



Imię i nazwisko autora rozprawy: Michał Hoefl  
Dyscyplina naukowa: Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

Tytuł rozprawy w języku polskim: Integracja bezprzewodowych heterogenicznych sieci IP dla poprawy efektywności transmisji danych na morzu

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Integration of wireless heterogeneous IP networks to improve data transmission efficiency in maritime environment

Promotor  <i>podpis</i>	Drugi promotor  <i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Józef Woźniak	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>
Promotor pomocniczy  <i>podpis</i>	Kopromotor  <i>podpis</i>
dr inż. Krzysztof Nowicki, prof. PG	<Tytuł, stopień, imię i nazwisko>



## **PODZIĘKOWANIA**

Chciałbym serdecznie podziękować promotorom tej pracy — promotorowi prof. dr hab. inż. Józefowi Woźniakowi oraz promotorowi pomocniczemu dr inż. Krzysztofowi Nowickiemu, prof. PG za inspiracje, wsparcie i prowadzenie, jakie otrzymałem podczas realizacji mojej pracy doktorskiej.

Dziękuję również pracownikom Katedry Teleinformatyki za pomoc, motywację do dalszej pracy i możliwość wspólnej realizacji szeregu badań.

Szczególne podziękowania chciałbym złożyć mojej ukochanej żonie Magdalenie, która zawsze obdarzała mnie nieustającym wsparciem, zaufaniem i wiarą w powodzenie moich prac.



## STRESZCZENIE

Wraz ze wzrostem istotności środowiska morskiego w naszym codziennym życiu np. w postaci zwiększonego wolumenu transportu realizowanego drogą morską, czy zintensyfikowanych prac dotyczących obserwacji i monitoringu środowiska morskiego, wzrasta również potrzeba opracowania efektywnych systemów komunikacyjnych dedykowanych dla tego środowiska. Heterogeniczne systemy łączności bezprzewodowej integrowane na poziomie warstwy sieciowej mogą przynieść istotne korzyści w postaci łatwości wdrożenia, elastyczności, czy zwiększonej skalowalności płynących z ich zastosowania w rozwiązaniach komunikacji morskiej.

Celem prac opisanych w niniejszej rozprawie jest opracowanie i przebadanie mechanizmów integracji heterogenicznych systemów łączności wykorzystywanych w komunikacji na morzu, pozwalających na poprawę efektywności tej komunikacji.

Teza pracy doktorskiej jest następująca *„Integracja heterogenicznych systemów transmisji z wykorzystaniem miękkiego przełączania oraz kodowania sieciowego poprawia efektywność transmisji danych w bezprzewodowych sieciach IP na morzu”*.

Aby udowodnić tę tezę, autor zaproponował rozwiązanie miękkiego przełączania oraz mechanizmy wyboru łącza wspomagane głębokimi sieciami neuronowymi. Dodatkowo przedstawione zostały możliwości zastosowania kodowania sieciowego w zaprezentowanej architekturze systemu obsługi mobilności oraz wskazane zostały korzyści z zastosowania zaproponowanych algorytmów: heurystycznego i uczenia ze wzmocnieniem.

W Rozdziale 1. podkreślono motywację realizacji prac związanych z integracją heterogenicznych sieci IP na potrzeby systemów łączności wykorzystywanych w środowisku morskim. Przedstawiono strukturę rozprawy, wykaz publikacji autora oraz wskazano podjętą w rozprawie tezę.

Rozdział 2. zawiera charakterystykę bezprzewodowych systemów łączności na morzu pozwalających na transmisję danych. Ich możliwości zostały zestawione z wymaganiami narzucanymi przez wewnętrzną architekturę sieci instalowanych na jednostkach pływających oraz definicjami nowych usług e-nawigacji. Dodatkowo określone zostały specyficzne warunki pracy systemów komunikacji morskiej oraz

propozycje nowych systemów będące wynikiem realizacji projektów badawczych związanych z tą tematyką.

W Rozdziale 3. zaprezentowano przegląd mechanizmów obsługi mobilności węzłów w heterogenicznych sieciach bezprzewodowych. W ich kontekście przedstawiono proponowane przez autora rozprawy rozwiązania wyboru łącza wspomagane głębokim uczeniem, które zostały przebadane w środowisku symulacyjnym oraz mechanizmy miękkiego przełączania dostosowane do systemu Proxy Mobile IPv6, które zweryfikowano przy pomocy modelu analitycznego oraz implementacji i testów w środowisku zbliżonym do rzeczywistego.

Propozycja rozszerzenia opisanego w Rozdziale 3. rozwiązania zarządzania mobilnością węzłów o mechanizmy kodowania sieciowego, została zaprezentowana w Rozdziale 4. Na potrzeby analizy korzyści z zastosowania zaproponowanego rozwiązania zarówno w scenariuszu, w którym węzeł wykorzystuje jeden interfejs, jak i takich, w których do dyspozycji węzła jest kilka interfejsów, dostosowano model oszacowania przepływności połączeń TCP Cubic, do środowiska pracy zaproponowanych algorytmów – algorytmu heurystycznego oraz algorytmu uczenia ze wzmocnieniem.

Rozdział 5. zawiera analizę wpływu przerw w łączności na przepływność połączeń TCP. Na podstawie przeprowadzonych w środowisku rzeczywistym pomiarów wskazano istotne czynniki wpływające na pogorszenie średniej przepływności połączeń TCP oraz zaproponowano usprawnienia poprawiające ich efektywność.

Podsumowanie zrealizowanych prac, wskazanie najważniejszych osiągnięć oraz dalszych kierunków badań zostały przedstawione w Rozdziale 6.

Zaprezentowane wyniki potwierdzające zwiększenie efektywności komunikacji na morzu poprzez zastosowanie rozwiązań integrujących heterogeniczne sieci IP potwierdzają tezę przyjętą w rozprawie.

## SUMMARY

As the maritime environment becomes more and more important in our every-day life, because of, for example, increased volumes of maritime trade or observation and monitoring of the maritime ecosystems, the need to develop effective communication systems to be used in this environment also increases. Heterogeneous wireless communication systems integrated at the network layer can bring significant benefits in this case, due to their ease of deployment, flexibility and increased scalability being highly useful in maritime communication systems.

The aim of this dissertation is to develop and evaluate mechanisms for integrating heterogeneous communication systems used in maritime communications, allowing their efficiency to be improved.

The thesis of the dissertation is as follows "*The integration of heterogeneous transmission systems using soft handover and network coding improves the efficiency of data transmission in wireless IP networks at sea*".

In order to prove this thesis the author of the dissertation proposed a handover mechanism utilizing a soft-handover approach and link-selection methods supported by deep learning. In addition, a possibility of applying a network coding approach in the presented architecture of the mobility management system has been presented, complete with benefits of its application by means of both heuristic and reinforcement learning methods.

Chapter 1 presents an introduction describing the motivation for conducting research related to integration of heterogeneous IP networks in communication systems used in the maritime environment. Moreover, it presents the structure of the dissertation, a list of the author's publications and the thesis of the dissertation.

Chapter 2 includes the characteristics of wireless maritime communication systems designed for data transmission. Their capabilities are compared with the requirements imposed by the architecture of internal networks of maritime vessels and definitions of new e-navigation services. The specific conditions of maritime communication environment are also described, as well as proposals of new systems – results of research projects related to this topic.

Chapter 3 presents taxonomy and overview of mobility management mechanisms intended for heterogeneous wireless networks. In this context, deep learning approaches for wireless link selection are proposed by the author. They were evaluated in a simulation environment taking into account characteristics of the maritime communication environment. Moreover, soft-handover mechanisms intended for the Proxy Mobile IPv6 mobility management systems are introduced. These mechanisms were verified using an analytical model, as well as by implementation and testing in a real-world environment.

Network coding mechanisms, designed to enhance of the mobility management solution described in Chapter 3, are presented in Chapter 4. To evaluate the proposed solutions in scenarios with single and multiple interfaces with a heuristic and a reinforcement learning algorithms, a model for estimating the TCP Cubic throughput was adapted to the operating environment of the proposed mechanisms.

Chapter 5 includes analysis of the impact of connectivity gaps on TCP connection throughput. Based on results from measurements conducted in a real-world environment, significant factors affecting the deterioration of the average throughput of TCP connections were identified, and dedicated adjustments to improve their efficiency were proposed.

A summary of conducted works, a list of the most important achievements and highlights of further research directions are presented in Chapter 6.

The presented results confirming the increase in the maritime communication efficiency through the use of the proposed solutions integrating heterogeneous IP networks prove the dissertation thesis.



## SPIS TREŚCI

---

1	Wstęp .....	13
2	Komunikacja w środowisku morskim – uwarunkowania i wykorzystywane systemy .....	23
2.1	Architektura sieć wewnętrznej jednostek pływających .....	24
2.2	Usługi IMO .....	26
2.3	Modelowanie środowiska propagacyjnego .....	31
2.4	Systemy łączności wykorzystywane w komunikacji morskiej .....	40
2.4.1	VDES – VHF Data Exchange System .....	40
2.4.2	TRITON .....	47
2.4.3	netBaltic .....	51
2.4.4	BlueCom .....	55
2.4.5	LTE-MARITIME .....	55
2.4.6	MagicNet .....	56
3	Wybór optymalnego interfejsu sieciowego w przypadku sieci o zróżnicowanych technikach transmisji .....	57
3.1	Obsługa mobilności węzłów – taksonomia .....	58
3.2	Mechanizmy obsługi przełączeń wertykalnych .....	60
3.2.1	Faza gromadzenia informacji .....	61
3.2.2	Faza podjęcia decyzji o przełączeniu .....	62
3.2.3	Faza realizacji przełączenia .....	63
3.3	Problem wyboru łącza – techniki decyzyjne .....	64



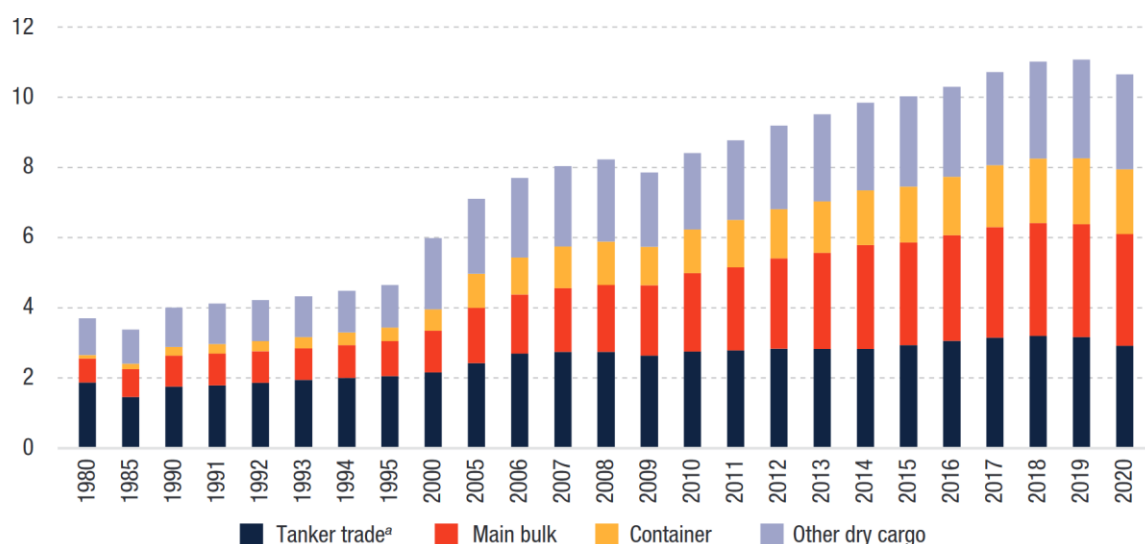
3.3.1	Wielokryterialne metody wspomagające podjęcie decyzji .....	65
3.4	Rozwiązania wykorzystujące sieci neuronowe .....	69
3.5	Ocena efektywności wybranych metod selekcji łącza .....	74
3.5.1	Środowisko symulacyjne .....	75
3.5.2	Miary oceny metody selekcji łącza.....	79
3.5.3	Wybór na łącza na podstawie parametrów warstwy transportowej.....	81
3.5.4	Wybór łącza wspomagany głębokimi sieciami neuronowymi .....	86
3.6	Efektywne metody przełączania w heterogenicznym środowisku komunikacji morskiej.....	97
3.6.1	Poprawa efektywności przełączania PMIPv6 .....	103
3.6.2	Ocena efektywności proponowanego rozwiązania przełączania .....	107
3.6.3	Weryfikacja opracowanej metody przełączania w środowisku rzeczywistym .....	114
3.7	Zastosowanie proponowanego rozwiązania w systemie netBaltic .....	119
3.7.1	Obsługiwane scenariusze przełączania .....	121
3.8	Integracja i weryfikacja działania proponowanych rozwiązań .....	124
4	Kodowanie sieciowe w architekturze mechanizmów zarządzania mobilnością jako metoda poprawy jakości transmisji.....	131
4.1	Kodowanie sieciowe .....	132
4.2	Model TCP Cubic z wykorzystaniem procesu Markova .....	135
4.3	Zastosowanie kodowania przy jednym interfejsie .....	144
4.4	Kodowanie przy wykorzystaniu wielu interfejsów bezprzewodowych .....	153

4.4.1	Heurystyczny algorytm rozlokowania symboli na poszczególnych interfejsach.....	155
4.4.2	Wpływ błędu pomiarowego na efektywność algorytmu .....	160
4.4.3	Algorytm uczenia ze wzmocnieniem.....	162
5	Optymalizacja zasad pracy i parametrów protokołu TCP w warunkach morskich .	171
5.1	System testowy.....	174
5.2	Wyniki badań .....	178
6	Wnioski końcowe.....	185
6.1	Kierunki dalszych prac.....	187
	Spis ilustracji.....	189
	Spis tabel.....	195
	Bibliografia .....	197
	Wykaz najważniejszych oznaczeń i symboli.....	217
	Wykaz skrótów .....	223



## 1 WSTĘP

Systemy radiowej łączności morskiej z każdym rokiem zyskują na znaczeniu ze względu na zarówno wzrost aktywności człowieka na obszarach mórz i oceanów związany z żeglugą morską i logistyką, rybołówstwem, poszukiwaniem i eksploatacją na morzu złóż gazu i ropy naftowej, budową farm wiatrowych czy turystyką, jak też z powiązanymi z tymi aktywnościami potrzebami odnośnie zagwarantowania bezpieczeństwa i efektywności żeglugi na różnych akwenach oraz zapewnienia ciągłej komunikacji z jednostkami i obiektami na morzu. Szacuje się, że transport morski stanowi 80-90% światowych przewozów [1], a rozwijany od dekad pozwolił na zwiększenie ilości przesyłanych przy jego pomocy towarów blisko trzykrotnie na przestrzeni ostatnich czterdziestu lat (Rys. 1.1), co sprawia, że odgrywa on istotną rolę w rozwoju światowej gospodarki.



Rys. 1.1 Międzynarodowy handel morski według rodzajów ładunków (wyrażonych w milionach ton ładunków) [2]

Aby dalszy rozwój tej części gospodarki był możliwy, konieczne staje się stałe ulepszanie i rozbudowywanie różnorodnych środków łączności radiowej, dostosowanych do warunków i wymagań komunikacyjnych na morzu (różnorodnych, często alternatywnych, systemów łączności naziemnej i satelitarnej). W szczególności niezbędne staje się usprawnianie procesów logistycznych, dzięki którym operatorzy portowi są w stanie efektywnie przetwarzać dane powiązane z tymi procesami. W tym celu podmioty odpowiedzialne za logistykę portową w coraz większym zakresie dokonują cyfryzacji realizowanych procedur, włączając w nie wymianę informacji między klientami, firmami

spedycyjnymi, dostawcami i innymi partnerami [2], w tym w coraz większym stopniu z obiektami na morzu.

Wykorzystanie nowych technik i technologii w procesach logistycznych transportu morskiego wskazywane jest jako jeden z kluczowych czynników pozwalających na usprawnienie, wzrost i zwiększenie efektywności tego transportu. Jak podano w raporcie [3], niezawodna i efektywna łączność stanowi jeden z istotnych komponentów systemów zarządzania portami, które pozwalają nie tylko na zwiększenie wydajności ich pracy, ale także na utrzymanie ciągłości działania w przypadku wystąpienia dodatkowych i niespodziewanych utrudnień, czego doskonałym przykładem była sytuacja związana z pandemią spowodowaną COVID-19. Poszukiwanie nowych rozwiązań w zakresie zwiększenia możliwości cyfryzacji (digitalizacji) obsługiwanych procesów, których istotnym elementem jest zapewnienie łączności pomiędzy zainteresowanymi stronami, widoczne jest w działaniach wielu zarządów portów morskich. Przykładem może być tutaj Port Morski w Gdańsku, w którego Strategii 2030 uwzględniono proces digitalizacji obejmujący adaptację nowych form łączności i wskazano takie działanie jako jeden z kluczowych obszarów rozwoju tej instytucji.

Efektywne wykorzystanie systemów komunikacji morskiej jest istotne nie tylko ze względu na realizowane procedury logistyczne, ale również, a może przede wszystkim, z uwagi na konieczność poprawy bezpieczeństwa osób pracujących na morzu. Aspekt ten podnoszony jest przez społeczność skupioną wokół organizacji takich jak IMO (*International Maritime Organization*) czy IALA (*International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities*), które w ramach swojej działalności starają się zaproponować usługi wpływające korzystnie na bezpieczeństwo żeglugi i pracy na morzu. Szereg procedur, rozwiązań technicznych i aplikacji ujętych w definicji *e-nawigacji* zaproponowanej przez IMO jako „*zharmonizowane procesy zbierania, wymiany i prezentacji informacji za pomocą elektronicznych środków w celu usprawnienia podróży, zarówno po stronie jednostki pływającej, jak i obsługi lądowej oraz służb zapewniających bezpieczeństwo i ochronę na morzu*” [4] nie mogą być realizowane bez dostępnego, stosunkowo taniego i oferującego relatywnie duże przepustowości systemu komunikacji. Brak tego typu systemu łączności jest wskazywany jako jedna z głównych przyczyn hamujących rozwój rozwiązań e-nawigacji [5].

Rekomendowane i powszechnie wykorzystywane wąskopasmowe rozwiązania oraz specjalizowane aplikacje do radiowej komunikacji na morzu, chociaż zaprojektowane w sposób dedykowany na potrzeby środowiska morskiego, nie oferują wystarczającej przepustowości, która mogłaby sprostać wymaganiom nowo proponowanych aplikacji i promowanych usług e-nawigacji. Zestawienie podstawowych systemów łączności pozwalających na realizację transmisji danych zaprezentowano w Tabeli 1.1. Niewielkie możliwości tych rozwiązań powodują, że istotne stało się poszukiwanie nowych mechanizmów, które pozwolą sprostać wymaganiom usług e-nawigacji będących obecnie w fazie standaryzacji i doprecyzowywania.

**Tabela 1.1 Oferowane parametry łączności do wybranych systemów radiowych stosowanych na morzu [6]**

System	Sposób komunikacji	Przepustowość
NAVEX	HF, MF	300 b/s
DSC	VHF	1.2 kb/s
GPS	NMEA 0183	4.8 kb/s
AIS	VHF	2x9.6 kb/s
EPIRB	Krótkie wiadomości (łączność satelitarna)	100 bity/godz.
SSAS	Krótkie wiadomości (łączność satelitarna)	100 bity/dzień
SafetyNET	NAVTEX	100 wiadomości/dzień

Analizując różnorodne propozycje pojawiające się w kontekście szerokopasmowych systemów łączności na morzu, zauważamy wyraźny trend stopniowego rozszerzania wyposażenia jednostek pływających o różnorodne szerokopasmowe techniki transmisji wykorzystywane wcześniej na lądzie. Z licznych badań, w tym prac własnych autora wynika, że płaszczyzną, w której te różnorodne rozwiązania mogą zostać połączone i wykorzystywane wspólnie jako jeden system, jest warstwa sieciowa modelu ISO/OSI z wykorzystywanym tam protokołem IP (*Internet Protocol*).

Systemy satelitarne, chociaż uniwersalne i oferujące prawie globalny zasięg, dla wielu odbiorców są rozwiązaniem zbyt kosztownym. Korzyści wynikające z możliwości odciążenia systemów satelitarnych przez instalacje przybrzeżne, komplementarne dla rozwiązań satelitarnych są istotne, a rozwiązania, które będą na to pozwalały, stanowią przedmiot intensywnych prac wielu zespołów badawczych. Przykładem takiego

rozwiązania może być system ORCHESTRA rozszerzający usługi satelitarnej transmisji danych systemu Inmarsat o możliwość wykorzystania sieci przybrzeżnych i sieci wieloskokowych. Pierwsze testy takiego systemu planowane są na koniec roku 2022 w Singapurze [7].

Tradycyjne systemy transmisji, gwarantujące szersze pasmo i niższe koszty eksploatacji, mogą być z powodzeniem wykorzystane na akwenach przybrzeżnych oraz na szlakach komunikacyjnych o wystarczającej gęstości jednostek pływających. Można przy tym założyć, że w przypadku tego typu rozwiązań możliwe będzie wdrażanie rozwiązań transmisji wieloetapowej z jednostek, czy dowolnego obiektu na morzu do stacji brzegowych i odwrotnie.

Mając na uwadze, z jednej strony, rosnącą potrzebę dostępnej, szerokopasmowej komunikacji na morzu, która będzie w stanie spełniać m.in. wymagania usług e-nawigacji, z drugiej zaś, ograniczoność obecnie stosowanych rozwiązań, celem niniejszej rozprawy jest:

- kompleksowa analiza możliwości i wymagań odnośnie szerokopasmowej komunikacji na morzu oraz
- zaproponowanie i dogłębne przebadanie propozycji rozwiązania pozwalającego na efektywną komunikację pomiędzy stacjami na brzegu oraz urządzeniami zainstalowanymi na jednostkach pływających, znajdujących się na wybranych akwenach morskich.

Założono przy tym, że w tak zdefiniowanym systemie istnieje zawsze możliwość wykorzystania jednej lub kilku dostępnych technik transmisyjnych, a warunkiem podstawowym, dotyczącym każdej z wykorzystywanych technik, jest możliwość przenoszenia ruchu IP.

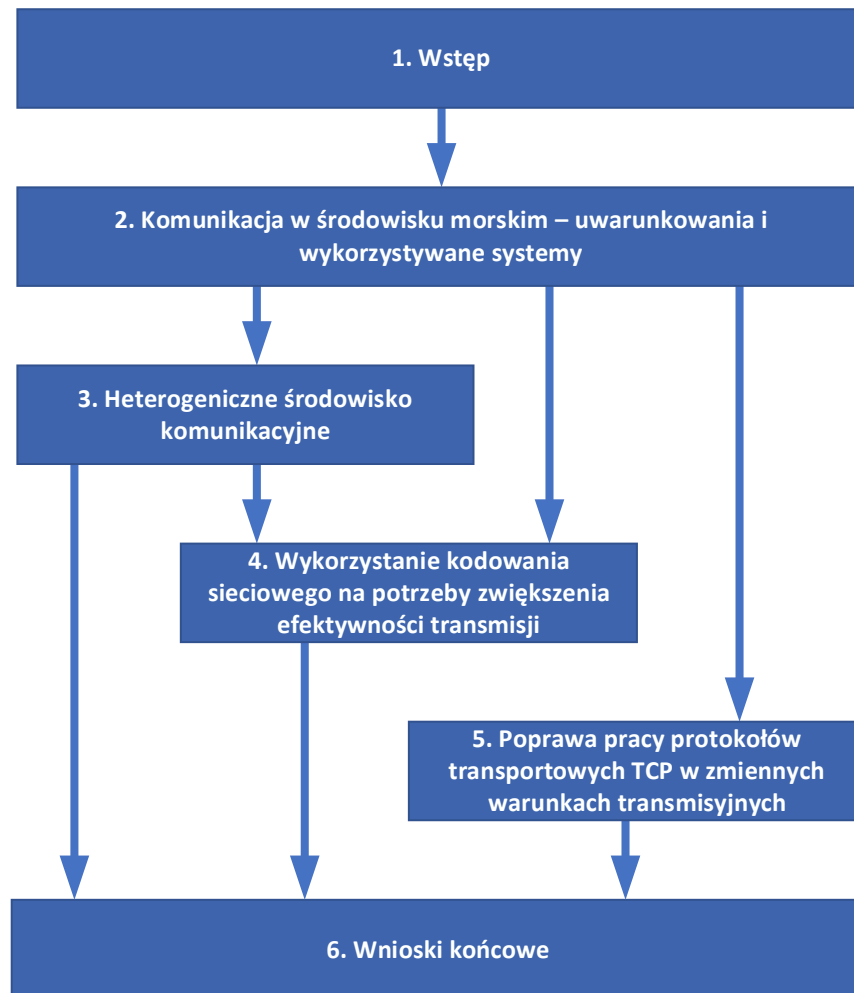
Teza rozprawy została zdefiniowana następująco:

***Integracja heterogenicznych systemów transmisji z wykorzystaniem miękkiego przelączania oraz kodowania sieciowego poprawia efektywność transmisji danych w bezprzewodowych sieciach IP na morzu.***

W dalszej części rozprawy podjęto szereg działań, zmierzających do zaprojektowania i kompleksowej analizy propozycji mechanizmów integracji



heterogenicznej sieci szerokopasmowej i mających na celu wykazanie poprawności powyższej tezy. Podjęte prace badawcze zilustrowane zostały na Rys. 1.2 - pokazującym jednocześnie schemat powiązań pomiędzy zawartością poszczególnych rozdziałów pracy.



Rys. 1.2 Schemat powiązań pomiędzy poszczególnymi rozdziałami pracy

W **Rozdziale 2.** przedstawiono poszerzoną charakterystykę pracy teleinformatycznych systemów łączności na morzu, opisano wewnętrzną architekturę sieci instalowanych na jednostkach pływających, zdefiniowano proponowane usługi e-nawigacji oraz opisano warunki propagacyjne, związane z pracą systemów łączności na morzu – aspekty te zostały uwzględnione w modelu symulacyjnym wykorzystanym w Rozdziale 3. W podsumowaniu dostępnych rozwiązań i stanu sztuki (*state of the art*) przedstawiona została dodatkowo analiza standaryzowanych systemów transmisji danych oraz opis rozwiązań proponowanych w wybranych projektach badawczych.

W **Rozdziale 3.** dokonano przeglądu rozwiązań dotyczących obsługi mobilności w sieciach heterogenicznych, opisując analizowane mechanizmy zgodnie z przyjętym podziałem na fazę gromadzenia danych, podjęcia decyzji o przełączeniu i realizacji samego przełączenia. Dodatkowo zaprezentowane zostały wyniki zaproponowanej metody wyboru łącza wspomaganą siecią neuronową jako rozwiązanie problemów pojawiających się w fazie podejmowania decyzji. Ponadto, w dalszej części rozdziału zaproponowany został mechanizm efektywnego przełączania stanowiący rozszerzenie protokołu Proxy Mobile IPv6 o możliwość realizacji miękkiego przełączania. Rozwiązanie to zostało ocenione analitycznie, porównane z innymi konkurencyjnymi protokołami, a następnie zaimplementowane i przetestowane w środowisku zbliżonym do rzeczywistego.

W **Rozdziale 4.** zaproponowane zostało rozszerzenie heterogenicznej struktury sieciowej o możliwość użycia kodowania sieciowego, które pozwala na poprawę efektywności transmisji połączenia TCP (*Transmission Control Protocol*). Wykazane zostały korzyści wynikające z zastosowania zaproponowanego mechanizmu w scenariuszu transmisji danych przy wykorzystaniu jednego interfejsu oraz w scenariuszu, w którym możliwa jest transmisja równoległa przy pomocy wielu interfejsów. Na potrzeby przeprowadzonych badań dostosowano model przepływności połączeń realizowanych z wykorzystaniem protokołu TCP w wariacie Cubic, do środowiska pracy zaproponowanych algorytmów – algorytmu heurystycznego oraz algorytmu uczenia ze wzmocnieniem.

W **Rozdziale 5.** dokonano analizy wpływu falowania morza i wynikających z tego ruchów jednostek pływających, "nakładających się" na warunki propagacyjne i wpływających w szczególności na efektywność połączeń TCP. Na podstawie danych zgromadzonych w trakcie pomiarów w środowisku rzeczywistym, zaproponowano rozszerzenie implementacji protokołu TCP i jego niestandardową konfigurację pozwalającą na poprawę efektywności transmisji danych.

**Rozdział 6.** stanowi podsumowanie rozprawy ze wskazaniem najważniejszych jej osiągnięć oraz przedstawienie propozycji dalszych prac związanych z prezentowaną tematyką.

