an Ultra-wideband (UWB) API in Android”, *xda-developers*, 25 styczeń 2021. <https://www.xda-developers.com/google-adding-ultra-wideband-uwb-api-android/> (dostęp 13 kwiecień 2021).
- [58] N. Decarli, D. Dardari, S. Gezici, i A. A. D’Amico, „LOS/NLOS detection for UWB signals: A comparative study using experimental data”, w *IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2010*, maj 2010, s. 169–173. doi: 10.1109/ISWPC.2010.5483704.
- [59] K. C. Ho, X. Lu, i L. Kovavisaruch, „Source Localization Using TDOA and FDOA Measurements in the Presence of Receiver Location Errors: Analysis and Solution”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, t. 55, nr 2, s. 684–696, luty 2007, doi: 10.1109/TSP.2006.885744.
- [60] L. Xiao i F. Gao, „A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems”, *Vehicle System Dynamics*, t. 48, nr 10, s. 1167–1192, paź. 2010, doi: 10.1080/00423110903365910.
- [61] R. K. Jurgen, „Adaptive Cruise Control”, SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper PT-132, wrz. 2006. Dostęp: 26 kwiecień 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/PT-132/>
- [62] R. Labayrade, C. Royere, i D. Aubert, „Experimental Assessment of the RESCUE Collision-Mitigation System”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, t. 56, nr 1, s. 89–102, sty. 2007, doi: 10.1109/TVT.2006.883780.
- [63] D. Gerónimo, A. M. López, A. D. Sappa, i T. Graf, „Survey of Pedestrian Detection for Advanced Driver Assistance Systems”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, t. 32, nr 7, s. 1239–1258, lip. 2010, doi: 10.1109/TPAMI.2009.122.
- [64] N. K. Ragesh i R. Rajesh, „Pedestrian Detection in Automotive Safety: Understanding State-of-the-Art”, *IEEE Access*, t. 7, s. 47864–47890, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909992.
- [65] S. B. Wali *i in.*, „Vision-Based Traffic Sign Detection and Recognition Systems: Current Trends and Challenges”, *Sensors*, t. 19, nr 9, Art. nr 9, sty. 2019, doi: 10.3390/s19092093.
- [66] „Intelligent Speed Assistance (ISA) | ETSC”. <https://etsc.eu/tag/isa/> (dostęp 13 kwiecień 2021).
- [67] O. Kovalenko, „UWB Indoor Positioning: SWOT Analysis”, *Medium*, 10 wrzesień 2019. <https://blog.indoorway.com/recently-indoor-positioning-has-emerged-as-a-useful-approach-to-improving-the-productivity-and-a595d7388e52> (dostęp 14 kwiecień 2021).
- [68] **K. Hanzel**, „Follow me droney! Will UWB technology do it right?”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, t. 2235, nr 1, s. 012108, maj 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2235/1/012108.
- [69] Metropolitan Transportation Authority, „Capital Program Oversight Committee Meeting”. czerwiec 2019. Dostęp: 17 maj 2021. [Online]. Dostępne na: http://web.mta.info/mta/news/books/pdf/190624_1430_CPOC.pdf
- [70] J. Wei, J. He, Y. Zhou, K. Chen, Z. Tang, i Z. Xiong, „Enhanced Object Detection With Deep Convolutional Neural Networks for Advanced Driving Assistance”, *IEEE*

- Transactions on Intelligent Transportation Systems*, t. 21, nr 4, s. 1572–1583, kwi. 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2910643.
- [71] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, i A. Farhadi, „You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”, w *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, cze. 2016, s. 779–788. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [72] S. Stević, M. Krunić, M. Dragojević, i N. Kaprocki, „Development and Validation of ADAS Perception Application in ROS Environment Integrated with CARLA Simulator”, w *2019 27th Telecommunications Forum (TELFOR)*, lis. 2019, s. 1–4. doi: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971063.
- [73] H. Elsayed, B. A. Abdullah, i G. Aly, „Fuzzy Logic Based Collision Avoidance System for Autonomous Navigation Vehicle”, w *2018 13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, grudz. 2018, s. 469–474. doi: 10.1109/ICCES.2018.8639396.