Część z przedstawionych w rozprawie wyników i rozwiązań została opublikowana w czasopiśmie naukowych i zaprezentowana w referatach konferencyjnych. Do najważniejszych publikacji związanych z tematyką pracy zaliczyć można:

1. Woźniak J., Machan P., Gierłowski K., **Hoef M.**, Lewczuk M.: *Comparative Analysis of IP-Based Mobility Protocols and Fast Handover Algorithms in IEEE 802.11 Based WLANs*, Computer Networks. Springer Berlin Heidelberg, s. 87–101, 2011 [8]
2. **Hoef M.**, Gierłowski, K., Gierszewski, T., Konorski, J., Nowicki, K., & Woźniak, J.: *Measurements of QoS/QoE parameters for media streaming in a PMIPv6 testbed with 802.11 b/g/n WLANs*. Metrology and Measurement Systems, nr 2, s. 283-294. 2012 [9]
3. Woźniak, J., Gierłowski, K., Gierszewski, T., **Hoef M.** *Zarządzanie mobilnością w nowoczesnych sieciach IP Część I: Potrzeby, wymagania i podstawowe rozwiązania//Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*, nr 8-9, s. 626-63. 2012 [10]
4. Woźniak J., Gierłowski K., Gierszewski T., **Hoef M.**: *Zarządzanie mobilnością w nowoczesnych sieciach IP. Część II — Modyfikacje i optymalizacje mechanizmów mobilności// Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*. -, nr 1, s.3-12, 2013 [11]
5. **Hoef M.**, Woźniak J.: *A Test-Bed Analysis of Simultaneous PMIPv6 Handover in 802.11 WLANs Environment// Ad-hoc, Mobile, and Wireless Network/ ed. eds. J. Cichoń; M. Gębała; M. Klonowski Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s.221-232, 2013 [12]*
6. **Hoef M.**, Kaminski P., Wozniak, J.: *Logical Interface for Soft Handover – An Effective Scheme of Handovers in Proxy Mobile IPv6*; 8th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2015, s.72-79, 2015 [13]
7. **Hoef M.**, i in.: *netBaltic – a heterogeneous wireless communications system over the Baltic Sea*; 1st Baltic Earth Conference, Silke Köppen Geesthacht, Germany: International Baltic Earth Secretariat Publications, 2016, s.74-75, [14]
8. **Hoef M.**, Gierłowski K., Woźniak J.: *Heterogeniczny system bezprzewodowej łączności na Morzu Bałtyckim*; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9, s.1196-1200, 2016 [6]
9. **Hoef M.**, Gierłowski K., Woźniak J.: *Mechanizmy zarządzania mobilnością węzłów w systemie netBaltic*; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 12, s.1312-1315, 2016 [15]
10. Woźniak J., **Hoef M.**: *Cel i główne zadania badawcze projektu netBaltic*; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 12, s.1301-1303, 2016 [16]
11. **Hoef M.**, Woźniak J.: *Evaluation of Connectivity Gaps Impact on TCP Transmissions in Maritime Communications// Computer Networks/ ed. Gaj P., Kwiecień A., Sawicki M. Gliwice: Springer International Publishing, s.91-105, 2017 [17]*

12. **Hoef M.**, Gierłowski K., Bronk K., Lipka A., Niski R., Żurek K.: *A heterogenous wireless system for maritime communication — the netBaltic system architecture*; 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Warszawa, 29-31 maja, 2017 [18]
13. Wozniak J., Gierłowski K., **Hoef M.**: *Broadband communication solutions for maritime ITSs: Wider and faster deployment of new e-navigation services*, 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Warszawa, 29-31 maja, 2017 [19]
14. **Hoef M.**, Gierłowski K.: *Heterogeniczne środowisko testowe na potrzeby weryfikacji mechanizmów systemu netBaltic*; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3, s. 64-67, 2018 [20]
15. Woźniak J., Gierłowski K., **Hoef M.**, Lewczuk M.: *Szerokopasmowe systemy komunikacyjne na morzu : scenariusze użycia i przykładowe instalacje*// Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne. -, nr 8-9, s.545-567, 2018 [21]
16. **Hoef M.**, Woźniak J.: *Mechanizmy obsługi mobilności węzłów systemu netBaltic wykorzystujące heterogeniczne systemy transmisji bezprzewodowej*; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3, s. 40-46, 2018 [22]
17. **Hoef M.**, Gierłowski K., Rak J., Woźniak J.: *netBaltic System-Heterogenous Wireless Network for Maritime Communications*// Polish Maritime Research. -Vol. 25, iss. 2 s.14-26, 2018, JCR [23]
18. Woźniak J., **Hoef M.**, Gierłowski K., Nowicki K.: *Projekt netBaltic - cele i zaproponowane rozwiązania*; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3, s. 31-34, 2018 [24]
19. Perwejn D., **Hoef M.**, Woźniak J.: *Propozycja optymalizacji wyboru interfejsu bezprzewodowego w heterogenicznej sieci dostępowej*// Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne. -, iss. 4, s.83-91, 2019 [25]
20. **Hoef M.**, Gierłowski K., Rak J., Woźniak J., Nowicki K.: *Non-Satellite Broadband Maritime Communications for e-Navigation Services*// IEEE Access - vol. 9, s.62697-62718, 2021, JCR [31]
21. Gierłowski K., **Hoef M.**, Wichorowski M.: *A wireless network for off-shore marine research*// Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata -Vol. 62, s.261-263, 2021 JCR [26]
22. **Hoef M.**, Gierłowski K., Wichorowski M.: *Remote command and control capabilities for data acquisition systems provided by delay-tolerant network mechanisms*// Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata -Vol. 62, s.266-268, 2021, JCR [27]
23. Stączny A., Gierłowski K., **Hoef M.**: *Wireless Local Area Network Technologies as Communication Solutions for Unmanned Surface Vehicles, Sensors*, vol. 22, nr 2, s. 655, 2022, JCR [28]
24. **Hoef M.**, Gierłowski K., Wozniak J.: *Wireless Link Selection Methods for Maritime Communication Access Networks—A Deep Learning Approach, Sensors*, vol. 23, nr 1, s. 400, 2022, JCR [29]

W artykułach [8, 10, 11] przedstawiono analizę porównawczą różnych rozwiązań obsługi mobilności terminali ruchomych w sieciach IP oraz propozycje usprawnień protokołu *Proxy Mobile IPv6* (PMIPv6) [12, 9]. Możliwości tradycyjnych systemów komunikacji na morzu oraz wymagania pojawiających się usług zostały zaprezentowane w pracach [19, 21, 14, 6, 30]. Realizacja tych badań pozwoliła autorowi rozprawy na zdobycie wiedzy i doświadczenia niezbędnych do opracowania mechanizmów proponowanych w rozprawie, z których część opisana została w [13, 15, 22, 25]. Opis środowiska symulacyjnego oraz sposób wykorzystania sieci neuronowych jako narzędzia wspomagającego wybór interfejsu w heterogenicznym systemie komunikacji morskiej zostały przedstawione w [29]. Umiejscowienie zaproponowanych mechanizmów w szerszym kontekście, całego systemu dedykowanego komunikacji na morzu — opracowanemu w ramach projektu netBaltic, zostało przedstawione w [24, 18, 23, 30]. Weryfikacja części rozwiązań zaproponowanych w rozprawie realizowana była w środowisku zbliżonym do rzeczywistego w postaci dedykowanej instalacji opisanej w [20]. Analiza efektywności transmisji oraz zaproponowane modyfikacje protokołu TCP zostały opisane w [17]. Integracja mechanizmów wspomagających transmisję danych z aplikacjami wykorzystywanymi do realizacji prac badawczych prowadzonych przez Instytut Oceanologii PAN na statku *r/v Oceania* opisane zostały w [27, 26]. Kierunki dalszych prac związanych z integracją różnych rozwiązań komunikacyjnych na poziomie sieci IP – zastosowania proponowanych mechanizmów na potrzeby łączności z autonomicznymi jednostkami pływającymi zostały opisane w [28].

Dodatkowo, autor rozprawy był zaangażowany w już zakończonych lub jest wykonawcą w następujących projektach badawczych, których zakres realizowanych prac powiązany jest z tematyką rozprawy:

- Internet na Bałtyku — realizacja wielosystemowej, samoorganizującej się szerokopasmowej sieci teleinformatycznej na morzu dla zwiększenia bezpieczeństwa żeglugi poprzez rozwój usług e-nawigacji (PBS3/A3/20/2015)
- PL-LAB2020: Infrastruktura badawcza dla badań w obszarze programu Horyzont 2020 (POIG.02.03.01-00-104/13-00),

- Brak możliwości zapewnienia dostępu i współdzielenia danych pomiarowych oraz danych oceanograficznych, a także możliwości zarządzania infrastrukturą badawczą w trakcie badań naukowych prowadzonych z wykorzystaniem jednostek pływających oraz pław w strefie znajdującej się poza zasięgiem powszechnie dostępnych środków łączności (WG-POPC.03.03.00-00-0008/16-00),
- PL-5G: Krajowe laboratorium sieci i usług 5G wraz z otoczeniem (POIR.04.02.00-00-D008/20-00).

## **2 KOMUNIKACJA W ŚRODOWISKU MORSKIM – UWARUNKOWANIA I WYKORZYSTYWANE SYSTEMY**

---

Szybsze i powszechniejsze wdrażanie nowych usług i aplikacji dedykowanych środowisku morskemu, m.in. szeroko rozumianych rozwiązań e-nawigacji, jest istotnie ograniczane przez brak systemów łączności, które oferowałyby wysoką przepustowość, były niezawodne oraz dostępne dla szerokiej grupy odbiorców uwzględniające nie tylko duże jednostki pływające [19] [31]. Wykorzystywane obecnie systemy komunikacji na morzu to w zdecydowanej większości rozwiązania wąskopasmowe (poza wybranymi rozwiązaniami satelitarnymi) służące do łączności stacji bazowych ulokowanych na lądzie z jednostkami pływającymi lub też bezpośredniej komunikacji pomiędzy takimi jednostkami. Jako rozwiązania zaprojektowane wiele lat temu, oferują możliwości transmisji danych o istotnych ograniczeniach, w szczególności z niewielkimi przepływnościami pozwalającymi na wolną transmisję wiadomości o bardzo ograniczonym rozmiarze, przez co zawierających jedynie podstawowe dane, dotyczące głównie krytycznych usług związanych z bezpieczeństwem żeglugi [6].

Poszukiwanie efektywnych rozwiązań, które byłyby w stanie sprostać nowym wymaganiom, wiąże się zarówno z analizą stanu obecnego jak też pogłębioną analizą uwarunkowań, w których takie systemy miałyby pracować. Najważniejsze z tych uwarunkowań zostały zaprezentowane w tym rozdziale.

Sieci wewnętrzne jednostek pływających, jako specyficzne i integrujące niejednokrotnie dedykowane komponenty wspomagające systemy bezpieczeństwa, opisane zostały w kolejnym punkcie rozdziału. Razem z opisem proponowanych do wdrożenia usług, mających na celu usprawnienie szeregu procedur związanych z gospodarką morską oraz warunków propagacyjnych, z którymi muszą zmierzyć się systemy łączności na morzu, pozwolą one na pełniejszą charakterystykę uwarunkowań pracy tego typu systemów.

Grupą systemów, które oferują prawie globalny zasięg są rozwiązania satelitarne nisko i wysokoorbitowe. Systemy takie, z których część została zaprojektowana na potrzeby łączności morskiej, nie spełniają jednak w pełni kryterium dostępności dla szerokiej grupy odbiorców – są na tyle drogie, że ich powszechne wykorzystanie, również przez mniejsze niekomercyjnie jednostki pływające, poruszające się okazjonalnie, nie jest opłacalne kosztowo. Autor rozprawy nie poddaje pod wątpliwość użyteczności takich

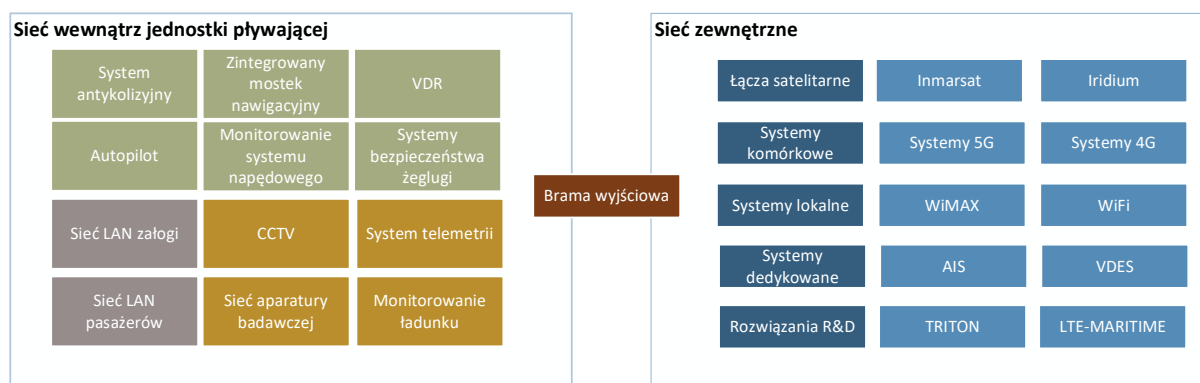
rozwiązań dla zapewnienia bezpieczeństwa żeglugi oraz możliwości realizacji przez nie przekazów szerokopasmowych. Dostrzega jednak możliwość użycia alternatywnych rozwiązań łączności, wszędzie tam, gdzie pozwala na to zasięg systemów tradycyjnie wykorzystywanych jako naziemne, nawet przy założeniu realizacji klasycznych dla sieci teleinformatycznych przekazów wieloetapowych z techniką store-and-forward. Korzyści wynikające z zastosowania tego typu rozwiązań oraz scenariusze, w których mogą być one szczególnie istotne, zostały opisane w dalszej części rozdziału.

Wykorzystanie tradycyjnych, lądowych technik transmisji jest obiecującą koncepcją, coraz częściej rozważaną w różnego rodzaju pracach badawczych i wdrożeniowych. Jako że bezpośrednio wykorzystanie tego typu rozwiązań, niedostosowanych od warunków morskich, nie spełnia większości stawianych im wymagań ([32], [33], [34], [35]), niezbędne jest opracowanie dedykowanych rozwiązań podnoszących ich efektywność. Szereg tego typu propozycji zostało opisanych w ostatnim punkcie rozdziału.

## **2.1 ARCHITEKTURA SIEĆ WEWNĘTRZNEJ JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH**

Niejednokrotnie wewnętrzne sieci teleinformatyczne jednostek pływających są złożonymi strukturami sieciowymi składającymi się z różnorodnych komponentów o specyficznej funkcjonalności, integrującej w sobie szereg różnorodnych podsystemów, np. tych dedykowanych bezpieczeństwu żeglugi, czy telemetrii układów napędowych, z których każdy może wykorzystywać różne rozwiązania protokolarne. Oczywiście architektura konkretnego wdrożenia, rozumiana jako sposób łączenia wykorzystywanych technik i usług teleinformatycznych, zależeć będzie od szeregu czynników, m.in. podejścia konkretnego armatora, rodzaju i przeznaczenia jednostki pływającej, tego, czy i w jakim zakresie ma ona być autonomiczna oraz tego, jaka infrastruktura (np. aparatura badawcza) wykorzystywana jest na danym statku. Potrzeba integracji różnorodnych elementów komunikacyjnych jest na tyle specyficzna, że znalazła odzwierciedlenie w terminie *ship area network*, który swoją definicją obejmuje zbiór mechanizmów pozwalających na integrację tych zróżnicowanych komponentów [36]. Patrząc jednak ogólnie na tego typu architektury, w sieci wewnętrznej jednostki pływającej wyróżnić można komponenty zaprezentowane na Rys. 2.1.





Rys. 2.1 Komponenty sieci wewnętrznej jednostki pływającej

Na rysunku wyszczególniono trzy typy komponentów składowych, które mogą zostać wyszczególnione w sieci wewnętrznej statku [37] [38] [39]:

- Komponent odpowiedzialny za bezpieczeństwo żeglugi – obejmuje on kluczowe komponenty o podwyższonych wymaganiach dotyczących łączności pomiędzy nimi. Możemy do nich zaliczyć systemy antykolizyjne zbierające dane z różnego rodzaju sensorów, czujników i radarów, system autopilota, system rejestracji danych podróży *Voyage Data Recorder* (VDR), ogólnie przyjęte i ustandaryzowane systemy bezpieczeństwa żeglugi, jak *Global Maritime Distress and Safety System* (GMDSS) oraz systemy związane z nawigacją (zintegrowany mostek nawigacyjny), czy monitorowaniem systemu napędowego. Ze względu na dużą istotność tych elementów łączność pomiędzy nimi realizowana jest z wykorzystaniem mechanizmów redundancji, a dostęp z sieci wewnętrznej jest szczególnie chroniony.
- Komponent odpowiedzialny za prawidłowe funkcjonowanie jednostki pływającej – należą do niego elementy o mniejszym znaczeniu, zwłaszcza w kontekście bezpieczeństwa, jednak nadal istotne w ogólnym spojrzeniu na funkcjonowanie jednostki pływającej. Grupa ta obejmuje podsystemy wewnętrznego intercomu, monitoringu CCTV (*Closed-Circuit TeleVision*), systemów telemetrycznych, systemów monitorowania stanu ładunku, czy sieć łączącą aparaturę badawczą.
- Komponent dedykowany standardowym sieciom LAN – to grupa najmniej krytyczna, najbliższa rozwiązaniom spotykanym w standardowych sieciach LAN. Niejednokrotnie w celu zapewnienia odpowiedniej separacji i izolacji ruchu wydziela się odrębne segmenty dla załogi statku oraz pasażerów.

Dostęp komponentów składowych wewnętrznej sieci jednostki pływającej do sieci zewnętrznych może być realizowany z wykorzystaniem różnorodnych technik i systemów łączności bezprzewodowej. Widoczne jest jednak to, że niezależnie od wykorzystywanego rozwiązania sieci dostępowej, rozważana struktura odbiega od schematów analizowanych w tradycyjnych sieciach z węzłami mobilnymi, w których to mechanizmy obsługi mobilności realizowane mogą być bezpośrednio dla poruszającego się terminala. W przypadku jednostki pływającej brama wyjściowa będzie komponentem, który musi zapewnić łączność pomiędzy sieciami zewnętrznymi, a wewnętrznymi komponentami systemu.

W dalszej części rozdziału omówione zostały nowe, przygotowywane przez gremia standaryzujące specyfikacje usług, które będą mogły być realizowane i świadczone dzięki integracji danych i informacji pochodzących ze wskazanych powyższej modułów/komponentów oraz najistotniejsze obecnie wykorzystywane lub proponowane do wdrożenia rozwiązania łączności dedykowane dla jednostek pływających.

## **2.2 USŁUGI IMO**

Stosowane obecnie obligatoryjne lub prawie obligatoryjnie rozwiązania w zakresie łączności morskiej są ściśle związane z dedykowanymi usługami, co do których wiadomo, że są możliwe do realizacji przy pomocy dostępnych technik transmisji (np. sygnalizacja na potrzeby wzywania pomocy – *distress signalling*). Pojawienie się nowych potrzeb zebranych pod szyldem inicjatywy e-nawigacji wymusiło inne podejście, w którym zamiast tworzenia krytycznego zestawu możliwych do realizacji i niezbędnych usług, definiuje się kompleksowy zestaw aplikacji związanych ze środowiskiem morskim, niezależnie od możliwości obecnie wykorzystywanych systemów, z założeniem, że nowo opracowane techniki czy rozwiązania pozwolą na ich wdrożenie w przyszłości. Pozwala to na separację i rozróżnienie krytycznych usług, które wymagają wysoce niezawodnej komunikacji oraz tych niekrytycznych niejednokrotnie z dużo większymi wymaganiami dotyczącymi systemów transmisji danych. Intensywny rozwój gospodarki morskiej powoduje, że ta druga grupa usług – usługi niekrytyczne mogące zwiększać np. efektywność transportu, pomagać w planowaniu i organizacji pracy portów, czy wprowadzić usługi *e-health* dla załóg jednostek pływających, staje się coraz bardziej istotna. Jednym z głównych zadań opracowywanych systemów e-nawigacji jest ułatwienie integracji pomiędzy różnymi



krytycznymi i niekrytycznymi systemami bez obniżania ich niezawodności i zdolności do niezależnego działania [40].

Jako istotny krok w popularyzacji opisanego podejścia do specyfikacji e-nawigacji, IMO przedstawiło opis Usług Morskich (*Maritime Services – MSs*) [41] – uznanych i standaryzowanych grup usług użytecznych dla środowiska morskiego. Należy zauważyć, że definicja danego MS zaprezentowana w [42] nie oznacza, że jest on obecnie dostępny lub nawet potencjalnie gotowy do wdrożenia. W przypadku większości państw członkowskich nadal konieczne jest podjęcie znacznych wysiłków w zakresie badań, przygotowania niezbędnej infrastruktury czy docelowego wdrażania, co wynika z braku rozwiązań technicznych, które mogłyby zaoferować skuteczne rozwiązania łączności. W dokumencie [43] przedstawiono szesnaście obszarów, które w pewien sposób identyfikują potrzeby i zastosowanie istniejących albo potrzebnych, ale jeszcze niedostępnych rozwiązań technicznych. Poniżej zaprezentowano krótką charakterystykę tych obszarów i usług:

Usługa *MS1: Vessel Traffic Service Information Service* — ma na celu dostarczanie istotnych informacji do podejmowania decyzji nawigacyjnych na pokładzie jednostek pływających. Na poziomie komunikacji sieciowej usługa ta wymaga możliwości przesyłania wiadomości w dwóch trybach: okresowo z określonym interwałem i na żądanie strony. Wymieniane komunikaty zawierać będą różnorodne i możliwie szeroko definiowane informacje wpływające na bezpieczeństwo nawigacji jednostek pływających, w tym MMSI (*Maritime Mobile Service Identity*) statku, celu podróży, port docelowy, opis występujących ograniczeń w manewrowaniu oraz opis warunków hydrologicznych i meteorologicznych. Głównym celem tego systemu jest ogólna poprawa bezpieczeństwa i efektywności ruchu statków.

Usługa *MS2: Navigational Assistance Service* — zdefiniowana jest jako pomoc dla załogi w nietypowych i nieoczekiwanych okolicznościach, takich jak niespodziewana awaria sprzętu lub niedyspozycja kluczowego członka załogi. Jej głównym celem jest zapewnienie możliwości dalszego podejmowania bezpiecznych decyzji nawigacyjnych.

Usługa *MS3: Traffic Organization Service* — ma na celu zapobieganie powstawaniu potencjalnie niebezpiecznych sytuacji związanych z ruchem jednostek pływających. Usługa ta powinna być świadczona przez właściwy w danym kraju urząd zajmujący się

koordynacją ruchu statków (*Vessel Traffic Service* – VTS), do którego kompetencji należy nadzorowanie bieżącego ruchu statków pozwalające na uniknięcie zakłóceń spowodowanych wyjątkowymi okolicznościami jak np. konieczność realizacji transportu specjalnego, działalność żeglarska lub trwające prace morskie.

Usługa *MS4: Port Support Service* — jest jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się usług zdefiniowanych przez IMO. Ma być ona świadczona przez lokalnego operatora portu lub przystani i obejmować szeroki zakres funkcji korzystnych dla bezpieczeństwa, poprawiających efektywność komunikacji między jednostkami pływającymi, infrastrukturą portową i administracją. Z założenia implementacja tej usługi nie musi być wdrażana jednorodnie w ujęciu globalnym. Dopuszcza się jej wdrożenia przy użyciu różnych technologii, zgodnie ze sposobem najkorzystniejszym dla danego środowiska lokalnego. Jest to jedna z usług, która jest najbardziej otwarta na możliwości wdrażania nowych, innowacyjnych rozwiązań komunikacyjnych. Jak zostało to opisane w pierwszym rozdziale, działania związane z wdrażaniem tej usługi widoczne są również w strategii rozwoju portu w Gdańsku.

Usługa *MS5: Maritime Safety Information Service* — wprowadza możliwość ponadregionalnej wymiany informacji dotyczących bezpieczeństwa morskiego, a określonych w konwencji SOLAS (*Safety of Life at Sea*) systemu GMDSS. Jest ona uważana za jedną z najbardziej istotnych usług, ponieważ obejmuje funkcje związane z bezpieczeństwem i reagowaniem na zagrożenia, awarie oraz wypadki, których uniknięcie albo zminimalizowanie ich skutków są obecnie kluczowe dla bezpieczeństwa i szeroko rozumianego funkcjonowania gospodarki morskiej.

Usługa *MS6: Pilotage Service* — ma na celu zapewnienie wsparcia dla personelu mostka kapitańskiego, pozwalającego na bezpieczne dotarcie do celu przy uwzględnieniu specyficznych lokalnych warunków występujących na obszarze jej wdrożenia. Do realizacji tej usługi niezbędni są wysoce doświadczeni piloci posiadający wiedzę o danym obszarze oraz sprawna komunikację pomiędzy pilotem, kapitanem i zespołem mostka. O ile przenośne jednostki pilotażowe (*Portable Pilot Unit* – PPU) wspomagające pilota są już często stosowane, o tyle sposób wymiany i prezentacji danych nawigacyjnych nie został jeszcze ustandaryzowany. Usługa ta również stanowi miejsce potencjalnego wdrożenia nowoczesnych rozwiązań oferujących szerokopasmową komunikację bezprzewodową.

Usługa *MS7: Tugs Service* — ma na celu poprawę bezpieczeństwa i wydajności różnych lokalnych usług holowniczych (od transportu personelu, przez pomoc przy cumowaniu i holowanie, po reagowanie w sytuacjach awaryjnych). Powinna być świadczona przez władze portowe lub wyspecjalizowane organizacje holownicze. Podobnie jak w przypadku systemu *Vessel Shore Reporting* (MS8), którego celem jest ułatwienie sporządzania raportów wymaganych do przedłożenia stosowym jednostkom administracyjnym przez załogi, oczekuje się, że skorzysta on z niezawodnej, wysokowydajnej łączności w obrębie grup statków oraz między statkami a zainteresowanymi podmiotami na lądzie.

Usługa *MS9: Telemedical Assistance Service* — ma być świadczona przez wyspecjalizowane podmioty ochrony zdrowia (dopuszcza się świadczenie tej usługi przez publiczne podmioty, jak również prywatne przedsiębiorstwa). Ma ona na celu zapewnienie załogom statków możliwie ciągłej i nieprzerwanej opieki medycznej. Chociaż konkretne składowe usługi zostały zdefiniowane tak, aby mogły być realizowane przy użyciu istniejących systemów łączności (zwłaszcza radiotelefonów HF i VHF), istnieje ogromna możliwość poprawy zarówno jakości, jak i różnorodności komponentów tej usługi. W przyszłości dzięki zastosowaniu systemów łączności szerokopasmowej, mechanizmów sieci DTN (*Delay-Tolerant Network*), zwiększeniu dojrzałości już wdrożonych usług e-zdrowia i stosunkowo nowych rozwiązań z zakresu medycznego Internetu Rzeczy (IoT) rola tej usługi zmieniłaby się z reagowania w sytuacjach nagłych na proaktywne zapobieganie i wczesną diagnostykę niebezpiecznych zdarzeń.

Usługa *MS10: Maritime Assistance Service* — powinna zapewniać komunikację ogólnego przeznaczenia między podmiotami działającymi w środowisku morskim (np. władzami nadbrzeżnymi, władzami portowymi, oficerami statków, właścicielami floty lub brokerami itp.). Usługodawcy są odpowiedzialni jedynie za przekazywanie wiadomości i monitorowanie sytuacji, pełniąc funkcję punktu kontaktowego między wszystkimi stronami. Jej bardzo ogólna definicja powoduje, że może ona obejmować szereg procedur i czynności, ale niezaprzeczalnie efektywny system komunikacji jest niezbędny do jej realizacji.

Usługa *MS11: Nautical Chart Service* — ma zapewnić możliwość rozgłaszania informacji opisujących zagrożenia nawigacyjne występujące na obszarze jej implementacji np.: stan obszarów przybrzeżnych, głębokość wody, pływy itp. Zgodnie z przyjętymi

założeniami usługa ta ma również obejmować funkcje umożliwiające dystrybucję i licencjonowanie map morskich. Ma ona być zintegrowana z usługą *MS12: Nautical Publication Service* — zapewniającą dostępność aktualnych opisów dróg wodnych.

Równocześnie informacje meteorologiczne, także istotne dla bezpieczeństwa morskiego, takie jak m.in. prognozy pogody czy informacje opisujące prędkość i kierunek wiatru, mają być dostarczane przez usługę *MS14: Meteorological Information Service*. Biorąc pod uwagę szybko zmieniające się warunki na obszarach wodnych pokrytych lodem, proponuje się dedykowaną dla tych obszarów usługę *MS13: Ice Navigation Service* — stanowiącą uzupełnienie *MS14*. Wszystkie wymienione powyżej usługi mają być również rozszerzane okresowo o aktualizacje dystrybuowane w ramach *MS15: Real-time Hydrographic and Environmental Information Service* — w celu wzbogacenia informacji nawigacyjnej o dodatkowe dane, takie jak np. informacje batymetryczne, czy wykaz i opis latarni morskich oraz boi sygnalizacyjnych.

Usługa *MS16: Search and Rescue Service* — ma na celu poprawę efektywności działań poszukiwawczych i ratowniczych. Chociaż wprowadzono już różne rozwiązania odpowiadające na te potrzeby, wykorzystanie nowych systemów łączności może przynieść znaczne korzyści, np. dzięki możliwości ograniczenia obszarów poszukiwań na podstawie wyników modelowania i obliczeń wykonywanych przez infrastrukturę ulokowaną na większej jednostce pływającej gromadzącej dane z wielu mniejszych, czy też na lądzie.