- [74] K. Paszek, D. Grzechca, i A. Becker, „Design of the UWB positioning system simulator for LOS/NLOS environments”, *Sensors*, t. 21, nr 14, 2021, doi: 10.3390/s21144757.
- [75] P. Skruch, R. Dlugosz, K. Kogut, P. Markiewicz, D. Sasin, i M. Różewicz, „The Simulation Strategy and Its Realization in the Development Process of Active Safety and Advanced Driver Assistance Systems”, SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2015-01–1401, kwi. 2015. doi: 10.4271/2015-01-1401.
- [76] P. Skruch i G. Buchala, „Model-Based Real-Time Testing of Embedded Automotive Systems”, w *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems*, kwi. 2014, t. 7, nr 2. Dostęp: 26 kwiecień 2022. [Online]. Dostępne na: <https://trid.trb.org/view/1433586>
- [77] P. Skruch, M. Szelest, i P. Kowalczyk, „An Approach for Evaluating the Completeness of the Test Scenarios for the Vehicle Environmental Perception-Based Systems”, w *2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, sie. 2021, s. 133–138. doi: 10.1109/MMAR49549.2021.9528454.
- [78] D. Dubois i H. M. Prade, *Fuzzy sets and systems: theory and applications*. New York: Academic Press, 1980.
- [79] E. H. Mamdani i S. Assilian, „An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller”, *International Journal of Man-Machine Studies*, t. 7, nr 1, s. 1–13, sty. 1975, doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
- [80] Mamdani, „Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis”, *IEEE Transactions on Computers*, t. C–26, nr 12, s. 1182–1191, grudz. 1977, doi: 10.1109/TC.1977.1674779.
- [81] L. A. Zedeh, „Knowledge representation in fuzzy logic”, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, t. 1, nr 1, s. 89–100, mar. 1989, doi: 10.1109/69.43406.
- [82] L. A. Zadeh, „Fuzzy sets”, *Information and Control*, t. 8, nr 3, s. 338–353, cze. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [83] J.-S. R. Jang, „ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, t. 23, nr 3, s. 665–685, maj 1993, doi: 10.1109/21.256541.
- [84] J.-S. R. Jang i C.-T. Sun, „Neuro-fuzzy modeling and control”, *Proceedings of the IEEE*, t. 83, nr 3, s. 378–406, mar. 1995, doi: 10.1109/5.364486.

- [85] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun, i E. Mizutani, *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- [86] „An Algebraic Solution to the Multilateration Problem (PDF Download Available)”, *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/275027725_An_Algebraic_Solution_to_the_Multilateration_Problem (dostęp 2 sierpień 2017).
- [87] S. Sasaki i Y. Kiyoki, „Analytical Visualization Functions of 5D World Map System for Multi-Dimensional Sensing Data”, *Information Modelling and Knowledge Bases XXIX*, s. 71–89, 2018, doi: 10.3233/978-1-61499-834-1-71.
- [88] R. Liu, J. Wang, i B. Zhang, „High Definition Map for Automated Driving: Overview and Analysis”, *The Journal of Navigation*, t. 73, nr 2, s. 324–341, mar. 2020, doi: 10.1017/S0373463319000638.
- [89] D. Bétaille i R. Toledo-Moreo, „Creating Enhanced Maps for Lane-Level Vehicle Navigation”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, t. 11, nr 4, s. 786–798, grudz. 2010, doi: 10.1109/TITS.2010.2050689.
- [90] „DW1000 Radio IC”, *Decawave*. <https://www.decawave.com/product/dw1000-radio-ic/> (dostęp 13 kwiecień 2021).
- [91] J. T. Starczewski, *Advanced Concepts in Fuzzy Logic and Systems with Membership Uncertainty*. Dostęp: 28 lipiec 2020. [Online]. Dostępne na: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-29520-1>
- [92] R. K. Nowicki, B. A. Nowak, J. T. Starczewski, i K. Cpałka, „The learning of neuro-fuzzy approximator with fuzzy rough sets in case of missing features”, w *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, lip. 2014, s. 3759–3766. doi: 10.1109/IJCNN.2014.6889857.