Jak widać społeczność morska skupiona wokół IMO pracując nad specyfikacją *Maritime Services* patrzy na potrzeby nowych rozwiązań w bardzo szerokim kontekście. Opisane usługi swoją definicją wykraczają daleko poza typowe definicje usług ICT (*Information and Communications Technology*), ale w większości z nich element komunikacyjny będzie pełnił istotną, o ile nie kluczową rolę.

Analiza definiowanych przez IMO nowych usług e-nawigacji pozwala na wyciągnięcie wniosku, że w odniesieniu do szeregu z tych usług istnieje możliwość ich realizacji z wykorzystaniem odpowiednio przystosowanych do warunków morskich szerokopasmowych technik łączności, używanych tradycyjnie do komunikacji na lądzie. By pełniej opisać wymagania stawiane systemom komunikacji morskiej, w kolejnym podrozdziale rozprawy dokonamy charakterystyki tego specyficznego środowiska propagacyjnego.



## 2.3 MODELOWANIE ŚRODOWISKA PROPAGACYJNEGO

Modele kanałów bezprzewodowych służące analizie propagacji fal radiowych nad powierzchnią morza różnią się od modeli kanałów stosowanych w komunikacji bezprzewodowej ziemia-ziemia ze względu na wyjątkowy charakter środowiska morskiego, w którym powinny dodatkowo zostać uwzględnione zjawiska niewystępujące w komunikacji nad lądem [43] [44]. Modele te najczęściej wykorzystują dopasowanie wartości ich parametrów do rzeczywiście pomierzonych danych zgromadzonych w trakcie kampanii pomiarowych – podejście takie zastosowano w [45] [46] [47] [48] [49].

Model tłumienia w wolnej przestrzeni jest jednym z najprostszych modeli opisujących bezpośrednią komunikację, przy spełnieniu warunku widoczności urządzeń nadawczo-odbiorczych (będących w tzw. linii widoczności – *line of sight*). Wartość tłumienia (wyrażonego w decybelach) wprowadzanego przez wolną przestrzeń w odległości  $d$  można wyznaczyć następująco:

$$PL_{FS}(d) = 10 \log_{10} \left( \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right) \quad (2.1)$$

gdzie  $d$  jest odległością pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem, a  $\lambda$  oznacza długość fali. Jak jednak pokazuje analiza porównawcza prac uwzględniających takie podejście przedstawiona np. w [50], modele tej klasy mogą znaleźć zastosowanie w środowisku komunikacyjnym, w którym nie będzie występowała konieczność uwzględniania odbić sygnału i wynikających z tego zjawiska zaników. Mankament ten zniwelowany jest poprzez wprowadzenie analizy geometrycznej dodatkowych ścieżek obrazujących odbicie od powierzchni wody – dla modelu dwuścieżkowego, odbicie od powierzchni wody i refrakcję w dolnych obszarach atmosfery – dla modelu trójścieżkowego. Zgonie z [51] wyrażenia opisujące wspomniane modele mogą być zapisane w następujący sposób:

- dla modelu dwuścieżkowego:

$$PL_{2R} = 10 \log_{10} \left( \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 (2 \sin \left( \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right))^2 \right) \quad (2.2)$$

gdzie  $h_r$  i  $h_t$  oznaczają odpowiednio wysokość ulokowania anteny odbiorczej i wysokość anteny nadawczej;

- dla modelu trójścieżkowego:

$$PL_{3R} = 10 \log_{10} \left( \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 (2(1 + \Delta))^2 \right) \quad (2.3)$$

gdzie

$$\Delta = 2 \sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right) \sin\left(\frac{2\pi(h_t - h_e)(h_r - h_e)}{\lambda d}\right) \quad (2.4)$$

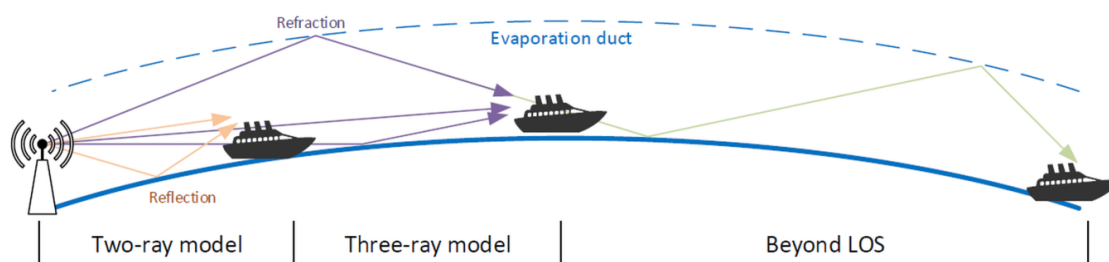
przy czym  $h_e$  jest parametrem określającym wysokość duktu komunikacyjnego, który powstał nad powierzchnią akwenu w wyniku parowania.

W [51] zaleca się połączenie obu tych modeli w taki sposób, że w odległości  $d \leq d_{br}$  zastosowanie będzie miał model dwuścieżkowy, a powyżej tej odległości model trójścieżkowy. Zgodnie z zaleceniami wartość graniczna wyznaczana jest na podstawie wzoru  $d_{br} = \frac{4h_t h_r}{\lambda}$ . Podejście uwzględniające połączenie obu modeli pozwala na uwzględnienie istotnych zaników mocy sygnału odbieranego, które obserwowane były w danych zgromadzonych w trakcie pomiarów realizowanych w rzeczywistym środowisku, a na modelowanie których nie pozwalają model dwuścieżkowy i model tłumienia w wolnej przestrzeni. Istotne spadki mocy sygnału są efektem wielodrogowości, która powoduje, że dla określonych odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem oraz określonych częstotliwości fale elektromagnetyczne pokonujące różne trasy docierają przesunięte w fazie względem siebie, czego skutkiem był brak możliwości realizacji łączności w danej odległości. Wyniki szeregu eksperymentów terenowych potwierdzają możliwość zastosowania modelu trójścieżkowego [51] [52] [53]. Poglądową ilustrację opisanych modeli zaprezentowano na Rys. 2.2, wraz z pokazaniem zasięgów ich zastosowania oraz głównych zjawisk wpływających na ich charakterystykę.



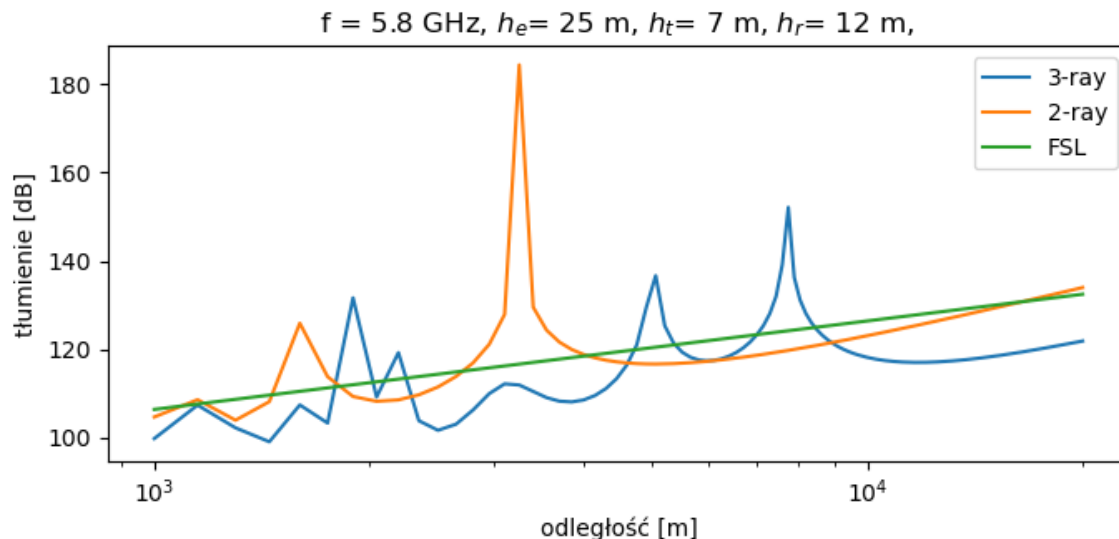
Zjawisko powstawania duktu komunikacyjnego spowodowanego parowaniem jest od dawna zauważane, a w ostatnich latach intensywnie badane [54] [55] [56]. Jest ono analizowane zwłaszcza pod kątem wykorzystania komunikacji wykraczającej poza linię widoczności (*Beyond line of sight* – BLOS) w systemach radarowych i komunikacji wojskowej. Wykorzystanie możliwości komunikacji w tym zakresie wymaga bardzo precyzyjnego kierowania wąskiej wiązki, co powoduje, że praktyczne jego wykorzystanie jest ograniczone [57]. Z tego powodu model transmisji BLOS nie jest analizowany w rozprawie.

Efekt refrakcji spowodowany jest zmianą współczynnika załamania fali elektromagnetycznej na różnych wysokościach atmosfery, co wynika ze zmiany ciśnienia atmosferycznego, temperatury, wilgotności itp. Wartość współczynnika  $h_e$  będzie w dużej mierze zależała właśnie od tych wartości. Niestety, jak wskazano w [54], brak danych opisujących warunki atmosferyczne panujące na danych akwenach, jednocześnie zawierających opis jakości transmisji realizowanych poprzez łącza radiowe, uniemożliwia skonstruowanie modeli pozwalających na dokładne powiązanie tych komponentów i opracowanie ujednoczonego modelu. W związku z tym, w symulacjach opisanych w Rozdziale 3, korzystając z wyników prac zaprezentowanych w [51], przyjęto, że  $h_e$  ma stałą wartość 30 m – podobne założenia przyjęto w innych pracach obejmujących wpływ tego zjawiska na efektywność komunikacji [58] [59] [60] [61].



Rys. 2.2 Ilustracja modeli propagacyjnych charakterystycznych dla środowiska morskiego

Analizując przebiegi tłumienia sygnału wyznaczone dla poszczególnych modeli zgodnie z wyrażeniami (2.1) – (2.3), zobrazowane na Rys. 2.3, można zauważyć, że dla większych odległości pomiędzy odbiornikiem i nadajnikiem tłumienie modelu trójścieżkowego jest mniejsze niż dla pozostałych omawianych modeli, co powoduje, że zawyżony może zostać zasięg łącza, poprzez które realizowana jest transmisja danych.



Rys. 2.3 Porównanie tłumienia fali elektromagnetycznej dla wybranych modeli propagacyjnych

W wielu pracach wykorzystywana jest prosta zależność geometryczna ograniczająca maksymalny zasięg komunikacji – takie rozwiązanie jest opisane m.in. w [50] [58]. Jednak ograniczenie tego zasięgu może zostać zamodelowane w dokładniejszy sposób, uwzględniając zjawiska wpływające na zachowanie fali elektromagnetycznej, które zostały opisane w zaleceniu ITU P.526 [62]. Zgodnie z tym dokumentem, natężenie pola elektromagnetycznego,  $E$ , zmienne w wyniku występowania zjawiska dyfrakcji wprowadzanego przez krzywiznę Ziemi w stosunku do natężenia pola w wolnej przestrzeni,  $E_0$ , wyznaczone może być na podstawie poniżej zależności:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(Z) + G(Y_1) + G(Y_2) \quad (2.5)$$

gdzie,  $Z$ ,  $Y_1$  i  $Y_2$  – współczynniki pomocnicze, można wyznaczyć korzystając ze wzorów:

$$Z = \beta \left( \frac{\pi}{\lambda a_e^2} \right)^{1/3} d \quad (2.6)$$

$$Y = 2\beta \left( \frac{\pi^2}{\lambda^2 a_e} \right)^{1/3} h \quad (2.7)$$

w których:

$d$  : odległość pomiędzy anteną nadawczą i odbiorczą [km],

$a_e$  : ekwiwalent długości promienia Ziemi [km],

$h$  : wysokość ulokowania anteny [m],

$f$  : rozważana częstotliwość [MHz].

We wzorach tych  $\beta$  jest parametrem zależnym od charakterystyki podłoża oraz polaryzacji fali elektromagnetycznej. Jego wartość wyznaczyć można przy uwzględnieniu współczynnika  $K$ , zgodnie z następującą zależnością:

$$\beta = \frac{1 + 1.6 K^2 + 0.67 K^4}{1 + 4.5 K^2 + 1.53 K^4} \quad (2.8)$$

Dla polaryzacji poziomej, przy wszystkich częstotliwościach oraz dla polaryzacji pionowej powyżej 20 MHz na lądzie i 300 MHz na morzu, można przyjąć, że wartość  $\beta$  jest równa 1. Dla polaryzacji pionowej poniżej 20 MHz na lądzie lub 300 MHz na morzu wartość  $\beta$  powinna być obliczona przyjmując, że współczynnik  $K$  możemy wyznaczyć w następujący sposób:

$$K \approx \sqrt{6.89 \frac{\sigma}{k^{2/3} f^{5/3}}} \quad (2.9)$$

gdzie  $\sigma$  jest przewodnością wyrażoną w S/m, częstotliwość  $f$  wyrażamy w MHz, a  $k$  jest współczynnikiem zwielokrotnienia promienia Ziemi.

Funkcja  $F(Z)$ , zgodnie z zaleceniem [62], ma następującą postać:

$$F(Z) = 11 + 10 \log(Z) - 17.6 Z \quad \text{dla } Z \geq 1.6 \quad (2.10)$$

$$F(Z) = -20 \log(Z) - 5.6488 Z + 1.425 \quad \text{dla } Z < 1.6 \quad (2.11)$$

Składnik wzoru (2.5) zależny od wysokości anteny,  $G(Y)$ , wyznaczany jest na podstawie następujących wyrażeń:

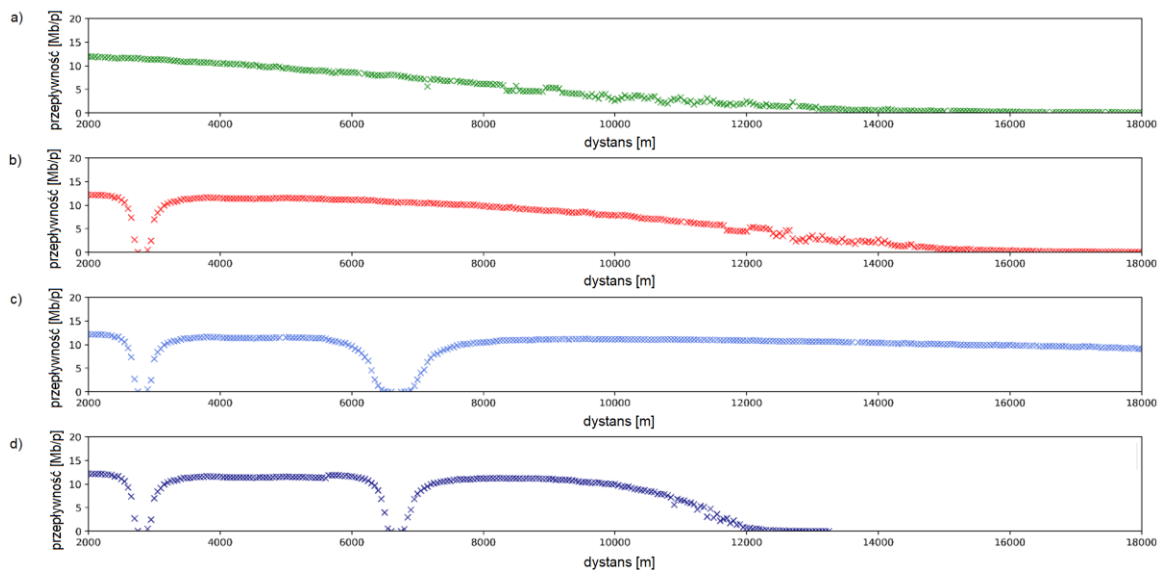
$$G(Y) \cong 17.6(B - 1.1)^{1/2} - 5 \log(B - 1.1) - 8 \quad \text{dla } B > 2 \quad (2.12)$$

$$G(Y) \cong 20 \log(B + 0.1B^3) \quad \text{dla } B \leq 2 \quad (2.13)$$

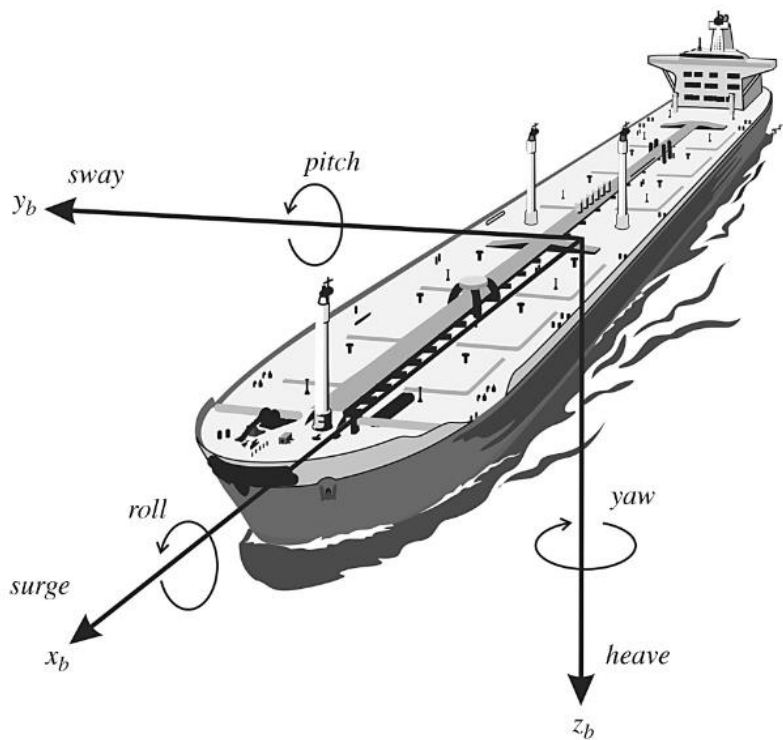
gdzie,  $B = \beta Y$ , a dla rezultatów  $G(Y)$  mniejszych niż  $2 + 20 \log K$ , wartość funkcji należy zastąpić wartością  $2 + 20 \log K$ .

Porównanie wyników uzyskanych przez autora rozprawy w trakcie symulacji z wykorzystaniem modeli opisanych w tym punkcie zaprezentowano na Rys. 2.4. Wykresy prezentują uśrednioną dla 20 połączeń wartość przepływności połączenia TCP realizowanego pomiędzy serwerem ulokowanym w stacji brzegowej a jednostką pływającą dla wybranych odległości. Analizując zaprezentowane wykresy, widoczne jest uwzględnienie zaników występujących przy pewnych odległościach w przypadku korzystania z modelu trójścieżkowego. Jednak gdy model ten stosowany jest w prostej postaci i nieuwzględnienia zalecenia P.526, zaobserwować można znaczne wydłużenie zasięgu komunikacji, wykraczające poza linię widoczności. Ostatni z wykresów, pokazując zastosowanie wszystkich opisanych mechanizmów, urealnia otrzymane wyniki.

W środowisku morskim przemieszczanie się węzłów powinno być rozważane nie tylko w tradycyjnym ujęciu rozumianym jako zmiana położenia, ale również z uwzględnieniem ruchów statku będących wynikiem falowania, które wpływa zarówno na ruchy obrotowe względem osi układu odniesienia z punktem (0,0,0) znajdującym się w centralnym punkcie statku, jak i na dodatkowe ruchy posuwiste wynikające z bezwładności jednostki pływającej oraz oddziałujących na nią sił powstałych przy przemieszczaniu się mas wody. Nazewnictwo i graficzne ilustracje pokazujące odpowiednie ruchy – posuwiste *sway*, *surge*, *heave* oraz obrotowe *pitch*, *roll* i *yaw* zostały zaprezentowane na Rys. 2.5.



Rys. 2.4 Porównanie przepływności połączeń TCP dla wybranych modeli propagacyjnych – a) model propagacji w wolnej przestrzeni, b) model dwuścieżkowy, c) model trójścieżkowy, d) model trójścieżkowy + ITU-R P.526



Rys. 2.5 Wizualizacja sześciu punktów swobody jednostek pływających i nazw ruchów [63]

Zależności pomiędzy poszczególnymi ruchami mogą zostać opisane następującym układem równań różniczkowych:

$$m_v \ddot{x} = X_r(t) + X_w(t) + X_f(t), \quad (2.14)$$

$$m_v \ddot{y} = Y_r(t) + Y_w(t) + Y_f(t),$$

$$m_v \ddot{z} = Z_r(t) + Z_w(t) + Z_f(t),$$

$$I_{Gxx} \ddot{\psi} = K_r(t) + K_w(t) + K_f(t),$$

$$I_{Gyy} \ddot{\theta} = P_r(t) + P_w(t) + P_f(t),$$

$$I_{Gzz} \ddot{\varphi} = R_r(t) + R_w(t) + R_f(t),$$

gdzie:

$m_v$  oznacza masę analizowanej jednostki pływającej,

$I_{Gxx}, I_{Gyy}, I_{Gzz}$ , momenty bezwładności w kierunkach  $xx, yy, zz$ .

Symbole  $x, y, z$  określają położenie względem tych osi, a  $\psi, \theta, \varphi$  miary kątowe odpowiednio dla ruchów *roll, pitch, yaw*.

$X, Y, Z$  to składowe siły działające odpowiednio wzdłuż osi  $x, y, z$  – wynikające z działania sił hydrostatycznych, hydrodynamicznych i związanych z falowaniem - odpowiednio określane przez indeks dolny  $r, w, f$ .

Podobnie,  $K, P, R$  to momenty sił w kierunkach  $xx, yy, zz$  określone tymi samymi indeksami dolnymi.

Rozwiązywanie układu równań różniczkowych w sposób efektywny obliczeniowo jest przedmiotem licznych prac [64] [65] [66] [67]. Jest to aspekt niezmiernie ważny przy projektowaniu jednostek pływających, analizie przemieszczania się ładunku na statkach czy w uproszczonej wersji w wizualizacjach na potrzeby symulacji szkoleniowych. Jedną z proponowanych w tym celu metod jest technika nazywana  $2d + t$  [68], która zakłada dekompozycję złożonego układu równań opisujących ruch w przestrzeni 3D, na szereg łatwiejszych do rozwiązania problemów w płaszczyznach dwuwymiarowych

uwzględniających przekroje statku przekraczającego każdą z analizowanych płaszczyzn krok po kroku [69]. Nawet po zastosowaniu tego uproszczenia analiza ruchu statku będzie silnie powiązana z modelem przestrzennym uwzględniającym wymiary i rozkład masy konkretnej jednostki pływającej.

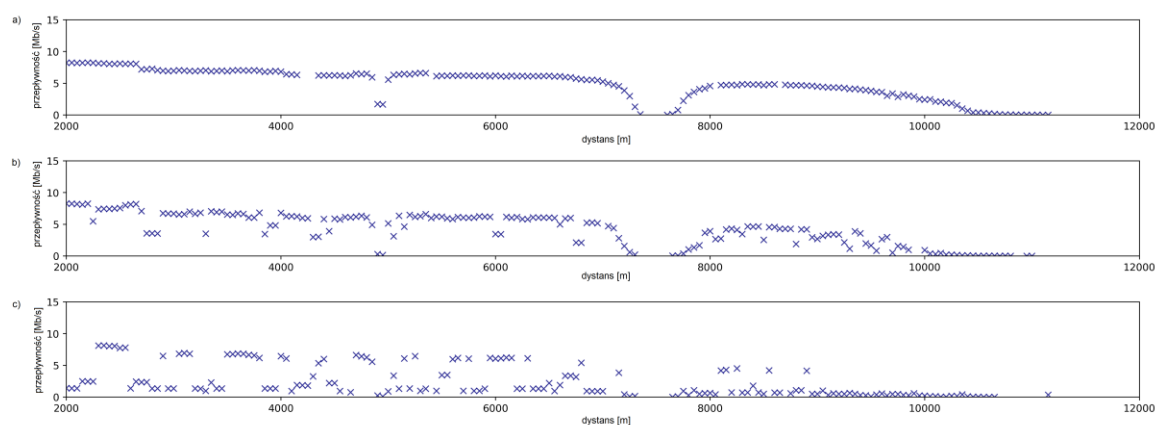
Ruchy jednostek pływających we wszystkich sześciu stopniach swobody będą nie bez znaczenia przy analizie ich wpływu na komunikację bezprzewodową realizowaną do lub z tej jednostki szczególnie w przypadku niewielkich jednostek lub bardzo silnego falowania morza. Implementacja pełnej analizy i modelowanie każdej składowej sił wpływających na zachowanie statku w znaczący sposób wydłużyłoby czas symulacji i złożoność obliczeniową. Modelując system przy pomocy symulatora zdarzeń dyskretnych, dla każdego kroku symulacji uwzględniającej mobilność jednostek pływających, niezbędne byłoby rozwiązanie całego zaprezentowanego układu równań. W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności, wspomniany krok symulacji powinien być możliwie mały, co wprowadzałoby jednak istotny narzut obliczeniowy. Poszukując kompromisu oraz starając się odwzorować wpływ falowania na komunikację bezprzewodową przy zachowaniu efektywności obliczeniowej, zdecydowano się na modelowanie ruchu *pitch* jako sumy funkcji trygonometrycznych o różnym okresie [55]. Ruch ten jest szczególnie istotny w przypadku dookólnych anten o dużym zysku i wąskiej, kilkustopniowej wiązce wertykalnej. Na podstawie analizy dostępnych źródeł arbitralnie przyjęto postać funkcji, dla której w trakcie symulacji parametry dobrano w sposób ograniczający maksymalną wartość zmian tego kąta do  $10^\circ$  [70] [71] [72].

$$\theta(t) = \theta_{max} \left( \sin \left( \left( \frac{2\pi}{t_w} + \frac{2\pi}{4t_w} \zeta_\theta \right) t + \varphi_{\theta_1} \right) + \sin \left( \frac{2\pi}{16} t + \varphi_{\theta_2} \right) \right) \quad (2.15)$$

gdzie,  $\theta_{max}$  to współczynnik skalowania określający maksymalną wartość kąta  $\theta$ ,  $t_w$  to okres fali,  $\zeta_\theta$  współczynnik szybkości zmiany wartości kąta *pitch*, a  $\varphi_{\theta_1}$  i  $\varphi_{\theta_2}$  to wartości fazy początkowej sumowanych funkcji. Na potrzeby dalszych prac, opisany model poruszania się statków został zaimplementowany razem z modelem mobilności, tworząc autorski moduł nazwany *LineraMobilityAndMotions*, kompatybilny ze środowiskiem INET dostępnym w symulatorze OMNeT++. Parametry modelu, przyjmując wartości losowe dla kolejnych uruchomień symulatora (przyjęte wartości zostały opisane w Rozdziale 3),

pozwalają na modelowanie różnorodnych charakterystyk ruchowych niepowiązanych z konkretną jednostką czy warunkami panującymi na danym akwenu.

Efekt zastosowania przyjętego modelu został zaprezentowany na Rys. 2.6. Widoczna jest dodatkowa zmienność oraz zmniejszenie przepływności testowych połączeń TCP.



Rys. 2.6 Wpływ falowania na połączenie TCP: a) model nieuwzględniający falowania , b) model z falowaniem  $\theta_{max} = 4^\circ$  c) model z falowaniem  $\theta_{max} = 8^\circ$

## 2.4 SYSTEMY ŁĄCZNOŚCI WYKORZYSTYWANE W KOMUNIKACJI MORSKIEJ

Mając na uwadze specyficzne uwarunkowania propagacyjne oraz wymagania usługowe i architekturę systemów wewnątrz statków niezbędna stała się realizacja prac mających na celu opracowanie nowych rozwiązań komunikacyjnych, które będą dedykowane systemom łączności na morzu. Część z opisanych rozwiązań to systemy podlegające standaryzacji gremiów zajmujących się szeroko pojętą tematyką morską, inne są wynikiem innowacyjnych projektów badawczych. Wspólnie, pokazują one kierunki rozwoju w tym obszarze, wskazując nowe możliwości i kształt przyszłych systemów komunikacji morskiej.

### 2.4.1 VDES – VHF Data Exchange System

Problem niewystarczających możliwości oferowanych przez istniejące systemy komunikacji morskiej zaadresowany został przez komitet e-NAV organizacji IALA, przy współpracy ze społecznością morską skupioną wokół IMO, ITU-R (*International*



*Telecommunication Union-Radiocommunication Sector*) i innych organizacji związanych ze środowiskiem morskim, kwestiami bezpieczeństwa na morzu czy gospodarką morską. W związku z przeciążeniem wykorzystywanego powszechnie systemu do automatycznej identyfikacji statków AIS (*Automatic Identification System*), którego głównym zadaniem jest rozsyłanie wiadomości zawierających informacje o lokalizacji oraz trasie jednostek pływających, podjęto inicjatywę opracowania nowego rozwiązania, które docelowo ma odciążać system AIS oraz wprowadzić możliwości realizacji usługi transmisji danych pozwalającej na wdrożenie m.in. opisanych we wcześniejszym fragmencie rozdziału wybranych nowych usług e-nawigacji [5] [73] [74]. Powszechnie akceptowany i szeroko wykorzystywany system AIS jest nieodzownym elementem bezpieczeństwa żeglugi. Został on uznany za niezbędny element wyposażenia statków objętych konwencją SOLAS (*Safety of Life at Sea*) (klasa A). Mając na względzie jego wysoką użyteczność, rozszerzono wykorzystanie tego systemu także na statki, które nie spełniają wymogów przewozowych (klasa B) oraz inne aplikacje, takie jak znaki nawigacyjne (*Aid to Navigation – AtoN*), wiadomości opracowane na potrzeby konkretnej usługi (*Application Specific Messages – ASM*), nadajniki wykorzystywane w akcjach poszukiwawczo-ratunkowych, jednostki pokładowe MOB (*Man Over-Board*) oraz radiopławy EPIRB (*Emergency Position-Indicating Radio Beacon*). Zgodnie ze wskazaniami IMO, zwiększenie powszechności wykorzystania systemu AIS spowodowało znaczny wzrost obciążenia kanałów transmisyjnych w paśmie VHF (*VHF Data Link – VDL*) wykorzystywanym przez ten system i w rezultacie zmniejszenie jego efektywności. Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na zasoby widma radiowego do wykorzystania w łączności cyfrowej, traktowane jako istotne ograniczenie możliwości rozwoju i wdrażania usług dedykowanych bezpieczeństwu żeglugi, rozpoczęto prace nad bardziej wydajnymi i skutecznymi metodami wykorzystania dostępnych pas częstotliwości. W wyniku tych prac opracowano zalecenie ITU-R M.1842 [75]. Jest to dokument, w którym opracowane zostały podstawy techniczne organizacji transmisji danych wykorzystane później w ogólnej architekturze systemu VDES (*VHF Data Exchange System*). Rozwiązanie to oferuje możliwość przesyłania danych z szybkością do 32 razy większą niż w przypadku stosowanego aktualnie rozwiązania AIS.

Ogólna architektura oraz komponenty systemu VDES zostały przedstawione w rekomendacji ITU-R M.2092 [5]. Mając na uwadze bardzo zachowawcze i, można powiedzieć, ewolucyjne podejście środowiska morskiego do wprowadzanych zmian, w

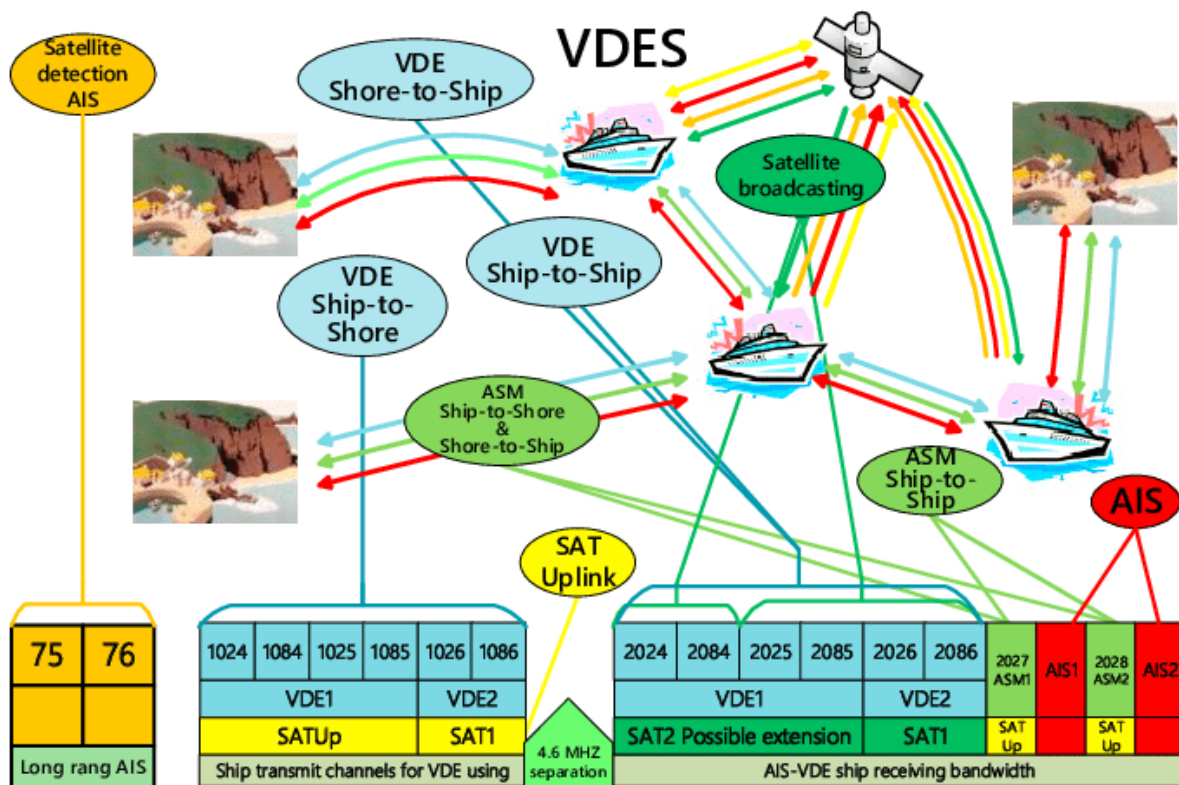


ramach kompleksowego systemu ujęto również opisane wcześniej rozwiązanie AIS oraz dodatkowe łącza danych wykorzystywane na potrzeby wymiany komunikatów ASM specyficznych dla wybranych aplikacji oraz łącza umożliwiające wymianę danych o większej przepustowości.

Niezależnie od wprowadzanych nowych możliwości, najważniejszą i priorytetową usługą systemu VDES pozostaje usługa dostarczania informacji związanych z bezpieczeństwem żeglugi, również tych zgodnych ze specyfikacją systemu AIS. Bazując na ugruntowanej i szeroko stosowanej praktyce system VDES ma umożliwiać jednoznaczny identyfikację i lokalizację wszystkich aktywnych stacji morskich — jako usługę domyślną. Do celów identyfikacji węzła wykorzystuje się identyfikator MMSI (*Maritime Mobile Service Identity*), zdefiniowany w zaleceniu ITU-R M.585 [76].

Ogólna architektura systemu, zaprezentowana na Rys. 2.7, obejmuje zarówno naziemne, jak i satelitarne komponenty systemu wykorzystujące łącza radiowe pracujące w pasmach przeznaczonych na potrzeby morskiej łączności ruchomej VHF. Różnorodne usługi komunikacyjne, zdefiniowane w systemie VDES, obejmują w szczególności wymianę danych pomiędzy jednostką pływającą a nabrzeżem, nabrzeżem a jednostką pływającą, pomiędzy jednostkami pływającymi oraz rozgłaszanie komunikatów przy pomocy łącz satelitarnych.

Element składowy systemu VDES, zdefiniowany jako *VHF Data Exchange Terrestrial* (VDE-TER), umożliwia dwukierunkową wymianę danych między statkami oraz między statkami a infrastrukturą brzegową w obszarach przybrzeżnych. Przyjmuje się, że zasięg łączności VDE-TER wynosi zwykle 20-50 Mm, a oferowana maksymalna przepustowość łącza sięga 300 kb/s. Z punktu widzenia sieci bezprzewodowych szeroko wykorzystywanych na lądzie, takie parametry wydają się mało znaczące i niewystarczające do realizacji podstawowych usług, ale w środowisku morskim jest to istotna poprawa względem wcześniejszych możliwości, która ma pozwolić na wdrażanie szeregu nowych aplikacji wymagających wymiany danych o większej objętości.



Rys. 2.7 Modele komunikacji i pasma częstotliwościowe wykorzystywane w systemie VDES [5]

Co więcej, jako drugi istotny element systemu VDES, zdefiniowany został komponent satelitarny (VDE-SAT), którego głównym celem jest zapewnienie niepośredniej wymiany danych pomiędzy statkami a lądem z wykorzystaniem dedykowanych satelitów. VDE-SAT uzupełnia VDES-TER poza obszarem zasięgu stacji nadbrzeżnych, umożliwiając globalne pokrycie systemem VDES. Obecnie dla typowych rozwiązań satelitarnych systemu VDES rozważa się satelity pracujące na niskiej orbicie okołoziemskiej (*Low Earth Orbit – LEO*) na wysokości do 600 km [5]. Komponent ten znajduje się obecnie w fazie testów [77], a pierwszy demonstrator pokazujący możliwości obu zintegrowanych elementów przewidziany jest na początek roku 2023 [78].

W celu zwiększenia efektywności dostępu do medium transmisyjnego, a tym samym efektywnego wykorzystania ograniczonych zasobów radiowych, w systemie VDES wyszczególniono kanały sygnalizacyjne utworzone w wydzielonych szczelinach czasowych lub dedykowanych pasmach częstotliwościowych. Transmisja danych odbywa się przy użyciu jednej z pięciu różnych metod wielodostępu z podziałem czasu (*Time Division Multiple Access – TDMA*) w paśmie VHF dla łączności ruchomej morskiej, przy czym zakresy częstotliwości przeznaczone dla łącza *uplink* (statek-brzeg) i dla łącza *downlink* (brzeg-statek i statek-statek) są rozdzielne. W przypadku komponentu VDE-TER

stacja brzegowa jest odpowiedzialna za koordynację transmisji poprzez kanały TBB (*Terrestrial Bulletin Board*) oraz ASC (*Announcement of Signaling Channels*). Satelitarny komponent systemu (VDE-SAT) wykorzystuje SBB (*Satellite Bulletin Board*), który zastępuje jego lądowy odpowiednik TBB w dedykowanym na te potrzeby kanale typu ASC. W związku z koniecznością koordynacji transmisji satelitarnych VDE-SAT z transmisjami naziemnymi VDE-TER satelitarne kanały koordynacyjne są retransmitowane w łączach komponentu naziemnego z wykorzystaniem TBB/ASC. Analogicznie występujące w komponencie satelitarnym węzły odbierają i uwzględniają odczytane wymagania pochodzące z komponentu VDE-TER.

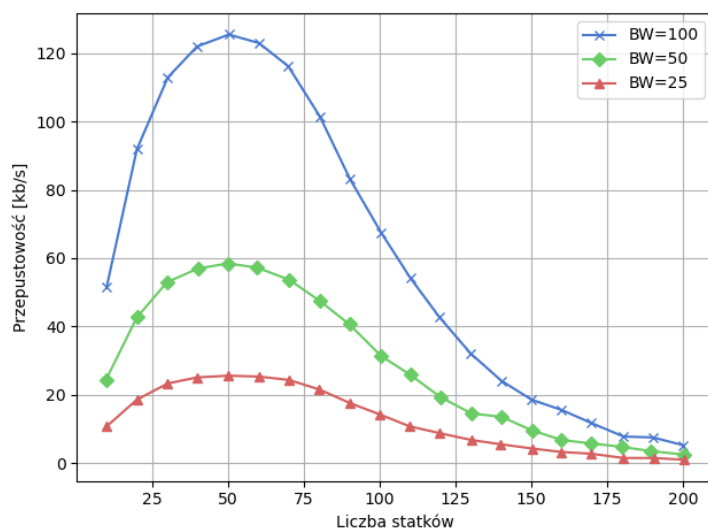
Jako że oba komponenty VDE-SAT i VDE-TER współdzielą niektóre z przydzielonych im kanałów częstotliwościowych, może dojść do sytuacji, w której realizowane równolegle transmisje zakłócają się wzajemnie. Ze względu na duży obszar objęty wiązką pochodzącą z satelitów i związane z tym trudności w realizacji separacji przestrzennej tych usług mogą pojawiać się niepożądane interferencje. Efektywne mechanizmy pozwalające na uniknięcie tego problemów są przedmiotem prowadzonych aktualnie badań.

Pomimo niezakończonych prac dotyczących systemu VDES już teraz widocznych jest kilka słabości tego rozwiązania. Jedną z nich, uważaną za bardzo istotną, jest brak jakichkolwiek mechanizmów uwierzytelniania węzłów. W wyniku czego atakujący bez większych przeszkód jest w stanie przeprowadzić atak podszycia się pod uprawniony do korzystania z systemu terminal, rozgłaszając fałszywe wiadomości mogące w istotny sposób wpłynąć na bezpieczeństwo żeglugi [79]. W związku z rozpowszechnieniem się rozwiązań radia programowalnego zagrożenie to staje się istotne, a jednym z proponowanych rozwiązań jest zastosowanie systemów stanowiących implementację Infrastruktury Klucza Publicznego, co jednak przy łączach o tak niewielkiej przepustowości może być nieefektywne [80] [81] [82].

Innym z istotnych ograniczeń, które wpływa na zmniejszenie możliwości transmisyjnych systemu VDES, jest problem organizacji dostępu do medium w przypadku rywalizacji większej liczby terminali, które mają do przesłania duże ilości danych. Niestety, jedna z głównych zalet systemu VDES – duży zasięg komunikacji pojedynczego terminala, okazuje się w tym przypadku być również jego wadą, ponieważ dostępna przepustowość będzie współdzielona przez terminale rozmieszczone na dużym obszarze,

co sprawi, że system ten będzie słabo skalowalny wraz ze wzrostem liczby węzłów rywalizujących o dostęp do medium.

Wspomniane ograniczenie systemu VDES zostało zilustrowane na Rys. 2.8, na którym pokazano maksymalną zagregowaną pojemność łącza *uplink* dla rosnącej liczby węzłów wyposażonych w urządzenia VDES znajdujących się we wzajemnym zasięgu. Na rysunku przedstawiono wyniki dla trzech standardowych szerokości kanału wykorzystywanych przez system VDES: 25, 50 i 100 kHz (parametr BW w legendzie rysunku). Można zauważyć, że zastosowana w systemie VDES metoda dostępu zgodna ze schematem RACH (*Random-Access Channel*) prowadzi do znacznego spadku wydajności i pogorszenia zagregowanej przepustowości komórki w przypadku dużej liczby terminali VDES starających się o dostęp do kanału [84]. Badanie tego efektu zostało przedstawione w [85], gdzie autorzy szczegółowo przeanalizowali wydajność algorytmu RACH i zaproponowali rozszerzenie pozwalające na zmniejszenie jego wpływu na pogorszenie efektywności komunikacji.

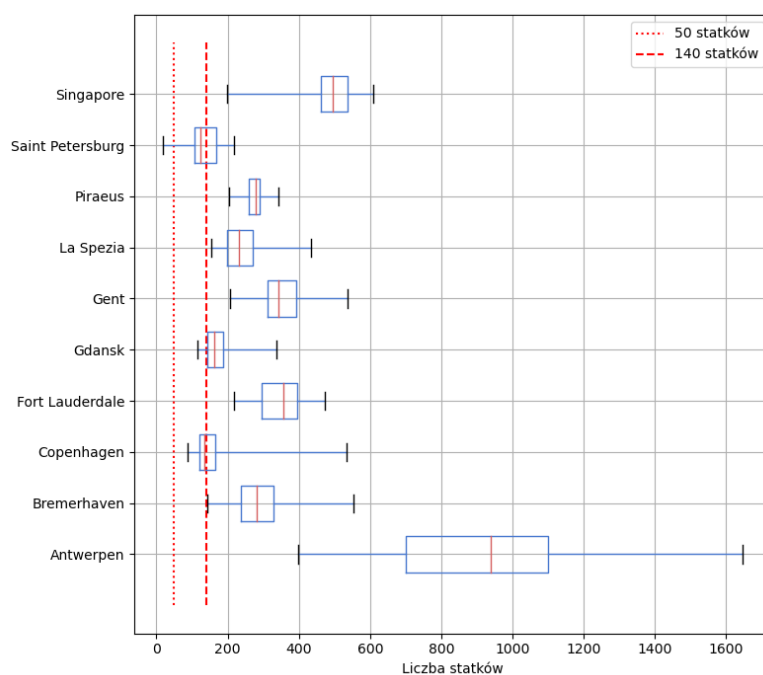


**Rys. 2.8 Spadek efektywności transmisji w systemie VDES wraz ze zwiększającą się liczbą terminali (na podstawie [83])**

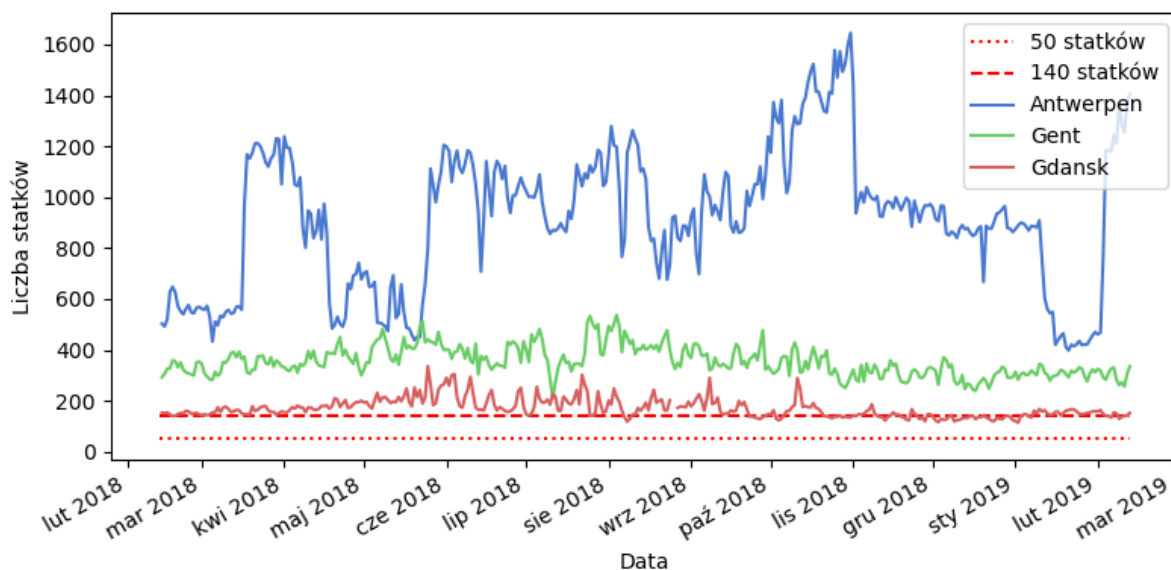
Prezentowane w [83] wyniki wskazują, że w analizowanym scenariuszu, nawet przy kanale o szerokości 100 kHz, sumaryczna przepustowość systemu na potrzeby komunikacji *uplink* komponentu VDE-TER nie przekracza 130 kb/s. A co gorsze, począwszy od około 50 terminali występujących w zasięgu komunikacyjnym, dostępna pojemność maleje – dla 130 terminali wynosi ona zaledwie 20% (26 kb/s) maksymalnej teoretycznie możliwej do uzyskania wartości.

Aby zilustrować na ile prezentowana sytuacja jest scenariuszem realnym i wartym rozważania, dokonano analizy danych uzyskanych z systemu AIS opisujących położenie statków znajdujących się w zasięgu stacji AIS ulokowanych w pobliżu wybranych portów morskich. Dane te zawierają informacje o statkach zobligowanych do wykorzystywania systemu AIS, czyli statkach pasażerskich i statkach o nośności powyżej 300 ton, oraz mogą zawierać informacje o mniejszych jednostkach, które nie mają obowiązku instalowania takiego nadajnika AIS.

Wyniki przedstawiają liczbę statków wyposażonych w transponder AIS będących w zasięgu systemu AIS (15-60 NM, w zależności od warunków propagacyjnych) w okolicach popularnych portów morskich: Rys. 2.9 - liczba statków uśredniona dla jednego roku (luty 2018 - styczeń 2019) oraz Rys. 2.10 - wartości dzienne dla tego samego okresu. Na obu rysunkach czerwoną kropkowaną linią zaznaczono liczbę statków odpowiadającą maksymalnej skuteczności VDES – 50 statków. Czerwona, przerywana linia wskazuje natomiast liczbę statków, dla których skuteczność VDES spada do 20% wartości maksymalnej.



**Rys. 2.9 Średnia liczba jednostek pływających występujących w zasięgu wybranych portów morskich na przestrzeni 02.2018 – 01.2019**



Rys. 2.10 Dzienna liczba jednostek pływających występujących w zasięgu wybranych portów morskich na przestrzeni 02.2018 – 01.2019

Przytoczone dane pokazują, że ograniczenia w dostępie do medium występujące w systemie VDES mogą być istotne, a sumaryczna przepustowość dostępnych kanałów transmisji danych, mimo wprowadzenia szeregu usprawnień nadal może pozostawać niewystarczająca.

Wspomniane, niewielkie możliwości systemów wąskopasmowych oraz niewystarczająca obsługa większej liczby terminali w systemie VDES zestawione z wymaganiami usług definiowanych jako usługi wspomagające e-nawigację były motywacją do poszukiwań i prac nad nowymi rozwiązaniami i systemami komunikacyjnymi. Do przykładów takich systemów zaliczyć można, będący prekursorem w wykorzystaniu współczesnych rozwiązań komunikacyjnych w środowisku morskim, system TRITON (*TRI-Media Telematic Oceanographic Network*), system netBaltic, którego częścią są niektóre z opisanych w niniejszej rozprawie propozycje nowych mechanizmów, czy też mniej kompleksowe rozwiązania jak BlueCom+, czy LTE-MARITIME.

#### 2.4.2 TRITON

Jedną z pierwszych cywilnych inicjatyw rozszerzenia zasięgu komunikacji na morzu poprzez zastosowanie mechanizmów sieci wieloskokowej, był projekt TRITON. Jest to znamienny przykład systemu, w którym podjęto próbę wykorzystania dojrzałych,

powszechnie stosowanych oraz dobrze poznanych w środowisku lądowym bezprzewodowych szerokopasmowych technik transmisji danych. W przypadku projektu TRITON jako podstawę proponowanego systemu wybrano rozwiązania z grupy *Wireless Metropolitan Area Networks* (WMAN) - technologię WiMAX zdefiniowaną w standardzie IEEE 802.16-2014 [86]. W przeciwieństwie do systemów komórkowych architektura tego rozwiązania pozwala na lokowanie stacji bazowych jako elementy infrastruktury nabrzeżnej bez konieczności jej ścisłej integracji z elementami rdzenia sieci. Teoretyczne możliwości oferowanej łączności pozwalają na osiągnięcie przepustowości rzędu dziesiątek megabitów na sekundę i łączności o zasięgu przekraczającym 50 km. W praktyce, tak ma to miejsce dla wszystkich systemów bezprzewodowych, konkretne możliwości będą w dużej mierze zależne od parametrów instalacji i warunków propagacyjnych.

WiMAX, jako rozwiązanie klasy WMAN, wykorzystuje separację płaszczyzny sterowania i transmisji danych użytkowników końcowych, co pozwala na wprowadzenie zaawansowanych mechanizmów zarządzania umożliwiających obsługę połączeń wymagających zapewnienia parametrów jakości wymuszanych za pomocą kontrolowanego schematu dostępu do medium TDMA. System WiMAX może pracować zarówno w pasmach częstotliwości licencjonowanych, jak i tych nielicencjonowanych w zakresie 2 – 66 GHz. Umożliwia to jego wdrożenie w sytuacji koegzystencji z innymi systemami wykorzystującymi zwłaszcza pasmo nielicencjonowane. Możliwa do uzyskania wysoka wydajność w dostępie do kanału jest istotną zaletą tego rozwiązania. Chociaż rozwiązanie WiMAX obejmuje swoją specyfikacją szeroką grupę rozwiązań z zakresu obsługi węzłów mobilnych czy komunikacji wieloskokowej, w ramach projektu TRITON wprowadzono szereg modyfikacji pozwalających na dostosowanie tej techniki transmisji do pracy w środowisku morskim. Konkretnie mechanizmy opracowane w ramach tego projektu obejmują zarówno warstwę fizyczną, jak i warstwę łącza danych standardu IEEE 802.16.

Warstwa fizyczna została zaprojektowana jako odpowiedź na dostrzeżony problem ruchu statków wywołanych falowaniem (omówiony szerzej w punkcie 2.3), poprzez zastosowanie dedykowanego modułu przełączania i wyboru jednej anteny z systemu wieloantenowego. System ten integruje grupę anten, aby automatycznie wybrać tę, która w danym momencie odbiera sygnał z najlepszą jakością (na poziomie warstwy fizycznej). W trakcie testów wykorzystano dwanaście anten sektorowych o szerokości wiązki 90° w poziomie i 5° stopni w pionie. Zostały one tak zorganizowane, aby zapewnić łączność



dookólną pomimo ruchu statku związanego z falowaniem i stosunkowo wąskiej wiązki pionowej. Jak opisano w [87], są one zgrupowane w cztery jednostki, z których każda zawiera trzy anteny. Jednostki antenowe są rozmieszczone w taki sposób, aby obejmowały wszystkie cztery kierunki poszczególnymi sektorami, dając możliwość pracy dookólnej. W każdej jednostce zamontowane są trzy anteny o różnym pochyleniu (tilt anteny  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+5^\circ$ ), co pozwala na kompensację ruchu statku spowodowanego falowaniem. Na podstawie danych z żyroskopu wykrywającego ruchy *roll*, *pitch*, *yaw* moduł przełączający steruje jednostkami antenowymi, wybierając tę, która będzie w danym momencie najlepsza do transmisji danych.

Pomimo stosunkowo dużego zasięgu technologii WiMAX, w trakcie realizacji projektu TRITON została ona rozszerzona o mechanizmy komunikacji wieloskokowej, dzięki czemu węzły systemu TRITON pełnią funkcję węzłów tranzytowych co pozwala na wymianę danych pomiędzy stacjami brzegowymi a statkami znajdującymi się poza ich bezpośrednim zasięgiem komunikacyjnym. Funkcjonalność taka wymaga implementacji dedykowanego protokołu routingu działającego w warstwie MAC (*Medium Access Control*) [88]. Protokół routingu wdrożony w warstwie MAC dla systemu TRITON jest rozwiązaniem proaktywnym, umożliwiającym tworzenie dwukierunkowych, wieloskokowych ścieżek komunikacyjnych pomiędzy stacją brzegową a statkami na morzu. Na potrzeby takich zastosowań został on zintegrowany z mechanizmami sieci WiMAX zdefiniowanymi w standardzie 802.16 i wykorzystuje dedykowane kanały zarządzania do wymiany informacji o routingu, co zwiększa jego niezawodność. Umożliwia on również utrzymywanie wielu ścieżek do danego węzła docelowego, co pozwala na szybką reakcję na awarie łącza.

Dodatkowo, w celu poprawy wydajności transmisji danych w sieci wieloskokowej, zmodyfikowane zostały wewnętrzne mechanizmy kontroli dostępu do kanału występujące w rozwiązaniu omawianej wersji standardu sieci WiMAX. Zamiast podstawowego mechanizmu *Coordinated Centralized Scheduling* (CCS) powszechnie stosowanego w systemach WiMAX typu punkt-wielopunkt, zaimplementowano alternatywny mechanizm *Coordinated Distributed Scheduling* (CDS) przedstawiony w specyfikacji IEEE 802.16-2004. Podstawowa specyfikacja CDS nie zawiera żadnego konkretnego algorytmu podejmowania decyzji o alokacji zasobów na potrzeby realizacji poszczególnych ścieżek, istnieje jednak szereg propozycji rozwiązań mogących znaleźć zastosowanie jako rozwiązanie tego problemu [89]. W ramach projektu TRITON opracowano mechanizm

uwzględniający docelowe środowisko pracy systemu, *Distributed Adaptive Time Slot Allocation* (DATSA), który umożliwia przydzielanie zasobów radiowych na podstawie wiedzy o warunkach panujących w sieci w sąsiedztwie dwóch węzłów (dostarczonej przez CDS). Kolejnym mechanizmem poprawiającym wydajność komunikacji w bezprzewodowej sieci wieloskokowej w systemie TRITON jest rozwiązanie *Multi-Channel Transmission*, które pozwala rozróżnić kanały częstotliwościowe wykorzystywane do transmisji danych przez sąsiadujące ze sobą węzły [90]. W rezultacie możliwe było zmniejszenie zakłóceń wewnątrzsieżkowych (tzn. pomiędzy ruchem odbieranym i nadawanym przez węzeł w ramach jednej ścieżki ruchu tranzytowego). Ponadto zastosowano schemat sprawiedliwego przydziału pasma (*Fair Bandwidth Allocation*) w celu uniknięcia problemu niesprawiedliwości między strumieniami, polegającego na wyłącznej rezerwacji zasobów dla węzłów znajdujących się w pobliżu miejsca docelowego np. stacji brzegowej.

Wprowadzone w systemie TRITON istotne modyfikacje technologii WiMAX pozwoliły znacznie zwiększyć jej użyteczność w komunikacji na morzu, umożliwiając uzyskanie przepustowości przekraczających 5 Mb/s. Dodatkowo okazało się, że zasięg łączności między kolejnymi węzłami wynoszący co najmniej 10 km jest wystarczający do tworzenia struktur typu *mesh* wykorzystywanych pomiędzy jednostkami pływającymi. Zmodyfikowane mechanizmy IEEE 802.16 QoS ułatwiają efektywną obsługę dużej liczby terminali pokładowych znajdujących się we wzajemnym zasięgu komunikacji. Dodatkowo proponowane przez autorów tego rozwiązania rozszerzenia umożliwiły integrację sieci wieloskokowej z systemami satelitarnymi, pozwalając na dostęp do Internetu realizowany poprzez łącze satelitarne węzłom nieposiadającym terminali satelitarnych, ale będących w jednej sieci *mesh* z węzłem, który takim terminalem dysponuje.