- [93] H. Dong, B. Ning, B. Cai, i Z. Hou, „Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways”, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, t. 10, nr 2, s. 6–18, Secondquarter 2010, doi: 10.1109/MCAS.2010.936782.
- [94] A. Platzer i J.-D. Quesel, „European Train Control System: A Case Study in Formal Verification”, w *Formal Methods and Software Engineering*, 2009, s. 246–265.
- [95] *GNSS for rail transportation*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [96] U. Berger, P. James, A. Lawrence, M. Roggenbach, i M. Seisenberger, „Verification of the European Rail Traffic Management System in Real-Time Maude”, *Science of Computer Programming*, t. 154, s. 61–88, mar. 2018, doi: 10.1016/j.scico.2017.10.011.
- [97] C. Pinedo, M. Aguado, I. Lopez, i J. Astorga, „Modelling and Simulation of ERTMS for Current and Future Mobile Technologies”, *International Journal of Vehicular Technology*, t. 2015, s. 1–11, 2015, doi: 10.1155/2015/912417.
- [98] „Guidelines for Use of Extended Unique Identifier (EUI), Organizationally Unique Identifier (OUI), and Company ID (CID)”, 2017.
- [99] „DW1000 User Manual”, *Decawave*. <https://www.decawave.com/dw1000/usermanual/> (dostęp 28 czerwiec 2019).
- [100] DecaWave Ltd 2014, „DecaRanging ARM Source Code Guide rev1.6”. DecaWave Ltd, 2014.
- [101] K. Hanzel, K. Paszek, i D. Grzechca, „The influence of the data packet size on positioning parameters of UWB system for the purpose of tagging smart city infrastructure”, 2020, doi: 10.24425/BPASTS.2020.134173.

- [102] „United Nations harmonization of hazard classification criteria and communication tools.” [Online]. Dostępne na: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/unrec/English/Part2.pdf>
- [103] E. Bosina i U. Weidmann, „Estimating pedestrian speed using aggregated literature data”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, t. 468, s. 1–29, luty 2017, doi: 10.1016/j.physa.2016.09.044.
- [104] Q. Wang, H. Huo, K. He, Z. Yao, i Q. Zhang, „Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, t. 13, nr 5, s. 289–297, lip. 2008, doi: 10.1016/j.trd.2008.03.003.
- [105] D. C. Thompson, V. Rebolledo, R. S. Thompson, A. Kaufman, i F. P. Rivara, „Bike speed measurements in a recreational population: validity of self reported speed.”, *Inj Prev*, t. 3, nr 1, s. 43–45, mar. 1997.
- [106] **K. Hanzel**, D. Grzechca, M. Tomczyk, i A. Marciniak, „Multifactorial Fuzzy Logic Distance Correction for UWB Positioning System”, *JCM*, t. 15, nr 5, s. 447–454, maj 2020, doi: 10.12720/jcm.15.5.447-454.
- [107] **K. Hanzel** i D. Grzechca, „Increasing the Security of Smart Cities of the Future Thanks to UWB Technology”, w *Information Systems*, Cham, 2022, s. 585–596. doi: 10.1007/978-3-030-95947-0_41.
- [108] „New Toshiba image-recognition processors for ADAS; night-time pedestrian detection and 3D reconstruction”, *Green Car Congress*. <https://www.greencarcongress.com/2014/11/20141114-toshibaimage.html> (dostęp 23 czerwiec 2022).
- [109] „Software stacks for mixed-critical applications: Consolidating IEEE 802.1 AVB and time-triggered ethernet in next-generation automotive electronics”. <https://ieeexplore-1ieee-1org-12vdogrtv-004e.han.polsl.pl/abstract/document/7034239> (dostęp 23 czerwiec 2022).

Wykaz ważniejszych skrótów i akronimów

- ACC – adaptive cruise control
- ADAS – Advanced Driver Assistance Systems
- AHRS – Attitude and heading reference system
- ANFIS – Adaptive neuro fuzzy inference system
- AOA – Angle of Arrival
- BER – bit error rate
- BPM – Burst Position Modulation
- BPSK - Binary Phase-Shift Keying
- CA – Collision Avoidance
- CAN – Controlled Area Network
- CMBS – Collision Mitigation Braking System
- CSMA – Carrier Sense Multiple Access
- DS-TWR – Double-Sided Two-Way Ranging
- ED – Energy Detection
- ETCS – European Train Control System
- EUI – Extended Unique Identifier
- FFD – Full-Function Device
- GPS – Global Positioning System
- HomeRF – HOME Radio Frequency
- IPS – Indoor Positioning System
- IrDA – Infrared Data Association
- ISA – Intelligent Speed Assistance
- LIDAR – Light Detection and Ranging
- LOS – Line Of Sight
- LQI – Link Quality Indication
- MAC – medium access control
- MFR – MAC Footer
- MHR – MAC Header
- MPDU – MAC Protocol Data Units
- NLOS – Non-Line Of Sight
- OPS – Outdoor Positioning System
- OSM – Open StreetMap
- PAN – Personal Area Network
- PFR – PHY Footer
- PHR – PHY Header
- PHY – PHysical Layer
- POI – Point Of Intrest
- PPDU – PHY Protocol Data Units
- R&D – research and development
- RFD - Reduced-Function Device
- RFID – Radio-frequency identification
- RIRO – Right-In/Right-Out (intersections)
- RMSE – root-mean-square error
- RSSI – Received Signal Strength Indicator
- SHR – Synchronization Header
- SS-TWR – Single-Sided Two-Way Ranging
- STSC – Smart Traffic Signal Control
- SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
- SYNC – Synchronization (header)
- TDoA – Time Difference of Arrival
- TOA – Time Of Arrival
- TOF – Time Of Flight
- TWR – Two Way Ranging
- UART – universal asynchronous receiver-transmitter
- UNECE – United Nations Economic Commission for Europe
- UTO – Urządzenie Transportu Osobistego
- UWB – Ultra-WideBand
- V2E – Vehicle To Everything
- V2I – Vehicle To Infrastructure
- V2V – Vehicle To Vehicle
- VLC – Visible Light Communication
- WPAN – Wireless Personal Area Network

Spis rysunków