TRITON nie jest jednak kompatybilny z żadną standardową technologią komunikacyjną, co niesie za sobą następujące wady:

- wykorzystany na jednostkach pływających sprzęt nie będzie mógł zostać użyty do podłączenia się do innych, nawet podobnych instalacji np. instalacji standardowego systemu WiMAX udostępnionego w okolicy portu. Przykładem takiej instalacji może być WISEPORT udostępniony w okolicach portu w Singapurze [91];

- pojawienie się nowszych wersji standardu 802.16 lub aktualizacji dostępnych obecnie wersji może skutkować brakiem możliwości wykorzystania opracowanych w projekcie TRITON modyfikacji;
- ponieważ sieć typu *mesh* wymaga koncentracji węzłów w celu utworzenia ciągłych ścieżek transmisji, wdrożenie systemu musi być przeprowadzone jednocześnie, przy czym wszystkie statki i stacje brzegowe muszą otrzymać i zainstalować specjalistyczny sprzęt (anteny i terminale).

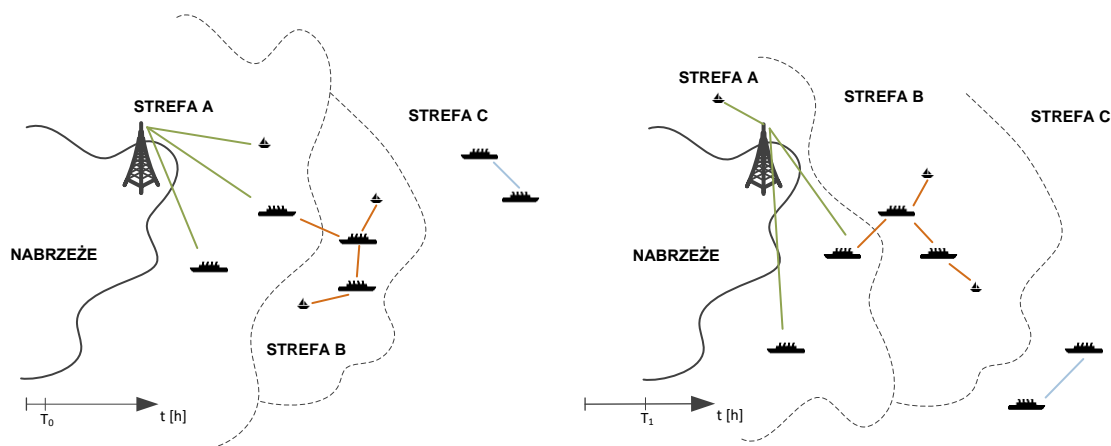
Powyższe cechy sprawiają, że system ten w głównej mierze przeznaczony jest do lokalnych wdrożeń, a nie do wykorzystania jako powszechnie uznane rozwiązanie w zakresie łączności morskiej. Powyższy wniosek jest dodatkowo "wzmocniony" przez fakt, że w projekcie TRITON stosunkowo mało uwagi poświęcono różnym aspektom integracji systemu TRITON z istniejącą infrastrukturą. Można się także spodziewać trudności w instalacji proponowanych rozwiązań antenowych na małych jednostkach morskich. Co więcej, wysoki koszt dostosowanego do potrzeb klienta sprzętu i wykonanych na zamówienie anten prawdopodobnie jeszcze bardziej zmniejsza jego przewagę nad dostępnymi systemami firmowymi.

### 2.4.3 netBaltic

Ciekawe i w pełni nowatorskie mechanizmy sieciowe pozwalające na realizację przekazów wieloskokowych w środowisku heterogenicznym zostały zaproponowane w projekcie netBaltic: *Internet na Bałtyku — Realizacja wielosystemowej, samoorganizującej się szerokopasmowej sieci teleinformatycznej na morzu dla zwiększenia bezpieczeństwa żeglugi poprzez rozwój usług e-nawigacji*. Projekt ten realizowany był przez konsorcjum składające się z zespołów badawczych z Wydziału ETI PG, Instytutu Łączności PIB, Instytutu Oceanologii PAN oraz firm DGT LAB i Navsim. Jego głównym celem było opracowanie kompleksowej architektury integrującej powszechnie dostępne rozwiązania łączności bezprzewodowej, tworząc heterogeniczny system komunikacji na morzu [16]. Już pierwsze założenia stawiane na początku pracy nad proponowanym systemem zakładały, że opracowywane rozwiązania nie mają ingerować w mechanizmy wybranych technik transmisji i będą ulokowane jako rozwiązania warstwy sieciowej, transportowej oraz usługi aplikacyjne.

Zrozumienie opracowanych w ramach projektu netBaltic mechanizmów i scenariuszy ich wykorzystania ułatwi podział całego obszaru działania systemu na strefy

należące do jednego z trzech typów A, B, C (Rys. 2.11) [24]. Każdy typ strefy posiada inne, specyficzne mechanizmy wspomagające łączność i transmisję danych, pozwalając na efektywne wykorzystanie dostępnych zasobów – pasma, zasięgu, aktualnej topologii sieci czy pokonywanej i planowej do pokonania trasy. Chociaż opis poszczególnych mechanizmów dotyczącej każdej ze stref jest rozdzielny, ich implementacja i wdrożenie realizowane są kompleksowo co pozwala na równoczesne funkcjonowanie i korzystanie z ich zalet, wtedy kiedy jest to możliwe.



Rys. 2.11 Podział obszaru działania systemu netBaltic na trzy strefy zróżnicowane sposobem komunikacji

Mechanizmy zaprojektowane dla Strefy A znajdują swoje zastosowanie na obszarze wód o bezpośredniej łączności z infrastrukturą nabrzeża przy wykorzystaniu standardowych technik transmisji. W tym przypadku łącze radiowe traktowane jest jako bezprzewodowe łącze dostępne do stacji bazowych, punktów dostępowych znajdujących się na lądzie. Przy zmieniających się warunkach propagacyjnych, stanu morza, warunków atmosferycznych, zasięg tej strefy będzie ulegał zmianie, ale węzły systemu znajdujące się w jej obszarze będą miały możliwość swobodnego dostępu do Internetu. Z uwagi na potrzebę integracji w systemie wielu technik transmisji różnych technologii i jednocześnie uniezależnienie realizowanych procedur od tych rozwiązań, wyposażenie każdego węzła systemu zostało rozszerzone o specjalizowany interfejs logiczny (warstwa 2.5 w architekturze systemu) ukrywający interfejsy w niższych warstwach stosu sieciowego. Przy pomocy specyficznych, programistycznych interfejsów dostępowych dedykowane moduły funkcjonalne węzła systemu pobierają aktualne dane dotyczące parametrów poszczególnych interfejsów fizycznych, a następnie przekształcają je na zaproponowany wskaźnik — nazwany w projekcie *Link Quality Indicator* (LQI). Na podstawie wartości



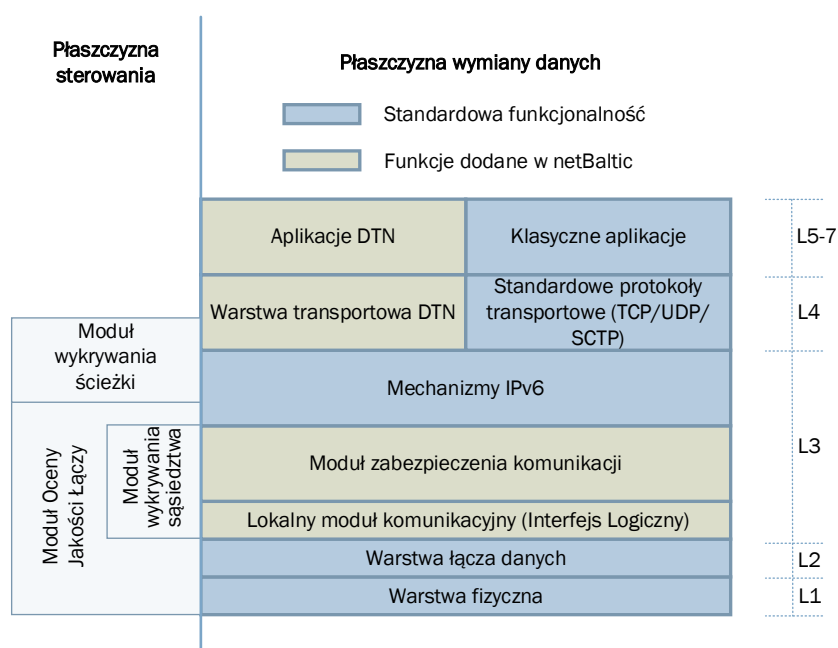
LQI wybrany zostaje najkorzystniejszy (w sensie pożądaných parametrów) interfejs fizyczny wykorzystywany do transmisji danych [13], [15], [22].

Strefa B jest rozszerzeniem Strefy A poprzez rozciągnięcie jej zasięgu w ramach samoorganizującej się sieci typu *mesh*. Terminale posiadające łączność ze stacjami bazowymi nabrzeża mogą udostępniać to połączenie innym terminalom, będącym poza Strefą A [92]. Zastosowanie szerokopasmowej, samoorganizującej sieci kratowej pozwala rozszerzyć zasięg komunikacji poza granicę Strefy A, dzięki wykorzystaniu terminali klienckich jako węzłów pośredniczących w transmisjach do oddalonych węzłów znajdujących się głębiej na morzu. W ten sposób każdy z podłączonych do systemu klientów wpływa na zwiększenie zasięgu jego działania i dostępnych zasobów transmisyjnych. Zastosowane mechanizmy tworzenia i utrzymania topologii sieci, a także wyznaczania tras transmisji danych są zdolne do w pełni autonomicznego działania, co jest niezbędne w środowisku charakteryzującym się dużą zmiennością warunków propagacyjnych i, co za tym idzie, dynamiczną zmianą obszaru objętego poszczególnymi strefami tworzonego systemu. Opracowane mechanizmy pełnią funkcję integrującą zróżnicowane techniki bezprzewodowej transmisji danych, umożliwiając utworzenie i efektywne działanie heterogenicznego systemu sieciowego, zdolnego do wykorzystania nowych, również tych, które się pojawią i będą zdolne do przenoszenia ruchu IP, technik transmisji bezprzewodowej w miarę ich dostępności [21].

Kolejna grupa rozwiązań zaadresowana w projekcie netBaltic to mechanizmy Strefy C, charakterystyczne dla sieci niewrażliwych na opóźnienia DTN [93], które pozwalają na dostarczanie paczek danych od nadawcy do innych węzłów systemu dysponujących połączeniem z Internetem (lub w przeciwną stronę – dystrybuować paczki z Internetu do węzłów bez bezpośredniego połączenia) pomimo braku kompletnej ścieżki transmisyjnej, która mogłaby być wykorzystana przez cały czas połączenia [94]. Węzły obsługujące mechanizmy DTN znajdujące się w zasięgu oryginalnego nadawcy albo innego węzła pośredniczącego w przekazie danych, odbierają tak przygotowaną paczkę i przekazują ją do elementów odpowiedzialnych za dekapsulację z meta-danych i transmisję zgodnie ze standardowymi mechanizmami w Internecie.

Ogólna architektura węzła netBaltic w modelu warstwowym ISO-OSI jest przedstawiona na Rys. 2.12, na którym widać, że wszystkie mechanizmy niezbędne do funkcjonowania systemu są umieszczone powyżej warstwy łącza danych, co zapewnia

elastyczność przejrzystego stosowania różnych technik transmisji bezprzewodowej [18]. Moduły funkcjonalne netBaltic są powiązane ze standardowymi mechanizmami IPv6 znajdującymi się w warstwie sieciowej, co pozwala na ponowne wykorzystanie wielu dobrze zaimplementowanych i przetestowanych elementów tego protokołu, należących głównie do płaszczyzny przekazywania danych, a więc bezpośrednio zaangażowanych w przetwarzanie i przekazywanie ruchu. Działanie tych mechanizmów jest konfigurowane i kontrolowane przez specyficzne dla netBaltic moduły funkcjonalne, z których większość należy do płaszczyzny sterowania systemem. W rezultacie system netBaltic oferuje zgodną ze standardami łączność sieciową IPv6, co ułatwia jego integrację z szeroką gamą zewnętrznych systemów i usług teleinformatycznych (zarówno tych specyficznie morskich, jak i tych ogólnego przeznaczenia, popularnych w środowisku lądowym).



Rys. 2.12 Odniesienie architektury węzła systemu netBaltic od modelu ISO-OSI

W zależności od scenariusza komunikacji i wymagań aplikacyjnych opracowane mechanizmy dążą do zapewnienia możliwie najlepszego sposobu transmisji danych. W tym celu wykorzystywany jest zestaw różnorodnych mechanizmów sieciowych, łączący m.in. możliwość realizacji miękkiego przełączania (szczegółowo opisanego w Rozdziale 3. rozprawy) oraz efektywnego routingu w sieci wieloskokowej. Zaproponowane i zrealizowane podejście jest korzystne dla dostawcy dostępu do sieci – operatora oferującego usługi w strefie przybrzeżnej. W tym przypadku infrastruktura może być lepiej

zaprojektowana i wdrożona, jeśli węzły mobilne są w stanie sprawnie zmieniać swoje punkty przyłączenia do sieci. Aby rozwiązać problem ograniczonej pojemności komórek, można wykorzystać dedykowane punkty dostępowe obejmujące obszary, w których obserwuje się największe zagęszczenie statków, w celu odciążenia systemu bezprzewodowego dalekiego zasięgu.

#### **2.4.4 BlueCom**

Poszukiwanie rozwiązania oferującego komunikację na obszarach morskich, które będzie przystępne cenowo i jednocześnie umożliwiałoby transmisję danych na znacznych obszarach było też celem prac realizowanych w projekcie BlueCom+ [95], prowadzonym przez konsorcjum europejskich instytucji, których współpraca skupia się na poszukiwaniu nowych rozwiązań związanych z tematyką morską obejmującą m.in. pływające pojazdy autonomiczne, roboty podwodne, monitorowanie środowiska morskiego.

Opracowany system wykorzystuje latające węzły pośredniczące nazywane *Flying Wireless Routers* (FWR) - aerostaty działające jako punkty przekaźnikowe w celu maksymalizacji zasięgu [96]. Wyniki symulacji przedstawione w artykule [97] pokazują, że architektura ta pozwala na skuteczną transmisję danych na odcinku ponad 100 km z przepływnością przekraczającą 3 Mb/s dla połączenia z jednym węzłem pośredniczącym. Podczas eksperymentów wykorzystywano częstotliwości w pasmach 500 MHz oraz 700 MHz, a otrzymane wyniki pokazały, możliwość realizacji łączności na pierwszym przeskoku w odległości 45 km od brzegu i około 10 km pomiędzy kolejnymi FWR. Podczas przeprowadzonych testów urządzenie klienckie miało możliwość nawiązania dostępu do Internetu i przekazy danych z szybkością ok. 1 Mb/s.

#### **2.4.5 LTE-MARITIME**

W artykule [98] zaprezentowany został realizowany w Korei projekt badawczy dotyczący wariantu systemu komórkowego LTE-Maritime – system dedykowanego komunikacji z jednostkami pływającymi. W odróżnieniu od innych, najnowszych propozycji rozszerzających zasięg łączności przy użyciu łączy wieloskokowych i sieci typu *mesh*, realizatorzy tego projektu proponują rozwiązanie łączności typu *single-hop* o dużym zasięgu z wykorzystaniem jednorodnej infrastruktury LTE (*Long Term Evolution*). Stacje bazowe (*LTE-Maritime Base Stations*) z antenami umieszczonymi na dużych wysokościach (nawet 350 m nad poziomem morza) pozwalają na bezpośrednią

komunikację ze statkami, zapewniając stosunkowo dobry zasięg i niezawodną komunikację. Sieć LTE-Maritime wykorzystuje częstotliwości z zakresu 700-800 MHz z rozdzielaniem częstotliwości przydzielonych do komunikacji *uplink* oraz *downlink*. Eksperymenty zrealizowane w środowisku rzeczywistym wykazały, że system LTE-Maritime może oferować stosunkowo duże szybkości transmisji danych – rzędu kilku Mb/s przy jednoczesnym zapewnieniu zasięgu około 100 km [99].

#### **2.4.6 MagicNet**

Idea sieci oferującej łączność jednostkom pływającym i skupiającej różnorodne techniki z całego spektrum możliwości, włączając w to łączność satelitarną, powietrzną zapewnianą przez autonomiczne pojazdy latające, wspomaganą dedykowaną infrastrukturą nabrzeżną oraz specjalnymi instalacjami komórek o rozległym pokryciu (*Giantcell*), a ponadto zawierającej komponenty pozwalające na wymianę danych z jednostkami podwodnymi, została opisana w [100]. Niestety, chociaż autorzy prezentują opisaną architekturę jako innowacyjną i wyjątkową na tle innych wcześniej opublikowanych i zaprezentowanych w tym rozdziale rozwiązań, to w związku z brakiem szczegółów technicznych, czy danych potwierdzających jej implementację, należy ją traktować raczej jako koncepcję niż kompleksowy system.

Mając na uwadze wymuszony koniecznością zachowania kompatybilności wstecznej ewolucyjny charakter rozwoju systemów łączności na morzu, w której nowe rozwiązania stanowią rozszerzenie obecnie stosowanych, co widoczne jest zwłaszcza w przypadku systemu VDES, można stwierdzić, że optymalną ścieżką wdrażania szerokopasmowych systemów transmisji bezprzewodowej, które mogłyby sprostać pojawiającym się coraz większym wymaganiom, także tym związanym z e-nawigacją, jest rozwój systemów heterogenicznych, które wykorzystują różnorodne techniki transmisji i wprowadzają dodatkowe integrujące je mechanizmy. Kluczowe w takich systemach są mechanizmy zarządzania mobilnością węzłów implementowane na poziomie warstwy sieciowej — opisane w kolejnym rozdziale rozprawy.



### **3 WYBÓR OPTIMALNEGO INTERFEJSU SIECIOWEGO W PRZYPADKU SIECI O ZRÓŻNICOWANYCH TECHNIKACH TRANSMISJI**

---

Problem obsługi mobilności terminali klienckich występuje w sieciach, w których urządzenia końcowe mogą swobodnie zmieniać punkt podłączenia do sieci – wykorzystywaną stację bazową czy punkt dostępowy. Węzły mobilne zmieniające punkt podłączenia do sieci wymagają specjalnych mechanizmów zarządzania adresacją i podtrzymywania zestawionych wcześniej sesji pozwalających na utrzymanie transmisji po zmianie parametrów podłączenia do sieci. Jako że sieć komunikacji na morzu jest systemem z terminalami mobilnymi, zagadnienie obsługi mobilności pojawia się również w łączności pomiędzy jednostkami pływającymi a infrastrukturą nabrzeżną. Tak jak zostało to wskazane w Rozdziale 2, w przypadku systemów komunikacji morskiej wykorzystanie wielu różnych technik transmisji danych może przynieść szczególne korzyści. Z technicznego punktu widzenia integracja różnych rozwiązań sieciowych wprowadza dodatkowe komplikacje i wymaga dedykowanych mechanizmów m.in. projektowanych w tym celu rozwiązań protokołarnych.

Szczegóły dotyczące taksonomii, podziału i wariantów mechanizmów obsługi mobilności w środowisku heterogenicznych systemów komunikacyjnych zostały opisane w dalszej części rozdziału. Występujące w literaturze klasyfikacje tego typu rozwiązań jasno wskazują, że do poprawnej analizy, modelowania i projektowania mechanizmów obsługi mobilności zasadne jest rozdzielenie tych komponentów oraz rozdzielenie procedur ich realizacji na stosowne fazy, badane i implementowane niezależnie. Taka też metodologia została przyjęta w trakcie prac nad rozwiązaniami opisanymi w tym rozdziale.

Poszukując efektywnej metody wyboru łącza dokonano przeglądu klasycznych rozwiązań szeroko opisywanych w literaturze w postaci różnych wariantów wielokryterialnych metod decyzyjnych. Ponieważ ich wykorzystanie, co wynika z przeprowadzonej analizy, jest silnie powiązane z parametrami określonymi na etapie ich implementacji, autor rozprawy zaproponował opisane w dalszej części rozdziału rozwiązanie bazujące na estymowanej przy pomocy sieci neuronowych, przepływności połączenia TCP.

Procedura przełączenia, polegająca na zmianie szeregu parametrów, pozwalając na utrzymanie ciągłości nawiązanych połączeń po zmianie punktu podłączenia do sieci, może

być realizowana niezależnie od przyjętej metody wyboru łącza. Na potrzeby poprawy efektywności komunikacji na morzu zaproponowano rozszerzenie protokołu Proxy Mobile IPv6 wprowadzające realizację miękkiego przełączenia. W kolejnych punktach rozdziału opisano opracowane rozwiązanie, wskazano jego korzyści oraz przedstawiono rzeczywiste środowisko testowe, w którym weryfikowano implementację proponowanego rozwiązania.

### 3.1 OBSŁUGA MOBILNOŚCI WĘZŁÓW – TAKSONOMIA

W zależności od struktury i rozwiązań zastosowanych w rozważanej sieci, mechanizmy obsługi mobilności można klasyfikować i rozpatrywać pod względem różnych kryteriów. Najprostszym wariantem, który ogranicza się do mechanizmów realizowanych tylko w jednej warstwie, będzie przełączanie realizowane w warstwie łącza danych (*L2 handover*). Jako że w tym przypadku nie jest wymagana zmiana żadnego elementu konfiguracji na poziomie warstwy sieciowej i wyższych, jest to rozwiązanie transparentne dla łączności IP. Przykładem tego typu przełączenia jest zmiana punktu dostępowego sieci Wi-Fi pracującej w trybie ESS (*Extended Service Set*) [101].

Bardziej złożonym wariantem mechanizmów obsługi przełączania jest to, w którym pojawia się konieczność modyfikacji elementów konfiguracji sieci na poziomie warstwy sieciowej. Algorytmy takie nazywane są algorytmami przełączania w warstwie sieciowej (*L3 handover*). Zakres wymaganych zmian zależał będzie od konkretnego scenariusza i obejmować może zmianę adresu IP przypisanego do interfejsu, zmianę routera dostępowego, zmianę sieci dostępowej czy zmianę interfejsu.

Jeżeli pomiędzy elementami sieci (np. elementami pełniącymi funkcje routerów dostępowych, czy punktami dostępowymi) jeszcze przed wystąpieniem samego przełączenia, realizowana jest procedura wymiany informacji mająca na celu usprawnienie procesu przełączania, mówimy o przełączaniu proaktywnym (*proactive handover*), które jest przeciwieństwem przełączania reaktywnego (*reactive handover*). Pewnym wariantem przełączania proaktywnego jest miękkie przełączanie (*soft handover*), w którym przy możliwości wykorzystania wielu interfejsów, podłączamy do nowego punktu dostępowego jeden z nich, zanim odłączymy ten obecnie wykorzystywany.

Innym z kryteriów branych pod uwagę, będzie różnorodność technik transmisyjnych dostępnych dla użytkownika mobilnego. Uwzględniając to kryterium, możemy mówić o przełączaniu horyzontalnym albo przełączaniu wertykalnym:

- Przełączenie horyzontalne (*horizontal handover*) to proces przełączania realizowany w sieciach bezprzewodowych wykorzystujących tę samą technikę transmisji we wszystkich punktach dostępowych. W zależności od zastosowanej techniki transmisji oraz wdrożonych w sieci rozwiązań (np. adresacji IP, routingu), mechanizmy warstwy łącza danych mogą być wystarczające do zapewnienia ciągłości ścieżki przekazywania danych i utrzymania zestawionych wcześniej sesji.
- Przełączenie wertykalne (*vertical handover*) jest określeniem procesu zmiany punktu podłączenia do sieci, w którym punkty dostęgowe (w sieci obecnie wykorzystywanej i sieci docelowej) realizują łączność przy pomocy różnych technik transmisji danych. W tym przypadku przełączanie realizowane będzie pomiędzy różnymi interfejsami sieciowymi węzła (interfejsy różnych technik transmisji), co wymaga dodatkowych mechanizmów zapewniających utrzymanie adresacji i tras oraz ciągłości sesji.

Niektóre opracowania wprowadzają jeszcze trzeci typ przełączeń definiowany jako przełączenia diagonalne (*diagonal handover*), oznaczające przełączenie pomiędzy różnymi wariantami sieci dostępowej realizowanej z wykorzystaniem tej samej techniki transmisji [102]. Określenie to pojawia się zwłaszcza w kontekście sieci Wi-Fi dla przełączeń realizowanych pomiędzy różnymi wariantami sieci IEEE 802.11, np. sieciami określonymi przez standardy IEEE 802.11ac i IEEE 802.11n. Wyszczególnienie i stosowanie tej dodatkowej kategorii wydaje się jednak zbędne. W zależności od sposobu zaprojektowania i wdrożenia sieci bezprzewodowej, dostępnych w węzle interfejsów, ich rodzajów i liczby, mechanizmy klasyfikowane do tej kategorii sprowadzą się do podobnych rozwiązań przewidzianych dla przełączania wertykalnego lub horyzontalnego.

Kolejnym kryterium wartym wspomnienia jest zakres możliwości gromadzenia informacji, nadzoru nad procesem realizacji przełączenia i konfiguracji elementów wpływających na ten proces, czyli procedur definiujących to, czy dany proces przełączania realizowany jest w obrębie jednej domeny zarządzania czy też nie. Jeżeli wszystkie komponenty biorące udział w przełączaniu są nadzorowane przez jeden podmiot, to mówi się o mikro zarządzaniu mobilnością (*micro-mobility management solution*). W

przeciwnym przypadku, czyli kiedy nie wszystkie komponenty zostają pod nadzorem tego samego podmiotu, mówimy o zarządzaniu mobilnością w skali makro (*macro-mobility management solution*). To kryterium będzie szczególnie widoczne w przypadku opisywanych w dalszej części rozdziału różnic pomiędzy rozwiązaniami konkretnych protokołów sygnalizacyjnych pozwalających na utrzymanie adresacji oraz ścieżek i sesji pomiędzy węzłami korespondującymi.

W zależności od tego, która ze stron biorących udział w przełączaniu rozpoczyna ten proces, możemy wyróżnić metody inicjalizowane przez węzeł mobilny (*node-initiated handover*) oraz metody inicjalizowane przez elementy sieci (*network-initiated handover*). Podobne, jednak szersze spojrzenie na klasyfikację metod przełączania widzimy w rozróżnieniu metod realizowanych jedynie przez elementy sieci (*network-based handover*), lub takich, w których węzeł mobilny bierze czynny udział w przełączaniu (*host-based handover*).

Metodami przełączania odpowiednimi do wdrożenia w heterogenicznej strukturze skupiającej różnorodne techniki transmisji będą metody obsługi mobilności realizujące przełączenia wertykalne i to one zostały szerzej omówione w kolejnych punktach rozdziału.

### **3.2 MECHANIZMY OBSŁUGI PRZEŁĄCZEŃ WERTYKALNYCH**

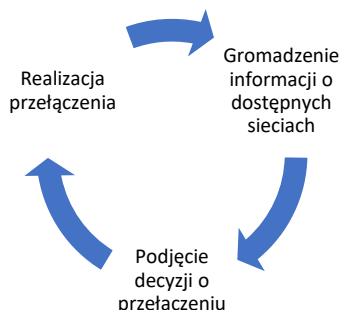
Realizacja przełączeń wertykalnych jest stosunkowo złożonym procesem, dla którego zaproponowane zostały fazy:

- faza gromadzenia informacji o dostępnych sieciach,
- faza podjęcia decyzji o przełączeniu,
- faza realizacji przełączenia,

które obejmują swoją definicją różne operacje mające na celu doprowadzenie do wyboru najlepszego z dostępnych interfejsów i przeprowadzenie możliwie sprawnie procedury zmiany sieci dostępowej.

Ponieważ obsługa mobilności węzłów jest procesem ciągłym, fazy przełączania wertykalnego będą realizowane w cyku, pozwalając na nieustanne monitorowanie środowiska uwzględniającego zbieranie parametrów sieci, podejmowanie decyzji o tym,

czy potrzebne i wskazane jest przełączenie do innej sieci oraz, w razie podjęcia stosownej decyzji, realizację samego przełączenia. Fazy tego procesu zostały schematycznie przedstawione na Rys. 3.1, a w szczegółach opisane w kolejnych punktach rozdziału.



Rys. 3.1 Fazy przełączania w środowisku sieci heterogenicznych

### 3.2.1 Faza gromadzenia informacji

Faza gromadzenia informacji jest pierwszą fazą procesu realizacji przełączania wertykalnego. Jej celem jest pozyskanie informacji opisujących aktualny stan systemu oraz warunki jego funkcjonowania. Gromadzone parametry mogą obejmować nie tylko podstawowe informacje o stanie sieci, ale również szereg dodatkowych informacji, takich jak np. lokalizacje terminali mobilnych, preferencje użytkowników, informacje dotyczące trendu przemieszczania się użytkowników, informacje dotyczące zmieniającej się popularności treści dostarczanych przez sieć. Zestawienie parametrów analizowanych przez różnorodne metody przedstawiono w Tabeli 3.1.