RYS. 1 RÓŻNICE POMIĘDZY PRECYZJĄ A DOKŁADNOŚCIĄ POZYCJONOWANIA	10
RYS. 2 WYSZCZEGÓLNIONE CZĘSTOTLIWOŚCI DLA NAJPOPULARNIEJSZYCH TECHNOLOGII TRANSMISJI BEZPRZEWODOWEJ [43]	18
RYS. 3 SPOSÓB TRANSMISJI DANYCH W KONWENCJONALNEJ TRANSMISJI BEZPRZEWODOWEJ ORAZ Z WYKORZYSTANIEM UWB [45].	19
RYS. 4 PRZYKŁADOWY SYGNAŁ TRANSMITOWANY PRZEZ SYSTEM UWB	19
RYS. 5. PRZYKŁAD DZIAŁANIA ANGLE OF ARRIVAL – NA PODSTAWIE ZNANYCH KĄTÓW NADEJŚCIA SYGNAŁU MOŻLIWE JEST WYZNACZENIE POZYCJI OBIEKTU	22
RYS. 6. PRZYKŁAD KOMUNIKACJI SS-TWR RANGING	23
RYS. 7. PRZYKŁAD KOMUNIKACJI DS-TWR RANGING	23
RYS. 8. KONCEPCJA ZASIĘGU SYSTEMU UWB WZGLĘDEM INNYCH ADAS	32
RYS. 9. SCHEMAT BLOKOWY PROCEDURY PRZETWARZANIA DANYCH Z SYSTEMU UWB.	34
RYS. 10. PROCES KOMUNIKACJI POMIĘDZY RÓŻNĄ LICZBĄ KOTWIC NA POJEŹDZIE I ZNACZNIKÓW W RAMACH ETYKIETOWANEJ INFRASTRUKTURY	36
RYS. 11. GRAFICZNA PREZENTACJA OPÓŹNIENIA WYNIKAJĄCEGO Z ZASTOSOWANIE FILTRÓW Z OKNEM PRZESUWNYM	38
RYS. 12. PROCES AKWIZYCJI DANYCH PRZY RÓŻNYCH PARAMETRACH PRACY SYSTEMU NP. (A) WEWNĄTRZ I (B) NA ZEWNĄTRZ BUDYNKU	42
RYS. 13. WARTOŚĆ RÓŻNICY ODLEGŁOŚCI ZMIERZONEJ A ODLEGŁOŚCI REFERENCYJNEJ [CM]	44
RYS. 14. FUNKCJE PRZYNALEŻNOŚCI ZBIORÓW ROZMYTYCH: DLA ZMIENNEJ LINGWISTYCZNEJ „ODLEGŁOŚĆ POMIĘDZY WĘZŁAMI SYSTEMU”	45
RYS. 15. WYKRES POMIARÓW ODLEGŁOŚCI DLA RÓŻNYCH ZMIENNYCH PODCZAS WERYFIKACJI WPŁYWU WYSOKOŚCI UMIESZCZENIA ANTENY NA DOKŁADNOŚĆ WYMIAROWANIA.	46
RYS. 16. FUNKCJE PRZYNALEŻNOŚCI ZBIORÓW ROZMYTYCH: DLA ZMIENNEJ LINGWISTYCZNEJ „LICZBA TRANSMITOWANYCH DANYCH”	47
RYS. 17. FUNKCJE PRZYNALEŻNOŚCI ZBIORÓW ROZMYTYCH: DLA ZMIENNEJ LINGWISTYCZNEJ „ŚRODOWISKO” ORAZ „WYSTĘPOWANIE PRZESZKÓD”	48
RYS. 18. FUNKCJE PRZYNALEŻNOŚCI ZBIORÓW ROZMYTYCH: DLA ZMIENNYCH LINGWISTYCZNYCH ZWIĄZANYCH Z WYJŚCIEM METODY.	49
RYS. 19. GRAFICZNA REPREZENTACJA CZĘŚCI Z ZBUDOWANYCH REGUŁ.	52
RYS. 20. GRAFICZNA STRUKTURA SIECI PODCZAS UCZENIA MODELU SUGENO	53
RYS. 21 TRILATERACJA – PRZYKŁAD DZIAŁANIA PRZEDSTAWIONY DLA PUNKTU – ZNACZNIKA N, ORAZ DLA TRZECH PUNKTÓW REFERENCYJNYCH P_1 , P_2 ORAZ P_3	54
RYS. 22. INFORMACJA POZYSKANA Z SYSTEMU UWB W PRZYPADKU WYSTĘPOWANIA TYLKO JEDNEGO PUNKTU NA POJEŹDZIE ORAZ JEDNEGO ELEMENTU INFRASTRUKTURY DROGOWEJ.	57
RYS. 23. ODLEGŁOŚĆ I KĄT WZGLĘDEM OSI POJAZDU JAKI MOŻNA UZYSKAĆ DLA JEDNEGO PUNKTU REFERENCYJNEGO NA POJEŹDZIE, NA PODSTAWIE ANALIZY PRĘDKOŚCI.	58
RYS. 24. PRZYPADEK DWÓCH ANTEN SYSTEMU UWB UMIESZCZONYCH NA POJEŹDZIE	58
RYS. 25. MODEL TRYGNOMETRYCZNY SYTUACJI, W KTÓREJ NA POJEŹDZIE ZNAJDUJĄ SIĘ DWA PUNKTY (M ORAZ N), OD KTÓRYCH MOŻLIWE JEST UZYSKANIE DWÓCH ODLEGŁOŚCI (S_1 I S_2) OD PUNKTU (P_2), REPREZENTUJĄCYM ZNACZNIK UMIESZCZONY NA ELEMENTIE INFRASTRUKTURY.	59
RYS. 26. SYSTEM BAZUJĄCY NA MODUŁACH DWM1000 – PO LEWEJ ZNACZNIK (TAG) SŁUŻĄCY DO AKWIZYCJI DANYCH, PO PRAWEJ PUNKT REFERENCYJNY (ANCHOR) SŁUŻĄCY JAKO STAJA O STAŁEJ ZADEKLAROWANEJ POZYCJI	61
RYS. 27 SYSTEM BAZUJĄCY NA MODULE DWM3000EVb – MODUŁ WRAZ Z ZESTAWEM EWALUACYJNYM.	61
RYS. 28. BADANIA NAD WPŁYWEM RÓŻNYCH PRZESZKÓD NA WARTOŚĆ PARAMETRU RSSI. A – BLOCZEK BETONOWY, B – BLASZANA OBUDOWA, C - SKLEJKA	63
RYS. 29. SCENARIUSZ TESTOWY DLA AKWIZYCJI DANYCH W RUCHU.	65

RYS. 30. MAKSYMALNY BŁĄD POZYCJI Z UWZGLĘDNIENIEM FILTRACJI ŚREDNIĄ KROCZĄCĄ.....	68
RYS. 31. ZMIANA ROZKŁADU FUNKCJI ZMIENNEJ LINGWISTYCZNEJ WYGENEROWANEJ (A) NA ROZŁĄCZNA (B) DLA MODELU SUGENO	79
RYS. 32. SCENARIUSZE PODCZAS WYZNACZANIA KĄTA WZGLĘDEM ŚCIEŻKI PRZEJAZDU POJAZDEM; A – PRZEJAZD PO LINII PROSTEJ, B – PRZEJAZD PO KRZYWEJ.....	82
RYS. 33. KĄT WZGLĘDEM OSI POJAZDU, RUCH PO PROSTEJ PRZED FILTRACJĄ.....	82
RYS. 34. KĄT WZGLĘDEM OSI POJAZDU, RUCH PO PROSTEJ PO FILTRACJI (NIEBIESKI) WRAZ Z KĄTEM REFERENCYJNYM (POMARAŃCZOWY).....	83
RYS. 35. KĄT WZGLĘDEM OSI POJAZDU, RUCH PO ŁUKU PRZED FILTRACJĄ.....	84
RYS. 36. KĄT WZGLĘDEM OSI POJAZDU, RUCH PO ŁUKU PO FILTRACJI (NIEBIESKI) WRAZ Z KĄTEM REFERENCYJNYM (POMARAŃCZOWY).....	84
RYS. 37. ARCHITEKTURA SIECI OPARTA NA WARSTWACH.....	88
RYS. 38. STRUKTURA PPDU.....	89
RYS. 39. STRUKTURA PHR.....	89
RYS. 40. RAMKA DANYCH MAC UŻYWANA PRZEZ DW1000 (TRYB KRÓTKIEGO ADRESOWANIA)	90