Szeroki zestaw parametrów, wśród których znajdują się te wymienione w Tabeli 3.1, oferujący kompleksowe spojrzenie na sieć i pracujące w niej węzły, stanowił będzie dane wejściowe dla rozwiązań inicjalizowanych przez sieć. W praktyce tego typu rozwiązania, wprowadzające możliwość wykorzystania dodatkowych technik transmisji na potrzeby odciążenia (*offloading*) podstawowej infrastruktury sieci komórkowej, najczęściej wykorzystywane będą przez operatorów takich właśnie systemów. W przypadku mechanizmów inicjalizowanych przez węzeł mobilny, zarówno zasób dostępnych parametrów, jak i możliwości obliczeniowe będą ograniczone, w związku z czym w tej grupie rozwiązań decyzja o przełączeniu podejmowana będzie przy wykorzystaniu mniejszej liczby parametrów.

Tabela 3.1 Przykładowe parametry zbierane w trakcie fazy gromadzenia informacji

Rodzaj		Parametr
Sieciowe	Warstwa Aplikacji	Preferencje użytkowników Informacje kontekstowe Parametry określające jakość i poziom usług (KPI, QoS, QoE) Informacje dotyczące incydentów bezpieczeństwa
	Warstwa Transportowa	Parametry określające jakość i poziom transmisji danych (KPI, QoS, QoE)
	Warstwa Sieciowa	Metoda zarządzania mobilnością Metoda uwierzytelnienia do sieci Konfiguracja sieci (adresacja, routing) Topologia sieci
	Warstwa łącza danych	Parametry sygnałowe łącza (związane z propagacją) Parametry jakościowe łącza (związane z innymi użytkownikami łącza) Metoda uwierzytelnienia na łączu Dostępność łącza Stabilność łącza
Inne	Ekonomiczne	Koszt transmisji danych Koszt abonamentu Koszt dostępu do danej techniki transmisji
	Związane z mobilnością	Aktualny rozkład lokalizacji terminali mobilnych Przewidywany rozkład lokalizacji terminali mobilnych Prędkość poruszania się terminala Kierunek poruszania się terminala

### 3.2.2 Faza podjęcia decyzji o przełączeniu

Dysponując danymi zgromadzonymi w poprzedniej fazie, w kolejnym kroku, na etapie podjęcia decyzji o przełączeniu możliwe jest wykorzystanie różnorodnych algorytmów decyzyjnych, których zadaniem będzie wskazanie, kiedy należy zrealizować przełączenie, i który z dostępnych interfejsów należy wybrać.

W ramach operacji realizowanych w tej fazie, z grupy wszystkich dostępnych parametrów, wybierane są te istotne dla zastosowanej metody wyboru łącza. W zależności od wykorzystywanej metody i struktury sieci, mogą to być parametry dostępne z poziomu niższych warstw (najczęściej parametry sygnałowe), albo, co jest rozwiązaniem bardziej adekwatnym dla środowiska heterogenicznego, uwzględniać można parametry z wielu warstw – będzie to podejście międzywarstwowe (*cross-layer solution*) [11].

Analizowane parametry dla różnych technik transmisji, czy różnych instalacji mogą być raportowane w odmienny sposób. Przykładem takiej sytuacji może być niestandardowy parametr opisujący jakość połączenia Wi-Fi, który wyznaczany jest w różny sposób w różnych implementacjach tego rozwiązania – w systemie Linux parametr

*Quality* powiązany jest z wartością *RSSI (Received Signal Strength Indication)*, a dostępny w systemie operacyjnym RouterOS, parametr *Client Connection Quality* wyznaczany jest na podstawie czasu potrzebnego na transmisję poszczególnych ramek. Bezpośrednie porównanie tych parametrów, chociaż w pewien sposób odnoszą się one do jakości transmisji poprzez łącze bezprzewodowe, nie jest możliwe. W związku z tym może pojawić się konieczność wstępnego przetworzenia parametrów i próba sprowadzenia ich do porównywalnych wartości. Niestety, niejednokrotnie w systemach heterogenicznych nie będzie to możliwe, a zestaw parametrów wykorzystywanych w metodzie decyzyjnej nie będzie uwzględniał warstw fizycznej i łącza danych.

Metody znajdujące zastosowanie w ramach tej fazy, można sklasyfikować w kilku grupach [103], jako:

- Funkcje decyzyjne;
- Strategie ukierunkowane na użytkownika;
- Wielokryterialne metody podejmowania decyzji;
- Metody logiki rozmytej;
- Metody wykorzystujące teorię gier;
- Systemy reputacyjne;
- Metody wykorzystujące uczenie maszynowe.

### 3.2.3 Faza realizacji przełączenia

Po podjęciu decyzji o przełączeniu na wybraną technikę transmisji, zrealizowana musi zostać procedura wymiany wiadomości sygnalizacyjnych, która pozwoli na utrzymanie dotychczasowego adresu IP, aktualizację trasy dostarczania wiadomości i utrzymanie wcześniej zestawionych, a obecnie wykorzystywanych sesji. W przypadku możliwości wykorzystania więcej niż jednego interfejsu pojawia się dodatkowo sposobność realizacji miękkiego przełączenia, pozwalającego w znaczny sposób zminimalizować wpływ przełączania na parametry transmisji, a w szczególności ograniczyć przerwę w transmisji danych.

W ramach fazy realizacji przełączania w sieciach heterogenicznych, w praktyce, rozważa się dwie grupy rozwiązań protokolarnych – protokoły obsługi mobilności

uwzględniające zaangażowanie węzła mobilnego oraz protokoły obsługi mobilności wykorzystujące jedynie komunikację pomiędzy elementami infrastruktury sieci.

Do najczęściej spotykanych rozwiązań problemu zarządzania mobilnością węzłów realizowanych w warstwie sieciowej można zaliczyć dwa protokoły Mobile IPv6 (MIPv6) [104] oraz Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) [105] wraz z szeregiem modyfikacji. W obu przypadkach modyfikacje te wprowadzają usprawnienia pozwalające na zwiększenie efektywności przełączania – czego przykładem mogą być rozwiązania zaproponowane w [106], [107]. Choć każde ze wspomnianych rozwiązań realizuje podobne zadania, cel ich implementacji pozostaje przecież taki sam, to bazują one na innych, przeciwstawnych założeniach w obrębie tego, jak obsługa mobilności powinna być realizowana. MIPv6 jest protokołem zapewniającym możliwość obsługi mobilności globalnie, realizując procedurę zarządzania mobilnością bezpośrednio przez zainteresowany nią węzeł, a niezależnie od infrastruktury występującej w sieciach odwiedzanych przez węzeł mobilny (niektóre z proponowanych rozszerzeń MIPv6 odchodzą od tego założenia, pozwalając na zwiększenie efektywności samego przełączania). Będzie to zatem rozwiązanie zaliczane do grupy *host-based mobility management*. Natomiast, PMIPv6 jest przykładem podejścia, w którym to elementy infrastruktury sieciowej, bez angażowania terminala mobilnego, przeprowadzają procedurę obsługi mobilności (będzie to klasyczny przykład rozwiązania *network-based mobility management*). W tym przypadku nie ma konieczności, aby węzeł mobilny był świadomy samego procesu zarządzania mobilnością. Ceną za uproszczenie tej procedury jest możliwość zapewnienia ciągłości połączenia jedynie w obrębie pojedynczej domeny zarządzania, a nie globalnie, jak to ma miejsce w MIPv6. W tym przypadku jednak domena zarządzania nie ogranicza się do jednej sieci lokalnej, a może obejmować również odległe i połączone poprzez sieci zewnętrzne segmenty należące do jednego operatora.

### **3.3 PROBLEM WYBORU ŁĄCZA – TECHNIKI DECYZYJNE**

Niezależnie od zastosowanego rozwiązania sygnalizacyjnego, bazującego na protokole MIPv6 czy PMIPv6, przed rozpoczęciem procedury samego przełączenia konieczne jest dokonanie wyboru interfejsu i sieci, na który ma nastąpić to przełączenie. Zagadnienie to jest o tyle istotne, że nieprawidłowy wybór sieci docelowej może negatywnie wpłynąć na efektywność transmisji danych.



W niniejszym podpunkcie opisane zostały rozwiązania wielokryterialnego podejmowania decyzji wskazywane przez szereg lat jako metody adekwatne do zastosowania w środowisku heterogenicznych sieci bezprzewodowych. Bazując na analizie literatury, wskazane zostały zalety i wady poszczególnych grup rozwiązań, a opis ten stanowi tło dla rozwiązań zaproponowanych przez autora rozprawy i opisanych w dalszej części pracy.

### **3.3.1 Wielokryterialne metody wspomagające podjęcie decyzji**

Występujące w systemach heterogenicznych, poszczególne techniki transmisji bezprzewodowej, niejednokrotnie projektowane były z myślą o różnych rodzajach zastosowań i przeznaczeniu do obsługi różnych typów użytkowników końcowych. Każdy z nich opisany może zostać przez zbiór parametrów starających się odwzorować szereg czynników, które mają bezpośredni wpływ na jakość połączenia. Wskazanie najlepszej z dostępnych sieci realizowane z wykorzystaniem opisujących je parametrów, często nie jest zadaniem łatwym, a chęć usprawnienia tego procesu prowadzi do wprowadzania dedykowanych algorytmów, które mają wspomagać cały proces. Na przestrzeni ostatnich lat pojawiło się wiele strategii mających na celu ułatwienie wyboru sieci, a samo zagadnienie wyboru łącza w środowisku heterogenicznym było przedmiotem licznych prac [108] [109] [110] [111] [112]. Na podstawie ich analizy, można zauważyć, że przez szereg lat, techniki opisujące problem wyboru sieci jako problem wielokryterialnego podejmowania decyzji (MCDM – *Multiple-Criteria Decision Making*) [113] cieszyły się dużą popularnością.

Analiza wielokryterialna zakłada możliwość uwzględnienia szeregu czynników, wśród których w kontekście wyboru łącza możemy mówić m.in. o koszcie transmisji danych, przepustowości łącza, opóźnieniu łącza, przepływności realizowanych poprzez łącze połączeń, czy poziomie bezpieczeństwa. Jak można zauważyć, wśród opisanych kryteriów występują zarówno te ilościowe – łatwo mierzalne, jak również jakościowe – trudno mierzalne (np. poziom bezpieczeństwa). Każde z tych kryteriów oceniane jest przy uwzględnieniu wagi określającej istotność analizowanego parametru. Celem takiej analizy jest wskazanie rozwiązania, wariantu, który będzie najlepszy zgodnie z przyjętymi kryteriami.

Wśród szeregu rozwiązań metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji, jako te najczęściej pojawiające się w kontekście wyboru łącza wymienić można [114]:

- metody addytywne,
- metody multiplikatywne
- metody wykorzystujące proces analitycznej hierarchizacji,
- metodę TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*).

### **Metody Addytywne**

Proste ważenie addytywne SAW (*Simple Additive Weighting*) to technika MCDM, która bazuje na średniej ważonej wyznaczanej dla każdej z sieci dostępowych na podstawie analizowanych kryteriów. Ze względu na nieskomplikowane obliczenia i niewielką jej złożoność jest to jedna z najprostszych metod MCDM [115] [116] [117]. Wykorzystanie tej metody zakłada przygotowanie macierzy znormalizowanych ocen dla analizowanych kryteriów i wybór wariantu, który oferuje najwyższą sumę ocen.

Proste ważenie addytywne jest szeroko stosowane w podejmowaniu decyzji o wyborze sieci dostępowej. Analiza przedstawiona w [118] pokazała, że przy dużej łatwości w implementacji, wyniki zaprezentowane dla tej metody nie odbiegały znacząco od bardziej złożonych metod. Podobne rezultaty otrzymane na podstawie analizy bardziej złożonego środowiska uwzględniającego sieci heterogeniczne integrującego sieci Wi-Fi i system 4G zaprezentowane zostały w [119] [120].

### **Multiplicative exponent weighting**

Metoda MEW (*Multiplicative Exponent Weighting*) [121] jest bardzo podobna do algorytmu SAW. Główna różnica polega na tym, że średnia ważona została zastąpiona średnią geometryczną. Na podstawie MEW opracowano wiele algorytmów wyboru sieci. Przykładem może być rozwiązanie z pracy [122], w której algorytm MEW został zastosowany do podejmowania decyzji o przełączaniu wertykalnym na podstawie następujących parametrów: przepustowość łącza, opóźnienie, współczynnik utraty pakietów oraz koszt transmisji danych. Wyniki symulacyjne przedstawione w tym artykule, uwzględniające rozróżnienie strumieni ruchu na strumienie różnych klas (ruch VoIP, ruch usług strumieniowania, ruch tła), pokazują, że MEW oferuje podobną efektywność co

SAW i TOPSIS. Odmienne wnioski można jednakże wyciągnąć z analizy rozwiązań zaprezentowanych w [123]. Różnice w efektywności tych samych metod prezentowanych w różnych publikacjach mogą wynikać z dużej wrażliwości omawianych metod na wartości wag przypisanych do poszczególnych atrybutów. Pokazuje to istotną wadę całej klasy tego typu rozwiązań.

### **Analytic hierarchy process**

Proces analitycznej hierarchizacji AHP (*Analytic Hierarchy Process*) można opisać jako technikę, która dzieli złożony problem na szereg prostszych podproblemów. AHP wykorzystuje porównywanie parami analizowanych wariantów decyzyjnych, z wykorzystaniem opracowanej dla każdego kryterium tablicy oceny [124]. W przypadku złożonych problemów możliwe jest wprowadzenie dodatkowych poziomów hierarchii odwzorowujących dodatkowe podkryteria. Wśród etapów opisywanej metody wyróżnia się: 1) budowę modelu hierarchicznego; 2) określenie preferencji poprzez przypisanie względnych ocen ważności wariantów i kryteriów; 3) ocenę poszczególnych wariantów i weryfikację spójności; 4) klasyfikację dostępnych wariantów zgodnie z wyznaczoną oceną.

Rozszerzeniem metody AHP niwelującym ewentualną niejasność powiązań pomiędzy kryteriami decyzyjnymi jest rozwiązanie FAHP (*Fuzzy AHP*), w którym zaproponowano zastosowanie elementów logiki rozmytej [125]. Rozszerzenie to zostało zastosowane m.in. w [126], jako narzędzie wspomagające wybór sieci w środowisku heterogenicznym. W artykule tym, w analizie numerycznej przebadano sieci o różnorodnej charakterystyce, weryfikując przydatność proponowanej metody dla obsługi ruchu z uwzględnieniem zróżnicowania na usługi głosowe, usługi wideo i ruch tła. Podobne rezultaty, wskazujące na korzyści płynące z zastosowania FAHP, wykazano m.in. w [127] [128].

### **TOPSIS**

Technika TOPSIS to kolejna metoda szeroko stosowana do rozwiązywania problemów MCDM [129]. Jej głównym założeniem jest wprowadzenie miary odległości od rozwiązania idealnego oraz najgorszego (antyidealnego). Jako wariant najlepszy przyjmuje się ten, który ma najmniejszą odległość od rozwiązania idealnego oraz największą od antyidealnego. Wśród etapów procedury wykorzystania techniki TOPSIS wymienić można: 1) utworzenie znormalizowanej macierzy danych wejściowych, 2)

określenie wag poszczególnych kryteriów i ich uwzględnienie dla analizowanych danych wejściowych, 3) ustalenie parametrów opisujących rozwiązanie najlepsze i najgorsze, 4) obliczenie odległości pomiędzy analizowanymi wariantami a rozwiązaniem najlepszym i najgorszym, 5) wyliczenie współczynnika rankingowego określającego podobieństwo wariantów do rozwiązania idealnego.

Podobnie jak w przypadku metody AHP, również dla TOPSIS zaproponowane zostało rozszerzenie wprowadzające elementy logiki rozmytej, które ma usprawnić wybór łącza i uniezależnić podjętą decyzję od niedokładności parametrów opisujących dostępne warianty, czego przykładem mogą być prace [130] [131] [132] [133] [134].

W wielu badaniach proponowane jest rozwiązanie, które wykorzystuje połączenie wcześniej opisanych technik w obrębie złożonych, wieloetapowych metod wyboru łącza [135] [136]. Takie połączenie zakłada wykorzystanie zalet poszczególnych metod na kolejnych etapach selekcji interfejsu bezprzewodowego np. poprzez zastosowanie metod SAW lub MEW do wstępnego określenia wag, FAHP do określenia wag istotności usług, a TOPSIS do końcowej klasyfikacji dostępnych metod [137].

W opisywanych algorytmach istotną rolę odgrywa odpowiednie przypisanie wag do atrybutów opisujących dostępne warianty [138]. Do najpopularniejszych metod można zaliczyć określanie wag z wykorzystaniem entropii [139] oraz określanie wag z wykorzystaniem odchylenia standardowego [140]. Jak zostało to już wspomniane, różny dobór wag, może doprowadzić do różnych wyników przy zastosowaniu podobnych metod. Niezależnie od zastosowanej metody, wynik końcowy w postaci wskazanej sieci, na którą ma nastąpić przełączenie, a stanowiący rezultat zastosowania jednej z technik rozwiązywania problemu MCDM nie jest jasny i czytelny dla użytkownika końcowego.

Wspomniana wada może być jedną z przyczyn, dla których w ostatnich latach na popularności zyskują metody wykorzystujące inne podejście, w których to wybór łącza odbywa się na podstawie oszacowanej jakości łącza. Niewątpliwym wpływem na rozwój tych rozwiązań ma możliwość wykorzystania metod uczenia maszynowego na potrzeby oceny jakości łącza [141]. Właśnie ta ścieżka została wybrana przez autora rozprawy i wykorzystana w zaproponowanej w dalszej części rozdziału metodzie wyboru łącza.

### 3.4 ROZWIĄZANIA WYKORZYSTUJĄCE SIECI NEURONOWE

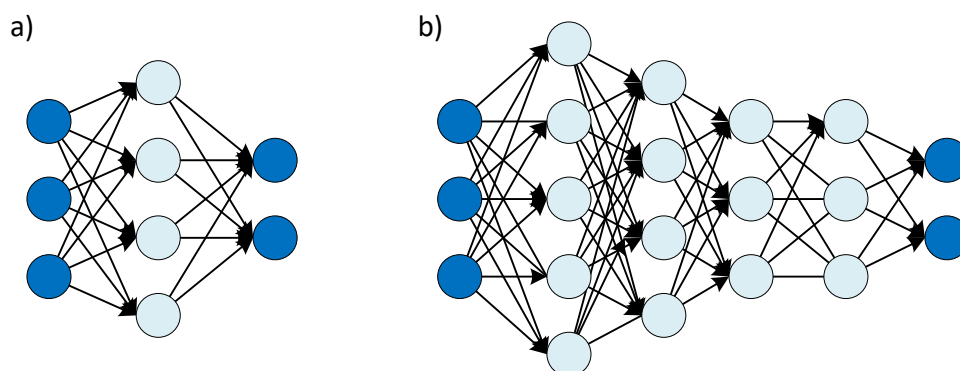
Wraz ze zwiększającą się dostępnością układów sprzętowo wspomagających obliczenia, wykorzystywanych w rozwiązaniach sieci neuronowych, samo zastosowanie sieci neuronowych, a zwłaszcza głębokich sieci neuronowych, rozumianych jako tych o bardziej złożonej strukturze, również rośnie. Ten trend widoczny jest zarówno w pracach badawczych opisywanych w ostatnich latach [142], jak również w rozwiązaniach dostępnych już komercyjnie, np. w zakresie wspomaganie analizy obrazów (klasyfikacji obrazów i ich fragmentów, wyszukiwania reprezentantów wskazanych obiektów), analizy szeregów czasowych, modelowania zachowań użytkowników różnych systemów teleinformatycznych, a także systemach kontroli i sterowania (np. na potrzeby autonomicznych pojazdów).

Klasyczne podejście analityczne bazujące na dekompozycji problemu, opracowaniu modeli uwzględniających obserwowane zjawiska i wyborze istotnych parametrów pozwalających na opisanie tych zjawisk, prowadzi, w wielu przypadkach, do rozwiązań bardzo złożonych i trudnych. W przypadku rozwiązań wykorzystujących głębokie sieci neuronowe, podobnie jak w innych rozwiązaniach uczenia maszynowego, obserwujemy pewnego rodzaju odejście od tego klasycznego podejścia. W ujęciu tym, analizie podlegają zbiory danych, które odpowiednio przygotowane mają stanowić swego rodzaju obraz docelowego środowiska implementacji rozwiązania z uwzględnieniem obserwowanych w nim zjawisk.

Struktury głębokich sieci neuronowych, chociaż znane od wielu lat, początkowo porzucone ze względu na ograniczone możliwości obliczeniowe, ponownie zyskały zainteresowanie badaczy po roku 2006, kiedy to ukazała się praca przedstawiająca strukturę *Deep belief networks* [143]. Autorzy tego artykułu zaprezentowali skuteczną procedurę pozwalającą na wytrenowanie modeli głębokich. Mimo że zaproponowana metoda nienadzorowanego przyuczania wstępnego (*unsupervised pre-training*) straciła z czasem na popularności, jej publikacja stanowiła przełom, który ukazał problem uczenia sieci głębokich jako problem optymalizacyjny.

Jak wskazuje sama nazwa, głębokie sieci neuronowe inspirowane są sposobem funkcjonowania mózgu, w którym to w pierwszej kolejności przyswajane są prostsze idee, a następnie na podstawie takiego doświadczenia możliwe jest przetwarzanie bardziej

złożonych problemów. Przykładowe struktury sztucznej sieci neuronowej i głębokiej sieci neuronowej zostały zaprezentowane na Rys. 3.2.



Rys. 3.2 Porównanie struktur sieci neuronowych — płytkiej a) oraz głębokiej b)

Efektywne wykorzystanie głębokich sieci neuronowych wspomagających rozwiązywanie zadań praktycznych, początkowo niewzbudzające dużego zainteresowania, obecnie jest podstawą wielu metod wykorzystywanych w licznych obszarach naszego życia. Było to możliwe dzięki pojawiającym się w ostatnich kilkunastu latach propozycjom ich optymalizacji i usprawnień procesu uczenia [144], w tym:

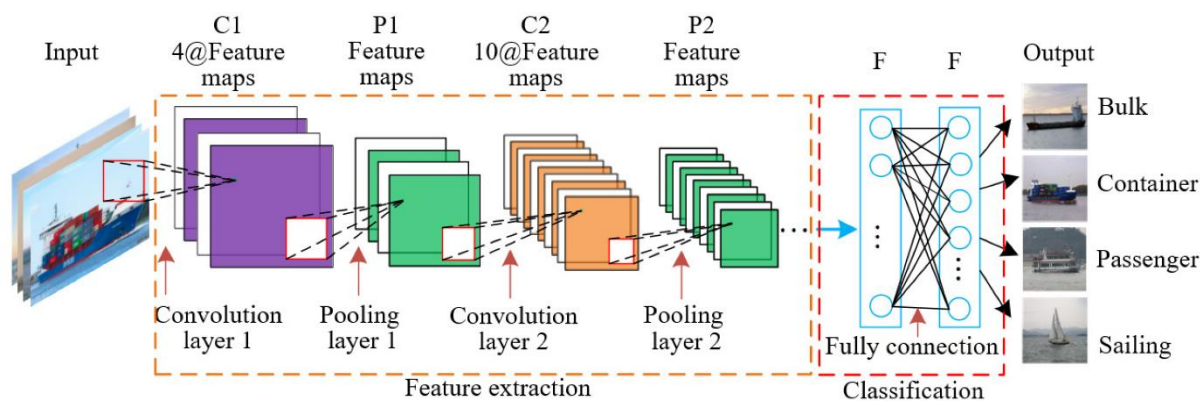
- wykorzystaniu mocy obliczeniowej procesorów graficznych pozwalających na równoległe szereg obliczeń i spopularyzowaniu interfejsów programistycznych pozwalających na ich użycie;
- wykorzystaniu odpowiednich funkcji aktywacji np. ReLU [145] pozwalających m.in. na zmniejszenie liczby potrzebnych epok do uzyskania końcowego wyniku czy ominięcie procesu przyuczania;
- zwróceniu uwagi na efekt inicjalizacji wag modeli i ich wpływu na efektywność uczenia;
- uwzględnieniu metod zwiększających możliwość generalizacji (np. normalizacji [146], regularyzacji [147] i wprowadzeniu warstw typu dropout [148]);
- wykorzystaniu adaptacyjnych metod uczenia gradientowego (np. AdaGrad, AdaDelta [149]).

Wprowadzenie już kilku ukrytych warstw sieci, w głębokich sieciach neuronowych, może przynieść istotną poprawę efektywności jej działania [150]. Jak pokazują jednak analizy, zysk ten nie rośnie liniowo i będzie w dużej mierze zależał od rozwiązywanego

problemu, wykorzystywanych modeli oraz stosowania rozwiązań wskazanych w poprzednim akapicie.

Wraz z rozwojem koncepcji wykorzystania głębokich sieci neuronowych pojawiły się również propozycje wykorzystania bardziej złożonych struktur, stanowiących odwzorowanie dodatkowych operacji matematycznych (sieci splotowe) lub struktury rekurencyjne pozwalające na zmniejszenie rozmiaru sieci (*Recurrent Neural Networks – RNN* i *Long-Short-Term Memory – LSTM*).

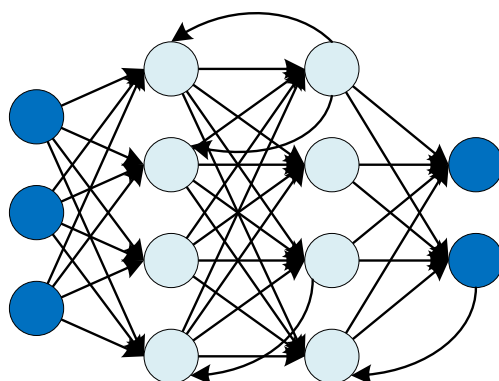
Splotowe sieci neuronowe [151], to sieci, które w co najmniej jednej warstwie zamiast mnożenia macierzy wykorzystują operację splotu. Są one szczególnym rodzajem sieci neuronowych wykorzystywanych do przetwarzania danych logicznie reprezentowanych w formie macierzowej. Przykładem mogą być dane dotyczące obrazów, które można interpretować jako dwuwymiarową siatkę pikseli. Już sama nazwa splotowe sieci neuronowe wskazuje, że pojawiają się w nich warstwy splotowe, których głównym zadaniem jest wyodrębnienie cech odróżniających od siebie analizowane obiekty poprzez przeprowadzenie operacji splotu na fragmentach zbioru stanowiącego dane źródłowe warstwy wejściowej. Wynik działania takiego filtru stanowi wejście dla kolejnej warstwy sieci. Wagi oraz parametry poszczególnych filtrów ustalane są w procesie uczenia sieci.



Rys. 3.3 Przykładowa struktura sieci splotowej [157]

Sieci rekurencyjne RNN są w szczególności wykorzystywane do przetwarzania danych sekwencyjnych. W przeciwieństwie do innych klas struktur sieci neuronowych, w tym przypadku występują dodatkowe powiązania pomiędzy wyjściami z niektórych warstw a wejściami warstw wcześniejszych. Dzięki swojej strukturze zawierającej dodatkowe powiązania sieci rekurencyjne mogą skalować się do znacznie dłuższych sekwencji, niż byłoby to implementowane w przypadku struktur sieciowych opisanych

wcześniej. Ilustracja przykładowej architektury sieci rekurencyjnej została zaprezentowana na Rys. 3.4.

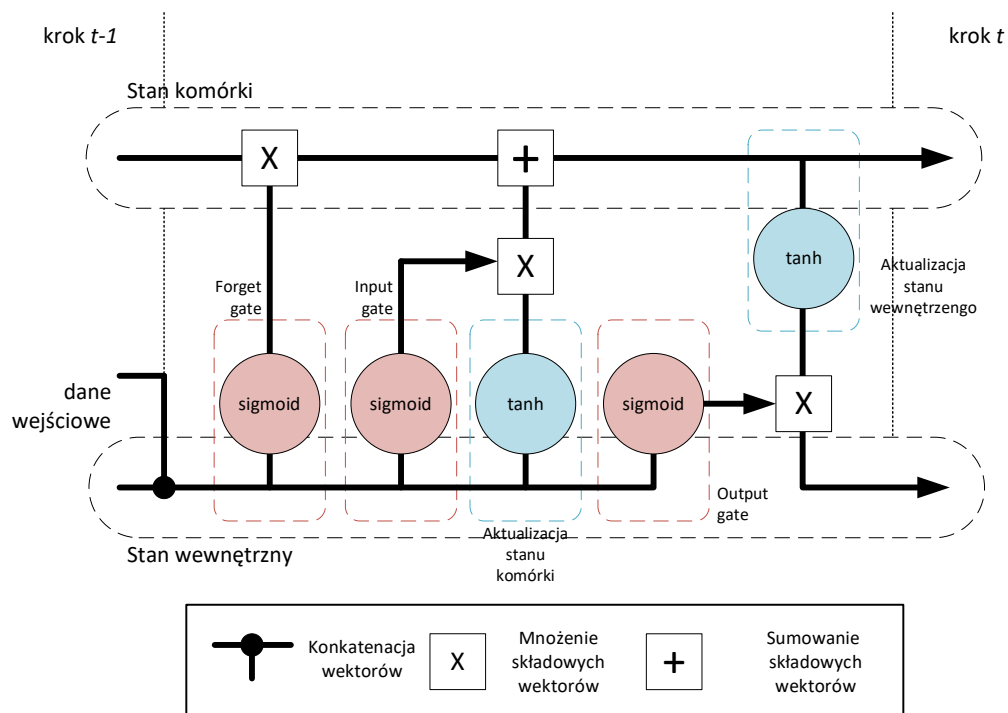


Rys. 3.4 Struktura sieci rekurencyjnej

Szczególnym przypadkiem sieci rekurencyjnej są sieci LSTM [152], które pozwalają na uwzględnienie zależności występujących pomiędzy elementami ciągu wejściowego, oddalonymi od siebie w znaczący sposób (Rys. 3.5). Uwzględnienie takich zależności przez standardowe sieci RNN jest trudniejsze m.in. ze względu na występowanie problemu zanikającego gradientu (*vanishing gradient*) [153]. W architekturze sieci LSTM pojawiają się dodatkowe bramki (*gate*), które pozwalają na sterowanie procesem uczenia i wyznaczenie stanu poszczególnych komórek:

- Input gate – pozwala określić, które elementy informacji pochodzących z wejścia oraz poprzedniego stanu ukrytego wpływają i w jaki sposób na stan komórki;
- Output gate – określa, jaki powinien zostać ustawiony stan ukryty dla elementów informacji pochodzących z wejścia oraz poprzedniego stanu ukrytego;
- Forget gate – pozwala na określenie, które elementy informacji pochodzące z wejścia oraz poprzedniego stanu ukrytego są istotne, a które nie.