RYS. 41. PRZYKŁAD OPISU ELEMENTÓW ZNAJDUJĄCYCH SIĘ NA OSM (I) TYP WEJŚCIE DO OBIEKTU PARAMETR GŁÓWNE, (II) TYP BARIERA PARAMETR SZLABAN, (III) TYP RATOWNICTWO PARAMETR HYDRANT OGNIOWY; SZCZEGÓŁOWE PARAMETRY: ŚREDNICA, UMIEJSCOWIENIE, TYP, (IV) TYP UDOGODNIENIA PARAMETR FONTANNA, (V) TYP UDOGODNIENIA; PARAMETR ŁAWKA; DODATKOWE PARAMETRY: OPARCIA, KOLOR, MATERIAŁ, LICZBA MIEJSC, (VI) TYP ŚRODOWISKO NATURALNE; PARAMETR DRZEWO, (VII) TYP UDOGODNIENIA; PARAMETR: WYPOŻYCZALNIA ROWERÓW; DODATKOWE PARAMETRY: POJEMNOŚĆ, NAZWA, SIEĆ, OPERATOR, (VIII) TYP DROGI PARAMETR PRZEJŚCIE DLA PIESZYCH.....	94
RYS. 42. PROPONOWANE RAMKI Z DODATKOWYMI DANYMI OZNACZONYMI KOLOREM ZIELONYM.....	95
RYS. 43. EKSPERYMENTALNIE WYZNACZONY CZAS POTRZEBNY NA PRZEPROWADZENIE TRANSMISJI RAMKI DANYCH POMIĘDZY WĘZŁAMI W SIECI UWB.....	100
RYS. 44. SCHEMAT PRZEMIESZCZENIA ETYKIETOWANYCH OBIEKTÓW W ZALEŻNOŚCI OD TRANSMITOWANYCH DANYCH W TRYBIE ONLINE.....	103
RYS. 45. CZĘSTOŚĆ POZYSKIWANIA DANYCH Z SYSTEMU W KONFIGURACJI 4 – N W ZALEŻNOŚCI OD LICZBY WYMIAROWANYCH OBIEKTÓW.	104

Spis tabel

TAB. 1. PORÓWNANIE METOD POZYCJONOWANIA.	13
TAB. 2. PROPONOWANE WSPÓŁCZYNNIKI KOREKTY FILTRU.	40
TAB. 3. ZESTAWIENIE SCENARIUSZY TESTOWYCH NA POTRZEBY OPRACOWANIA METOD LOGIKI ROZMYTEJ	43
TAB. 4. WARTOŚCI BŁĘDU W POMIARZE ODLEGŁOŚCI DLA ŚRODOWISKA ZEWNĘTRZNEGO I WEWNĘTRZNEGO.....	43
TAB. 5. UZYSKANE ODLEGŁOŚCI PRZY RÓŻNEJ LICZBIE TRANSMITOWANYCH DANYCH DLA ANTENY UMIESZCZONEJ NA DWÓCH WYSOKOŚCIACH.....	45
TAB. 6. WPŁYW LICZBY TRANSMITOWANYCH DANYCH NA OTRZYMYWANE ODLEGŁOŚCI.....	46
TAB. 7. FUNKCJE PRZYNALEŻNOŚCI DO ZMIENNEJ LINGWISTYCZNEJ „LICZBA TRANSMITOWANYCH DANYCH”	48
TAB. 8. PROPOZYCJE ZMIENNYCH LINGWISTYCZNYCH NA POTRZEBY FILTRACJI.	50
TAB. 9. WARTOŚCI ODLEGŁOŚCI [M] PODCZAS POMIARÓW Z WYSTĘPOWANIEM PRZESZKÓD W POSTACI KARTONU, SZKŁA, DREWNA, BETONU I METALU.	63
TAB. 10. WARTOŚĆ RSSI [dBm] PODCZAS POMIARÓW Z WYSTĘPOWANIEM PRZESZKÓD W POSTACI KARTONU, SZKŁA, DREWNA, BETONU I METALU.	64
TAB. 11. PROPONOWANA MODYFIKACJA WSPÓŁCZYNNIKA KOREKTY ODLEGŁOŚCI.	65
TAB. 12. WARTOŚĆ ODCHYLENIA STANDARDOWEGO WZGLĘDEM POZycji REFERENCYJNEJ PRZY RÓŻNYCH PRĘDKOŚCIACH ...	66
TAB. 13. WARTOŚĆ ODCHYLENIA STANDARDOWEGO (W CM) PO FILTRACJI FILTREM MEDIANOWYM.	66
TAB. 14. WARTOŚĆ ODCHYLENIA STANDARDOWEGO (W CM) PO FILTRACJI ŚREDNIĄ KROCZĄCĄ.	67
TAB. 15. WARTOŚĆ ODCHYLENIA STANDARDOWEGO PO FILTRACJI FILTREM SAVITZKY'EGO-GOLAY'A DLA RÓŻNEGO OKNA FILTRU PRZY RÓŻNYCH PRĘDKOŚCIACH – WYRAŻONA W CM	68
TAB. 16. ZESTAWIENIE ODCHYLENIA STANDARDOWEGO DLA OKNA 15 WYRAŻONY W CM.....	69
TAB. 17. WARTOŚCI RMSE [CM] PRZEJAZDÓW ZREALIZOWANYCH SAMOCHODEM.	70
TAB. 18. WARTOŚCI RMSE [CM] DLA DANYCH PRZEFILTROWANYCH ADAPTACYJNIE DLA PRZEJAZDÓW ZREALIZOWANYCH SAMOCHODEM.....	70
TAB. 19. REZULTATY ZASTOSOWANIA KOREKTY BAZUJĄCEJ NA MODELU MAMDANIEGO W ŚRODOWISKU WEWNĘTRZNYM. .	71
TAB. 20. WPŁYW KOREKTY NA DOKŁADNOŚĆ ODLEGŁOŚCI DLA MODELU MAMDANIEGO W ŚRODOWISKU ZEWNĘTRZNYM. ...	73
TAB. 21. KOREKTA ODLEGŁOŚCI DLA RÓŻNEJ LICZBY TRANSMITOWANYCH DANYCH ORAZ WARUNKÓW NLOS W ŚRODOWISKU WEWNĘTRZNYM.	74
TAB. 22. KOREKTA ODLEGŁOŚCI DLA RÓŻNEJ LICZBY TRANSMITOWANYCH DANYCH I WYSTĘPOWANIA WARUNKÓW NLOS W ŚRODOWISKU ZEWNĘTRZNYM.	75
TAB. 23. WYNIKI [CM] DLA KOREKTY OPARTEJ NA MODELU SUGENO DLA ŚRODOWISKA WEWNĘTRZNEGO.	76
TAB. 24. PORÓWNANIE ZMIENNEJ LINGWISTYCZNEJ „LICZBA TRANSMITOWANYCH DANYCH” DLA MODELU MAMDANIEGO ORAZ SUGENO	77
TAB. 25. REZULTATY DLA KOREKTY BAZUJĄCEJ NA MODELU SUGENO W ŚRODOWISKU ZEWNĘTRZNYM.	78
TAB. 26. REZULTATY ZASTOSOWANIA KOREKTY DLA ZMODYFIKOWANEGO MODELU SUGENO DLA ŚRODOWISKA ZEWNĘTRZNEGO.	79
TAB. 27. BŁĄD PO ZASTOSOWANIU KOREKTY BAZUJĄCEJ NA ZMODYFIKOWANYM MODELU SUGENO.	80
TAB. 28. KOMUNIKATY I ICH ROZMIAR, BIORĄCE UDZIAŁ PODCZAS PROCESU OKREŚLANIA ODLEGŁOŚCI PRZEZ WĘZŁY DWM1001 (RADIOAPARAT DW1000).....	90
TAB. 29. LICZBA DOSTĘPNYCH BAJTÓW NA RZECZ DODATKOWEJ TRANSMISJI PRZEZ UŻYTKOWNIKA.	91
TAB. 30. PROPOZYCJA RAMKI UWB DO CELÓW ZNAKOWANIA INFRASTRUKTURY DROGOWEJ W TRYBIE ONLINE.	97
TAB. 31. PROPOZYCJA ROZSZERZONEJ RAMKI UWB DO CELÓW TAGOWANIA INFRASTRUKTURY DROGOWEJ.	98
TAB. 32. CZAS POTRZEBNY NA PRZEPROWADZENIE TRANSMISJI RAMKI DANYCH POMIĘDZY WĘZŁAMI W SIECI UWB.....	99
TAB. 33. CZASY TRANSMISJI DANYCH DLA RAMKI POLL POSZERZONEJ O DODATKOWE DANE	100
TAB. 34. PRĘDKOŚCI PORUSZANIA SIĘ ETYKIETOWANYCH OBIEKTÓW W ŚRODOWISKU MIEJSKIM	102
TAB. 35. PRZEMIESZCZENIE ETYKIETOWANEGO OBIEKTU [CM] DLA TRZECH WARIANTÓW RAMEK.	102
TAB. 36. PROPONOWANE ZASADY STOSOWANIA RÓWNOCZESNEGO WYMIAROWANIA WRAZ Z TRANSMISJĄ DANYCH	106