Rys. 3.5 Architektura sieci LSTM

Wykorzystanie mechanizmów wspomaganych sieciami neuronowymi w sieciach komputerowych jest przedmiotem intensywnych prac różnych zespołów badawczych w ciągu ostatnich lat [154].

W pracy [103] zaznaczono, że istotnym elementem mechanizmów przełączania w nowoczesnych sieciach heterogenicznych jest możliwość uwzględnienia parametrów QoS. W zestawieniu kategorii rozwiązań obsługi mobilności terminali biorących pod uwagę parametry jakościowe transmisji danych użytkownika wyszczególniono: a) proste rozwiązania korzystające z analizy parametru SNIR (*Signal to Noise plus Interference Ratio*); b) złożone rozwiązania wiążące ogólną ocenę jakości z profilem użytkownika; c) rozwiązania wykorzystujące oszacowaną przepustowość dostępną w poszczególnych sieciach. Pierwsze dwie, ze wspomnianych kategorii, cechują się niewystarczającą dokładnością wyboru łącza widoczną zwłaszcza dla szybko poruszających się węzłów, lub stosunkowo dużą złożonością obliczeń niezbędnych do wskazania nowej sieci. Najbardziej obiecującą zdaje się być grupa trzecia, która, zdaniem autorów opisywanego zestawienia, pozwala na poprawny wybór sieci, ale równocześnie przynosi nowe wyzwanie w postaci problemu estymowania przepustowości łącza.

Rozwiązanie tego problemu adresowane jest w licznych publikacjach m.in. [141] [155]. Z publikacji tych wynika m.in., że w przypadku mechanizmów przełączania

wykorzystujących sieci neuronowe, problem wyboru łącza sprowadza się często do predykcji jakości dostępnych łączy i wyboru tego, który oferuje najlepszą jakość. Uwzględniając opisany stan sztuki oraz wskazane korzyści płynące z możliwości zastosowania sieci neuronowych w dalszej części rozdziału zaproponowane zostały autorskie propozycje rozwiązania tego problemu.

### **3.5 OCENA EFEKTYWNOŚCI WYBRANYCH METOD SELEKCJI ŁĄCZA**

Wskazane wady wielokryterialnych metod wyboru łącza oraz potencjalne korzyści wynikające z zastosowania nowych możliwości, w postaci metod opartych na sieciach neuronowych, wyznaczyły kierunek oceny efektywności wybranych metod oceny łącza. Pierwszą, z analizowanych w dalszej części rozdziału metod jest wybór łącza na podstawie aktywnego testu TCP, który pozwala na ocenę jakości łącza. W porównaniu z rozwiązaniami wielokryterialnymi to rozwiązanie również uwzględnia szereg parametrów (np. opóźnienie w łączy, straty), ale nie jest wrażliwe na wagi określające relację pomiędzy nimi. Istotną wadą tego rozwiązania jest konieczność przeprowadzania testowych połączeń TCP, które jednak zajmują znaczne zasoby w analizowanych sieciach dostępowych. Skrajnie odmiennym podejściem jest wykorzystanie prostych testów opóźnienia czy strat występujących na łączy – w tym przypadku narzut każdej z tych metod jest zdecydowanie mniejszy niż dla testów TCP. Przedstawiona w dalszej części pracy analiza pokazuje jednak, że efektywność takich metod selekcji łącza jest niezadowolająca. Zaproponowane przez autora rozprawy rozwiązanie bazujące na sieciach neuronowych pozwala, przy narzucie porównywalnym z tym występującym przy testach opóźnienia i strat pakietów, uzyskiwać efektywność porównywalną z metodą wykorzystującą testy TCP. W celu przeprowadzenia analizy korzyści wynikających z zastosowania zaproponowanych metod wyboru łącza, opisanych w dalszej części rozdziału przeprowadzono szereg badań symulacyjnych w środowisku będącym odzwierciedleniem środowiska morskiego. Szczegóły tego środowiska oraz analiza efektywności poszczególnych metod zostały zaprezentowane w kolejnych punktach pracy. Zaproponowane metody, środowisko symulacyjne, sposób oceny efektywności oraz wyniki przedstawione w tym rozdziale zostały opublikowane w artykule [29].

### 3.5.1 Środowisko symulacyjne

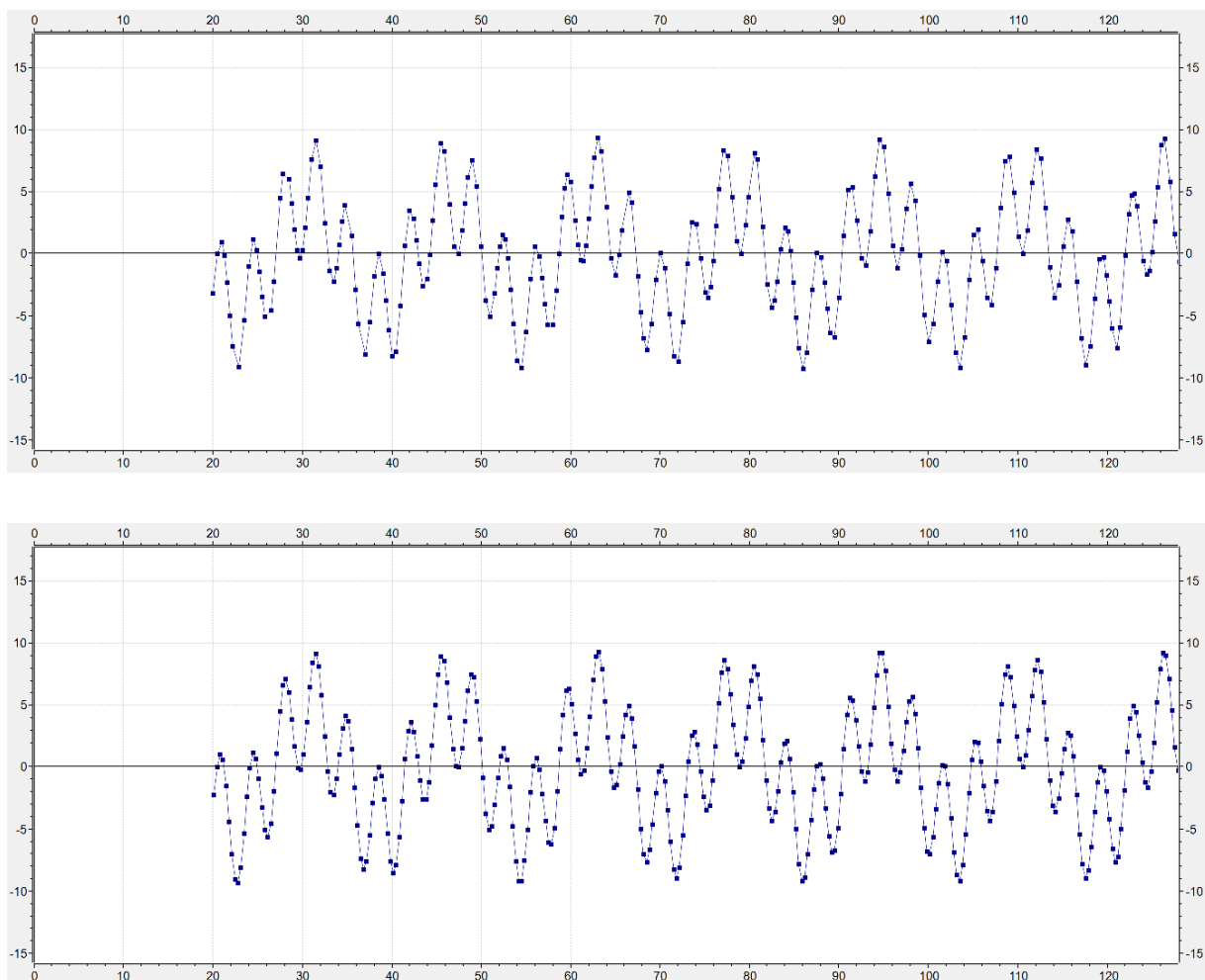
Na potrzeby przeprowadzenia analizy wybranych metod referencyjnych oraz zaproponowanych w rozprawie rozwiązań autorskich, przygotowano zostało środowisko symulacyjne bazujące na symulatorze zdarzeń dyskretnych OMNeT++ [156] wraz z powszechnie wykorzystywanym rozszerzeniem inet 4.2 [157]. OMNeT++ jest symulatorem, który pozwala na modelowanie skomplikowanych środowisk poprzez komponowanie składowych podmodeli, łącząc je w bardziej złożone obiekty i pozwalając w sposób modularny budować analizowane środowisko.

Mając na uwadze złożoność analizowanych zjawisk, uwzględniających zarówno zjawiska fizyczne dotyczące propagacji fal elektromagnetycznych nad powierzchnią morza, jak i złożoność mechanizmów sieciowych implementowanych w różnych warstwach stosu sieciowego, zdecydowano, że forma symulatora wykorzystująca symulator zdarzeń dyskretnych jest odpowiednia. Bazując na dojrzałym i szeroko wykorzystywanym środowisku inet wprowadzono modyfikacje pozwalające na uwzględnienie ruchów jednostek pływających (szerzej opisanych w Rozdziale 2.) oraz modele propagacyjne odwzorowujące modelowane środowisko pracy rozpatrywanych mechanizmów.

Ze względu na zaawansowany charakter, wysoką popularność i idącą za tym powszechność wykorzystania, w opisywanym środowisku symulacyjnym użyto modelu sieci IEEE 802.11ac dostępnego w bibliotece inet. Wszystkie parametry wykorzystywane jako dane wejściowe do analizowanych metod pochodziły z aplikacji zaimplementowanych w środowisku symulacyjnym – nie były więc zależne od samej techniki transmisji. Podobne rozwiązanie, wykorzystujące model jednej techniki transmisji do analizy środowiska heterogenicznego, wykorzystano np. w [158]. Modele innych systemów bezprzewodowych dostępne w środowisku inet mają istotne ograniczenia w postaci np. braku implementacji warstwy fizycznej – model sieci IEEE 802.16 [159], implementacji jedynie transmisji typu *Constant Bit Rate* i braku implementacji płaszczyzny sterowania – model sieci LTE [160], czy niedostosowania techniki do systemów komunikacji na morzu – model sieci IEEE 802.15.4 [161].

W celu uniknięcia powiązania z mechanizmami zapewniania QoS dedykowanymi dla sieci Wi-Fi, które mogłyby występować przy ich wykorzystaniu i jednoczesnej

transmisji danych wejściowych oraz danych użytkownika, każdy ze scenariuszy realizowany był dwukrotnie w różnych wariantach – raz na potrzeby zgromadzenia danych wejściowych i po raz drugi jako ocena rzeczywistej wartości przepływności testowego połączenia TCP. Warianty te uruchamiane były z tą samą wartością *random seed*. W wyniku analizy przeprowadzanej w takim rozwiązaniu otrzymano dwa niezależne zbiory danych z poziomu analizowanych aplikacji, przy zachowaniu tych samych parametrów środowiska, czego ilustracją jest zestawienie wykresów prezentujących wartość wychylenia *pitch* dla dwóch wariantów tego samego scenariusza.



Rys. 3.6 Porównanie wartości *pitch* dla dwóch przebiegów z tą samą wartością *random seed*

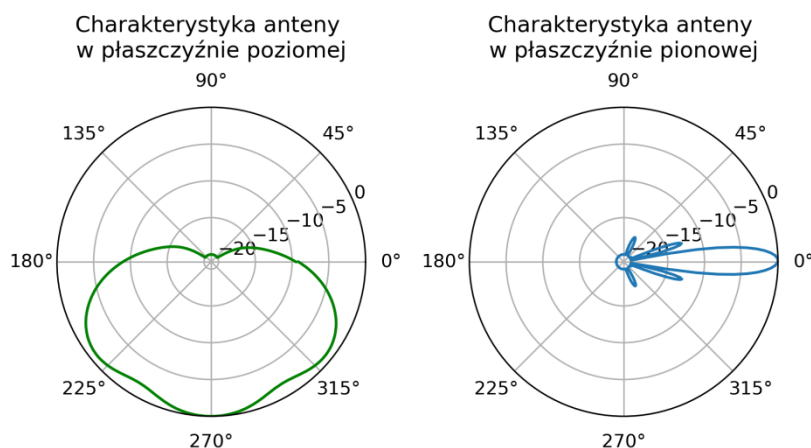
W rozpatrywanym środowisku analizie podlegała komunikacja pomiędzy stacją brzegową a jednostką pływającą przemieszczającą się ze średnią prędkością losowaną z przedziału 3-10 m/s w kierunku do lub od stacji brzegowej – parametry symulacji dla każdego scenariusza losowane były zgodnie z rozkładem równomiernym. Modelowanie

ruchu jednostek pływających wynikające z falowania zrealizowano zgodnie z modelem opisanym w Rozdziale 2. W rzeczywistym środowisku wartości przyjmowanych parametrów będą ściśle powiązane z panującymi warunkami atmosferycznymi, analizowanym akwenem czy konstrukcją konkretnej jednostki pływającej. Starając się przeprowadzić możliwie szeroką analizę, w trakcie prac przyjęto, że wartości parametrów będą wybierane losowo z rozkładem równomiernym. Szczegóły dotyczące istotnych parametrów środowiska symulacyjnego zostały przedstawione w Tabeli 3.2.

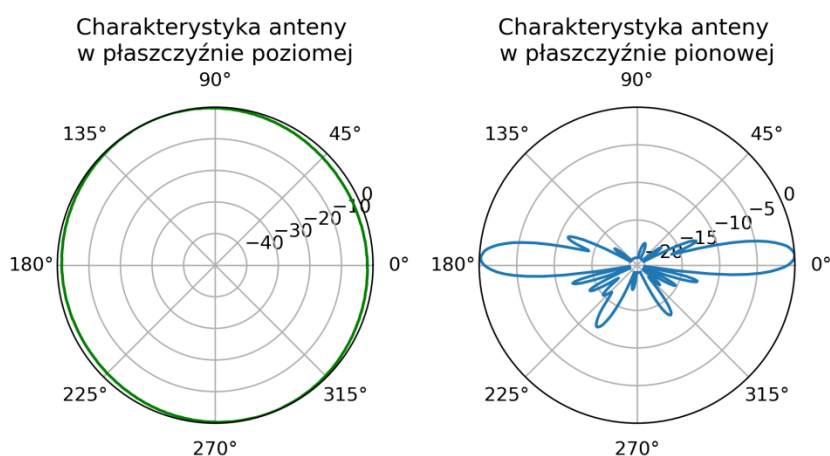
**Tabela 3.2 Wybrane parametry środowiska symulacyjnego**

Parametr	Wartość	Rozkład wartości losowych
odległość początkowa jednostki pływającej od stacji brzegowej	999-20000m	Równomierny
okres fali $t_w$	3-15 s	Równomierny
$\theta_{max}$	2°-10°	Równomierny
wartości fazy początkowej $\varphi_{\theta_1}$ i $\varphi_{\theta_2}$	0° -180°	Równomierny
$\zeta_{\theta}$ współczynnik szybkości zmiany wartości kąta <i>pitch</i>	$\zeta_{\theta}$ współczynnik szybkości zmiany wartości kąta <i>pitch</i>	Równomierny
$h_r$	10 m	
$h_t$	7 m	
$h_e$	30 m	
Częstotliwość	5.8 GHz	
Moc nadajnika	30 dBm	
Szerokość kanału	20 MHz	
Zysk anteny stacji brzegowej	19 dBi	
Zyska anteny jednostki pływającej	10 dBi	
HW retry	7	
Model zaników w kanale	Zgodnie z rozkładem Rayleigh'a	

Jako anteny jednostki pływającej oraz stacji bazowej zamodelowano rzeczywiste anteny pracujące w paśmie 5,8 GHz i wykorzystywane przez autora rozprawy w innych eksperymentach systemów łączności dedykowanych dla komunikacji na morzu. Ich charakterystyki zostały zaprezentowane na Rys. 3.7 oraz Rys. 3.8.



Rys. 3.7 Charakterystyka anteny stacji bazowej



Rys. 3.8 Charakterystyka anteny jednostki pływającej

Każda z symulacji trwała 2020 sekund, z czego 20 pierwszych sekund było czasem nieuwzględnianym w analizie, stanowiąc tak zwany czas rozgrzewki. Korzystając z zaleceń przedstawionych w roboczym dokumencie grupy roboczej IETF (*Internet Engineering Task Force*) [162], założono, że jest to czas dłuższy niż wystarczający na zestawienie połączenia i ustabilizowanie parametrów transmisji połączenia TCP (np. mechanizmów *slow-start*). Każdy z analizowanych scenariuszy powtórzono 300 razy w dwóch wariantach – jednym na potrzeby zbierania danych wejściowych i jednym na potrzeby zebrania pomiarów przepływności testowych połączeń TCP.

Wyniki symulacji zapisane jako ciągi czasowe, w celu zwiększenia liczby dostępnych w procesie uczenia próbek, zostały poddane segmentacji zgodnie z metodą okna przesuwnego (*sliding window method*) [163] pozwalającą na podział całego ciągu czasowego wejściowego na mniejsze fragmenty stanowiące dane wejściowe dla

wszystkich analizowanych na późniejszym etapie algorytmów selekcji łącza. Procedura ta charakteryzowana jest przez trzy parametry czasowe stanowiące odpowiednio:

- $t_s$  – krok czasowy pomiędzy kolejnymi przesunięciami okna segmentacji,
- $t_o$  – długość czasu zbierania danych wejściowych opisujących łącze,
- $t_p$  – długość czasu oceny efektywności analizowanej metody wyboru łącza.

Niezależnie od rozważanej metody wyboru łącza, decyzja podejmowana jest na podstawie obserwacji danych wejściowych przez czas  $t_o$ , ale ocena dotycząca efektywności podjętej decyzji realizowana jest dla obserwacji łącza w czasie  $t_p$ . Jest to podejście, w którym przy możliwie krótkiej obserwacji łącza ( $t_o$ ), podejmowana jest decyzja oceniana w szerszym, niż czas obserwacji, horyzoncie czasowym ( $t_p$ ).

Dane uzyskane w trakcie symulacji i poddane procedurze segmentacji zostały następnie wykorzystane w procesie oceny wybranych metod wyboru łącza, realizowanej *off-line* – poza środowiskiem symulacyjnym. W zależności od liczby interfejsów w scenariuszu z całego zbioru dostępnych danych losowo, z rozkładem równomiernym, przypisywano dane do poszczególnych łączy. Każdy z analizowanych scenariuszy powtórzono  $n_t = 500$  razy, a wartości średnie prezentowanych parametrów wyznaczono z uwzględnieniem 95% przedziału ufności.

### 3.5.2 Miary oceny metody selekcji łącza

Chociaż zagadnienia wyboru łącza czy ocen ich jakości są przedmiotem szeregu badań, nie ma znormalizowanego i powszechnie akceptowanego sposobu oceny i porównania różnych proponowanych rozwiązań. W dostępnej literaturze można jedynie znaleźć zalecenia zawierające pięć głównych aspektów, które powinny być brane pod uwagę: dokładność, możliwość stosowania w praktyce, stabilność, koszt obliczeniowy i narzut [141]. Na podstawie tego zalecenia, w dalszej części tego rozdziału zdefiniowane zostały trzy miary wykorzystane następnie do bezpośredniej oceny niezawodności i efektywności proponowanych metod. Co więcej, zagadnienia dotyczące możliwości stosowania danej metody w praktyce i jej stabilności zostały uwzględnione w ocenie poprzez zastosowanie wielu zestawów danych wygenerowanych przez scenariusze symulacyjne prowadzone z różnymi wartościami *random seed*.

Jako najbardziej intuicyjną miarę ewaluacji analizowanych metod wyboru łącza wykorzystano współczynnik  $\eta_A$  określający precyzję analizowanej metody, wyznaczaną jako stosunek liczby testów, w których wskazano najlepsze łącze do liczby wszystkich testów, co można zapisać jako:

$$\eta_A = \frac{\sum_{n=1}^{n_t} a_n}{n_t} \quad (3.1)$$

gdzie  $n_t$  jest liczbą przeprowadzonych testów, w  $a_n$  wynikiem testu, który przyjmuje wartość 1, jeżeli w danym teście wybrany został interfejs oferujący najwyższą wartość przepływności i 0 w przeciwnym przypadku.

Miara  $\eta_A$  jest bardzo intuicyjna i jednoznacznie pokazuje jak precyzyjna jest analizowana metoda, ale może wprowadzać w błąd w sytuacjach, w których bardzo podobne wyniki przepływności połączeń testowych dostępne są dla więcej niż jednego interfejsu. W związku z tym w analizie wykorzystano również kolejną zaproponowaną miarę –  $\eta_T$ , która interpretowana może być jako średnia wartość stosunku przepływności testowego połączenia TCP wyznaczona w czasie  $t_p$  dla wybranego łącza do maksymalnej możliwej do uzyskania w danym teście przepływności testowego połączenia TCP:

$$\eta_T = \frac{\sum_{n=1}^{n_t} \frac{T_{i_s}(t_p)}{\max_i(T_i(t_p))}}{n_t} \quad (3.2)$$

gdzie  $T_i(t_p)$  jest wartością średnią przepływności testowego połączenia TCP analizowaną w czasie  $t_p$  dla  $i$ -tego łącza. Przy czym  $i_s$  oznacza łącze wybrane przez analizowaną metodę, a  $n_t$  jest liczbą testów przeprowadzonych dla danego scenariusza.

Dodatkowo, aby uwzględnić narzut potrzebny do przeprowadzenia oceny z wykorzystaniem poszczególnych metryk, zaproponowano miarę określającą efektywność bitową zdefiniowaną w następujący sposób:

$$\eta_B = \frac{\eta_T}{\sum_{n=1}^{n_t} D_i(t_o)} \quad (3.3)$$



gdzie  $D_i$  określa liczbę bitów przesłanych przez  $i$ -te łącze w trakcie procedury oceny łącza. Należy podkreślić, że miara  $\eta_T$ , zgodnie z jej definicją (3.2), dotyczy efektywności obserwowanej w dłuższym czasie ( $t_p$ ), niż czas przeprowadzenia samej oceny ( $t_o$ ). Dodatkowo w związku z możliwymi dużymi różnicami w ilości danych potrzebnych do realizacji oceny jakości łącza dla różnych metod, miara może stanowić kryterium pomocnicze przy ocenie metod o porównywalnych wartościach  $\eta_T$ .

W dalszej części oceny metod selekcji łącza symbole powiązane z poszczególnymi metrykami w indeksie górnym zawierają wskazanie metody, co do której odnoszą się dane wyniki.

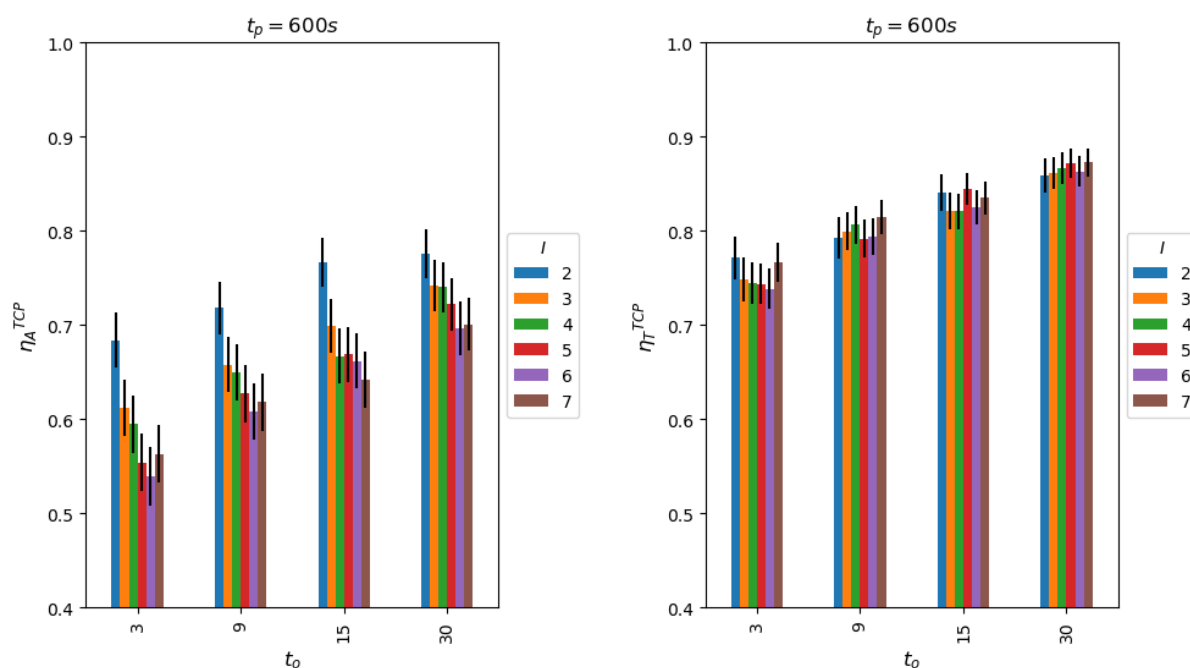
### **3.5.3 Wybór na łącza na podstawie parametrów warstwy transportowej**

W heterogenicznych sieciach bezprzewodowych, co zostało szerzej opisane na początku niniejszego rozdziału, dostęp do wartości parametrów opisujących łącza w sposób pozwalający na ich bezpośrednie porównanie jest utrudniony. Rozwiązaniem tego problemu mogą być aktywne testy realizowane przez dedykowane aplikacje i pozwalające na zgromadzenie parametrów opisujących łącza na poziomie warstwy transportowej. W dalszej części punktu omówione i przeanalizowane pod kątem efektywności ich zastosowania jako metryki wyboru łącza, zostały trzy parametry: przepływność testowego połączenia TCP, współczynnik strat pakietów oraz opóźnienie RTT.

Ruch TCP był w ostatnich kilkunastu latach ruchem dominującym w Internecie, gromadząc około 80-90% całego ruchu [164]. Najnowsze badania pokazują, że TCP jest nadal najczęściej wykorzystywanym protokołem warstwy transportowej — wartość od 60% do 80% ruchu obserwowanego w poszczególnych punktach IPX (*Internetwork Packet Exchange*) [165] wymieniana jest przy jego wykorzystaniu. Mając na uwadze stosunkowo ewolucyjne podejście do rozwijania usług dedykowanych komunikacji na morzu, można spodziewać się, że docelowi użytkownicy opisywanego i analizowanego przez nas systemu, w tym sieci wewnętrzne jednostek pływających, będą korzystały z połączeniowych rozwiązań warstwy transportowej. Z tego powodu, jako referencyjną metodę wyboru łącza wybrano rozwiązanie, w którym decyzja podejmowana była bezpośrednio na postawie wartości przepływności zestawionego wcześniej połączenia

TCP, pomierzonej w czasie obserwacji  $t_o$ . Z dostępnych w symulatorze OMNeT++ wariantów wybrano implementację algorytmu NewReno [166].

Wykorzystanie przepływności połączenia, które zostało wcześniej zestawione, daje pośrednio możliwość uwzględnienia warunków panujących w łączy, wpływających na obserwowane opóźnienia, zmienność opóźnienia i straty pakietów. Analizowanie nowo zestawianych połączeń TCP pozwalałoby na lepszą ocenę spodziewanych w niedalekiej przyszłości warunków, ale nie pozwalałoby na uwzględnienie stabilności łączy obserwowanej przed wykonaniem pomiaru, co jest jednym z istotnych parametrów charakterystycznych dla warunków komunikacji morskiej [29]. Wykorzystanie fragmentów szacowanej przepływności zestawionego wcześniej połączenia TCP w opisanym środowisku pozwala na wybór interfejsu, przez który powinna być realizowana transmisja nawet dla niewielkich wartości  $t_o$ . Analiza wpływu tego parametru na efektywną przepływność uzyskiwaną przy wykorzystaniu tej metody wyboru łączy oraz trafność podjętej decyzji zostały zaprezentowane na Rys. 3.9.



Rys. 3.9 Wartości parametru  $\eta_A$  i  $\eta_T$  dla różnej liczby dostępnych interfejsów  $I$  - wybór łączy na podstawie aktywnego testu TCP

Precyzja wyboru łączy na podstawie aktywnego testu TCP maleje z liczbą dostępnych w systemie interfejsów. Różnica pomiędzy scenariuszem, w którym węzeł

dysponuje dwoma interfejsami oraz takimi, w których do dyspozycji jest ich więcej, może być znacząca zwłaszcza dla krótkiego czasu obserwacji łącza  $t_o$ . Mniejsza różnica wyników występująca dla zwiększającej się liczby dostępnych w węźle interfejsów widoczna jest dla metryki  $\eta_T$ . Potwierdza to zasadność wykorzystania tej metody. Co więcej, w tym przypadku widoczna jest większa efektywność analizowanej metody wraz z wydłużającym się czasem  $t_o$ , mniejsza zmienność analizowanych wyników wskazywana przez zmniejszający się zakres przedziału ufności dla większych wartości  $t_o$ .

Zaobserwować można, że metoda aktywnych testów TCP pozwala na uzyskiwanie relatywnie dobrych wyników. Chociaż optymalne łącze wybierane było jedynie w około 55%-77% przypadków (w zależności od wartości parametrów:  $I$ ,  $t_o$ ), to nieoptymalne decyzje nadal pozwalały na uzyskiwanie przepływności testowego połączenia TCP na poziomie 0,75 – 0,85.

Wadą analizowanej metody jest konieczność nawiązywania połączeń TCP na tyle długich, że pozwalają one na odwzorowanie stanu łącza. W symulacji wykorzystywano przepływność uzyskaną dla połączenia TCP nawiązanego na początku symulacji. W praktyce takie rozwiązanie może być trudne do implementacji, gdyż wymaga ciągłego monitorowania łącza i wynikającego z tego dużego narzutu ruchu kontrolnego w postaci testowych połączeń TCP. Dodatkowo każde takie połączenie testowe związane jest z wygenerowaniem dużej ilości ruchu, co obciąża dostępne sieci oraz może znacząco zmniejszać dostępne zasoby energetyczne węzła. Ten ostatni czynnik będzie szczególnie istotny dla węzłów zasilanych bateryjnie, co może być istotne dla niewielkich jednostek pływających, małych łodzi autonomicznych czy boi i pław pomiarowych.

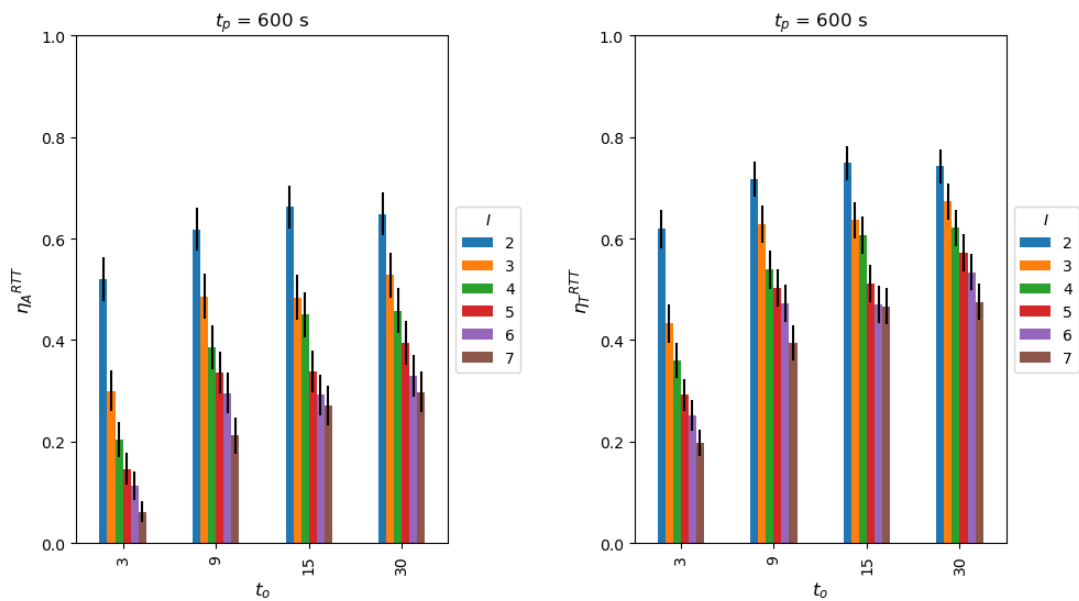
Badając modele analityczne pozwalające na szacowanie przepływności połączenia TCP dla dostępnych parametrów sieci, potencjalnie mogące być alternatywą dla testów TCP, można zauważyć, że wykorzystują one współczynniki obrazujące stan sieci, tj.: opóźnienie, zmienność opóźnienia, współczynnik strat pakietów. Poszukując metody wyboru łącza, która będzie możliwa do praktycznej implementacji, a jednocześnie będzie pozwalała na obrazowanie stanu łącza w dłuższej perspektywie, podjęto próby analizy efektywności wyboru łącza w zależności od średniego wyniku współczynnika strat pakietów oraz średniego opóźnienia [167]. Chociaż metryki te mogą wydawać się stosunkowo proste, są one powszechnie uznawane za jedne z bardziej istotnych współczynników określających efektywności komunikacji [168] [169] [170].

W celu zebrania informacji pozwalających na oszacowanie opóźnień i strat występujących na łączu, przeprowadzono aktywne transmisje pomiędzy węzłem mobilnym a elementem systemu obsługi mobilności ulokowanym na brzegu sieci. W praktyce, w przypadku sieci heterogenicznych, implementowanych zgodnie ze schematem realizacji przełączania opisanym w podrozdziale 3.6 niniejszej pracy, element ten może być kolokowany z bramą dostępową wspomagającą obsługę mobilności węzłów.

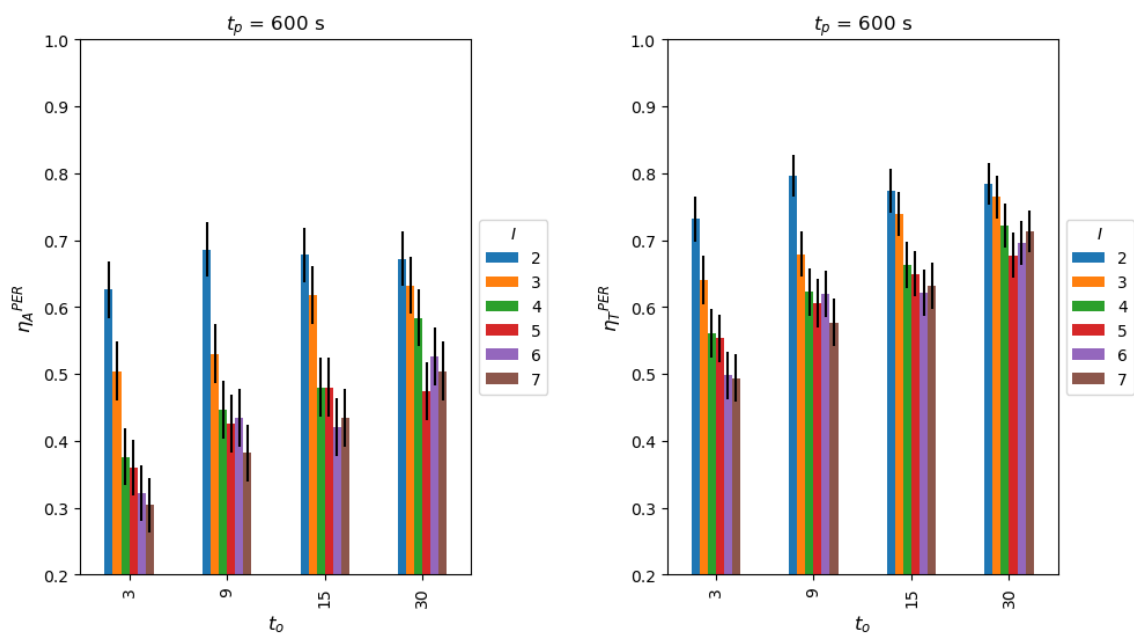
Na potrzeby zbierania danych pomiarowych, w środowisku symulacyjnym, zostały zaimplementowane moduły aplikacyjne odpowiedzialne za transmisję i gromadzenie danych. Wartość opóźnienia wyznaczono z wykorzystywaniem długich pakietów (pole danych o rozmiarze 1000B) wysyłanych co jedną sekundę. Na tak wysłany pakiet, brama dostępową odpowiada podobną wiadomością, co pozwalało na wyznaczenie czasu RTT (*Round Trip Time*). Z kolei oszacowanie współczynnika strat pakietów możliwe było poprzez wykorzystanie krótszych wiadomości (pole danych o rozmiarze 100B), nazwanych HB (*Heartbeat*) rozsyłanych co 0,2 sekundy. Pakiety te zawierały numer sekwencyjny, który pozwalał na określenie liczby utraconych pakietów oraz rozkładu strat dla testowej transmisji.

Na Rys. 3.10 zaprezentowano wyniki analizy efektywności wyboru łącza dla metody korzystającej z średniego opóźnienia RTT jako wskaźnika wyboru łącza. Analizując zaprezentowane dane, można zauważyć niską efektywność tej metody, zwłaszcza przy małej wartości  $t_o = 3s$ . Wynika to zapewne z niewielkiej liczby transmitowanych pakietów RTT w analizowanym oknie obserwacji. Dla większych wartości  $t_o$  efektywność metody wzrasta do pewnego poziomu, osiągając granicę ok.  $\eta_A = 0,65$ .

Na Rys. 3.11 zaprezentowano wyniki podobnej analizy przeprowadzonej dla wyboru łącza na podstawie współczynnika strat pakietów (PER). W tym przypadku efektywność analizowanej metody jest nieznacznie wyższa niż dla poprzednio opisywanego wariantu z wyborem łącza jedynie na podstawie wartości opóźnienia. Jest to szczególnie widoczne przy analizie współczynnika  $\eta_A$  dla niewielkich wartości  $t_o$ . Warto podkreślić, że jest również możliwość zaobserwowania mniejszego zróżnicowania wyników dla różnej liczby dostępnych interfejsów.



Rys. 3.10 Analiza efektywności wyboru łącza na podstawie RTT – miary  $\eta_A$  i  $\eta_T$  dla różnej liczby interfejsów



Rys. 3.11 Analiza efektywności wyboru łącza na podstawie PER – miary  $\eta_A$  i  $\eta_T$  dla różnej liczby interfejsów

Analizując otrzymane wyniki widoczna jest mniejsza efektywność metod bazujących jedynie na wartościach średnich opóźnienia RTT i współczynnika PER. Zjawisko to jest widoczne zarówno dla miary  $\eta_A$  jak i  $\eta_T$ . Podobnie jak w przypadku uwzględniania przepływności testowych połączeń TCP, wraz ze wzrostem długości  $t_o$  możliwe było uzyskanie rezultatów bliższych wartości maksymalnej. Zwłaszcza w przypadku analizy średniej wartości opóźnienia widoczna jest znaczna zależność efektywności tej metody od liczby wykorzystywanych interfejsów. Szczegóły pokazujące

średnie wartości miary  $\eta_B$  opisanych w tym punkcie metod, zostały zaprezentowane w Tabeli 3.3. Otrzymane rezultaty określające metody wyboru łącza na podstawie opóźnienia i strat pakietów powalają na zmniejszenie ruchu potrzebnego do wyboru łącza. Widać, że efektywność bitowa jest o 2-3 rzędy wielkości większa niż dla metody TCP, co wynika z mniejszej ilości danych potrzebnych do realizacji oceny łącza. Chociaż narzut wprowadzany przez te metody jest mniejszy niż dla metody TCP, to zapewniają one jednak na tyle gorszą efektywność samego wyboru, że są nieakceptowalne w zastosowaniu praktycznym, co skłania do poszukiwania nowych rozwiązań.

Tabela 3.3 Efektywność bitowa analizowanych metod

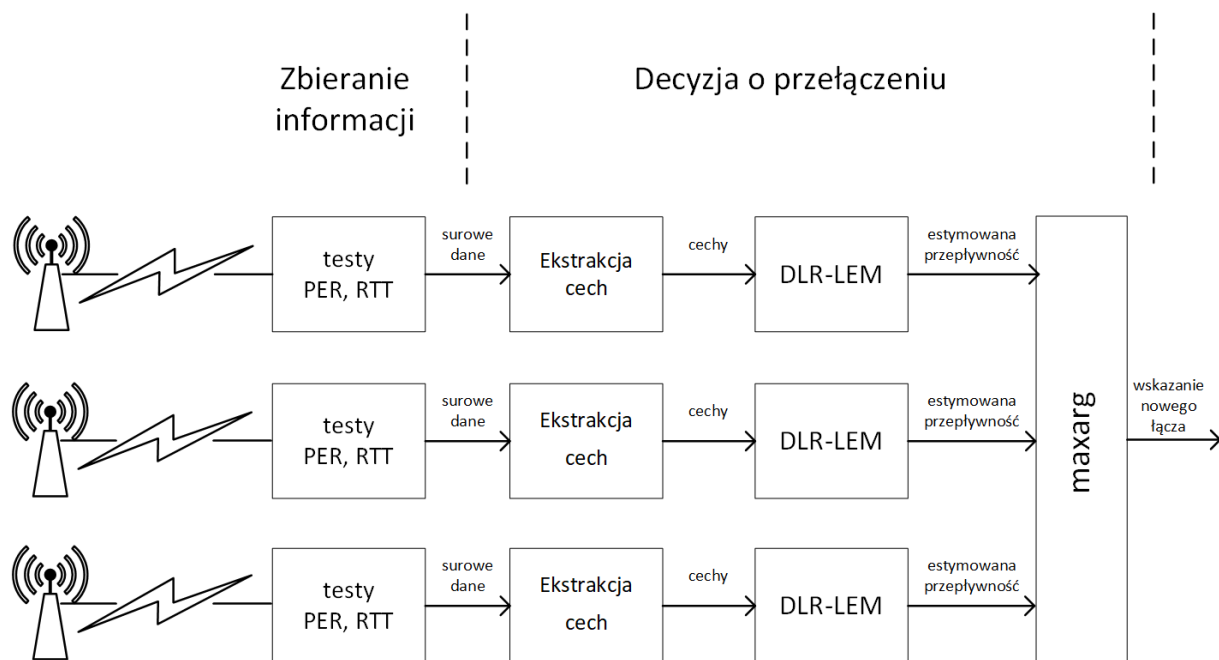
Metoda	Liczba interfejsów					
	2	3	4	5	6	7
TCP	9.26E-9	6.33E-9	4.41E-9	3.79E-9	3.02E-9	2.65E-9
RTT	7.84E-7	4.70E-7	3.16E-7	2.46E-7	1.82E-7	1.57E-7
PER	3.35E-6	2.11E-6	1.52E-6	1.15E-6	9.75E-7	8.48E-7

### 3.5.4 Wybór łącza wspomagany głębokimi sieciami neuronowymi

W punkcie 3.4 rozdziału przedstawione zostały podstawowe informacje dotyczące budowy, wykorzystania i zalet sieci neuronowych implementowanych na potrzeby mechanizmów wyboru łącza. Uwzględniając niezadowolające wyniki ocenianych w poprzednich punktach metod, w punkcie tym zaproponowano metody zapewniające estymację przepływności połączenia TCP o jakości zbliżonej do tej, którą zapewniają aktywne pomiary TCP, ale przy znacznie mniejszym narzucie (porównywalnym z testami PER lub RTT). Takie podejście pozwoli zachować zalety podejmowania decyzji o wyborze łącza na podstawie przepływności połączenia TCP, przy jednoczesnej minimalizacji zużycia zasobów związanych z niezbędnymi pomiarami.

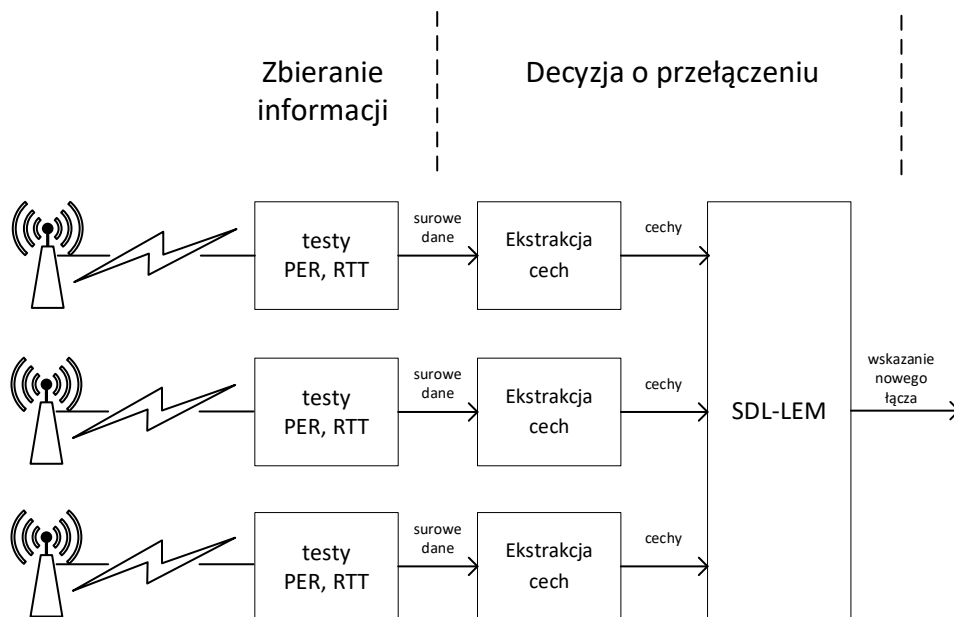
Proponowane metody stanowią odmienne względem siebie spojrzenia na problem wyboru łącza, jednak w każdej z nich uwzględniane jest powiązanie oceny jakości łącza z oszacowaną przepływnością wcześniej zestawionego połączenia TCP. Pierwsze podejście zakłada wykorzystanie sieci neuronowej do oszacowania przepływności testowego połączenia TCP na podstawie zgromadzonych w trakcie trwania okna obserwacji danych. W wariantcie tym sieć neuronowa implementowana jest do rozwiązania standardowego problemu regresji, w którym szacowanie przepływności realizowane jest niezależnie dla

każdego z dostępnych interfejsów. Schemat działania tej metody został zaprezentowany na Rys. 3.12. W kolejnych akapitach rozwiązanie to oznaczane jest jako *Deep Learning Regression Link Evaluation Method (DLR-LEM)*.



Rys. 3.12 Schemat wyboru łącza z wykorzystaniem metody DLR-LEM

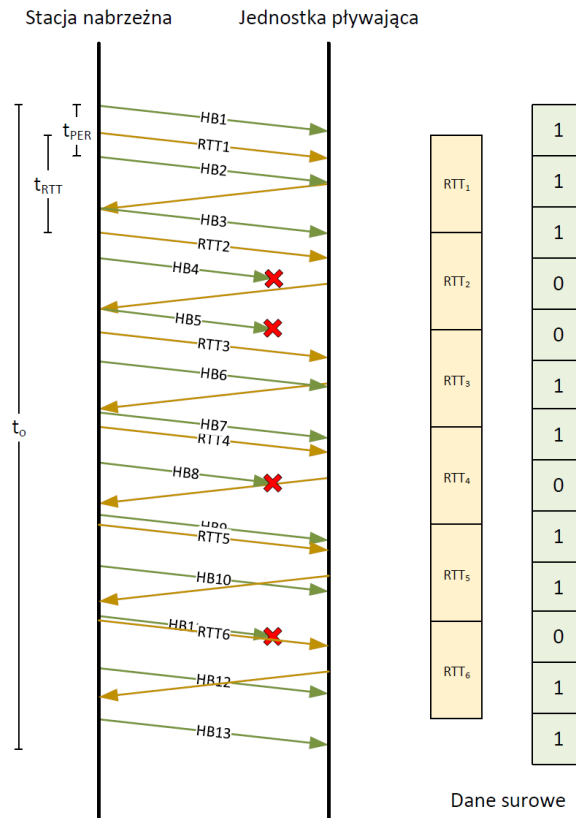
W drugim podejściu wykorzystana została struktura podobna do tej stosowanej przy rozwiązywaniu problemów klasyfikacji (Rys. 3.13). W rozwiązaniu tym wszystkie interfejsy porównywane są równocześnie poprzez strukturę ze współdzielonymi wagami (*shared layer*), co pozwala na równoległe uczenie tego fragmentu sieci neuronowej dla wszystkich wejść i w efekcie zmniejszenie ilości wymaganych danych treningowych. Wyjście struktury współdzielonej dla każdego z analizowanych interfejsów przekazywane jest do fragmentu odpowiedzialnego za klasyfikację i wskazanie tego interfejsu, który powinien zostać wybrany. W dalszej części pracy rozwiązanie to oznaczane jest jako *Simultaneous Deep Learning Link Evaluation Method (SDL-LEM)*.



Rys. 3.13 Schemat wyboru łącza z wykorzystaniem metody SDL-LEM

W celu uzyskania danych wejściowych proponowanych metod wykorzystano opisane wcześniej metody testowe (PER i RTT), które charakteryzują się niewielką ilością wymaganego przez nie ruchu testowego. Dwa rodzaje wiadomości o różnym rozmiarze pozwalają na ocenę strat na łączu oraz opóźnień — dwóch istotnych czynników wpływających na przepływność połączenia TCP. Na Rys. 3.14 przedstawiono proces zbierania surowych danych na podstawie pomierzonych RTT i strat pakietów zgromadzonych w czasie  $t_o$ . W prezentowanym przykładzie w trakcie trwania obserwacji zrealizowane zostały cztery pomiary RTT dające jednoznaczne wartości opóźnień i są bezpośrednio wykorzystywane do tworzenia wektora cech. Podczas testu PER ze stacji bazowej wysyłana jest grupa wiadomości HB z odstępem  $t_{PER}$  pomiędzy kolejnymi wiadomościami. Każda z wiadomości jest oznaczona unikalnym numerem sekwencyjnym, dzięki czemu odbierający ją węzeł jest w stanie wykryć utratę wiadomości. Wynikiem testu jest wektor danych, w którym każda odebrana wiadomość HB jest reprezentowana jako 1, natomiast wiadomość utracona (w ilustrowanym przykładzie wiadomości HB4, HB5, HB8, HB11 zostały utracone podczas transmisji).

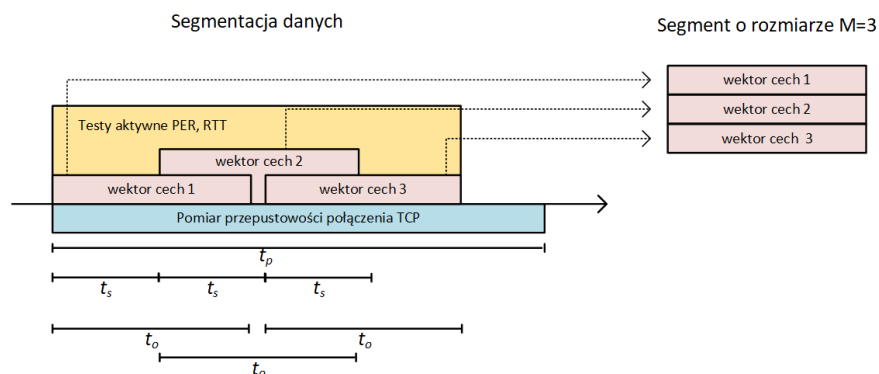




Rys. 3.14 Ilustracja fazy zbierania danych opisujących łącza

W celu wprowadzenia możliwości lepszego reagowania na zmiany jakości łącza zdecydowano się na wprowadzenie procedury segmentacji danych, pozwalającej na zwiększenie liczby parametrów opisujących łącza bezprzewodowe. Zamiast używać danych surowych (zawierających bezpośrednie wyniki testów PER i RTT) jako wejść do sieci neuronowej, dane te są najpierw traktowane jako szeregi czasowe, a następnie dzielone na segmenty czasowe (por. Rys. 3.15). Czas trwania każdego segmentu, równoznaczny z czasem obserwacji występującym w opisie poprzednich metod, oznaczony został jako  $t_o$ , a odstęp pomiędzy początkami kolejnych segmentów oznaczono jako  $t_s$ . W efekcie z danego zbioru surowych danych zebranych podczas aktywnych testów RTT i PER otrzymuje się  $M$  segmentów i dla każdego wyznacza się wektor cech. Im większa wartość tego parametru, tym większy jest horyzont czasowy brany pod uwagę w trakcie podejmowania decyzji. W procedurze ekstrakcji cech wykorzystano dla pomiarów RTT: rozmiar danych wejściowych, sumę elementów, wartość maksymalną, wartość minimalną, wartość średnią, wariancję, współczynnik skośności, kurtoza oraz co dziesiąty percentyl. Z wyników testu PER wyznaczono następujące parametry: rozmiar danych wejściowych,

liczba zer, suma elementów, wartość średnia, wariancja. Do każdego wektora wejściowego wygenerowanego na podstawie danych zgromadzonych w czasie  $t_o$ , przyporządkowano przepływność zestawionego wcześniej połączenia TCP, wykorzystywaną później w procesie uczenia i oceny działania proponowanych metod.

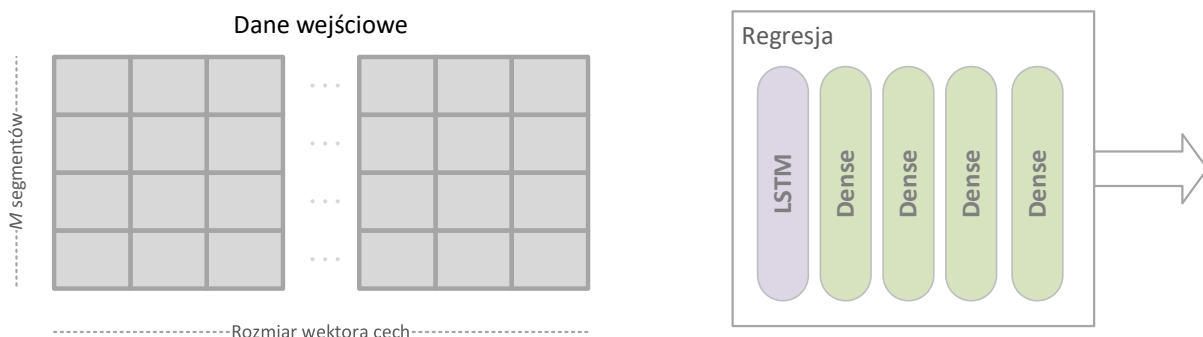


**Rys. 3.15** Przykład procedury segmentacji ilustrujący wpływ parametrów ( $t_o$ ,  $t_s$ ) na uzyskanie trzech segmentów ( $M=3$ )

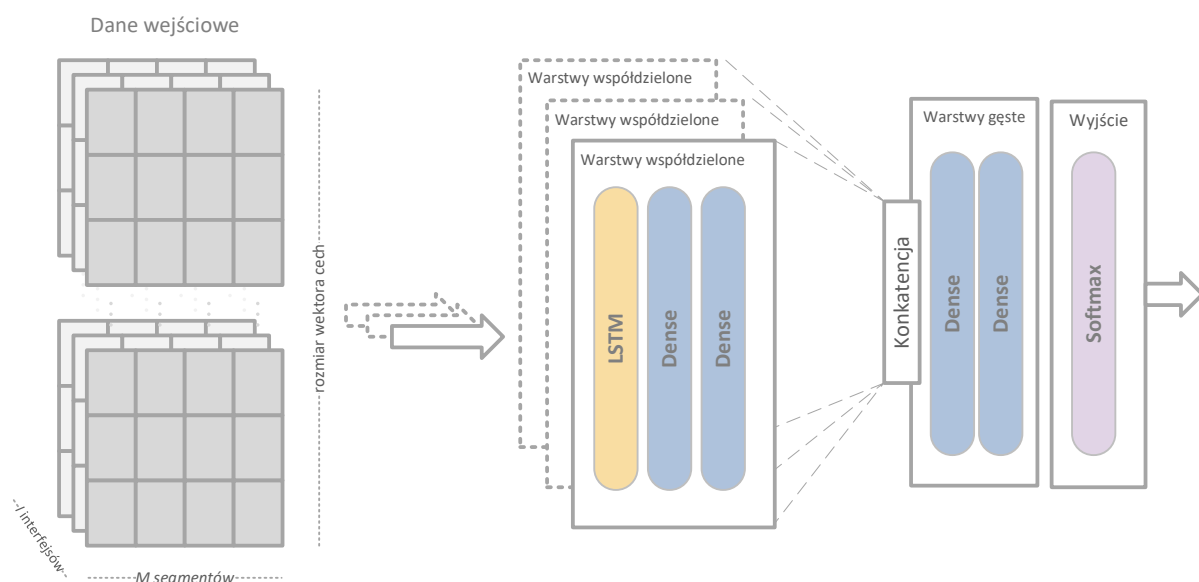
Wybór struktur sieci neuronowych, które zostały zastosowane w proponowanych rozwiązaniach, został dokonany na podstawie studiów literaturowych. Analizując wyniki szeregu badań (m.in. [171] [172] [173] [174]) związanych z wykorzystaniem rozwiązań głębokich sieci neuronowych w sieciach bezprzewodowych, zdecydowano się na zastosowanie struktur zawierających warstwy LSTM. Konkretnie struktury sieci przeznaczone dla proponowanych metod różnią się od siebie, ponieważ każda z nich musi zaadresować inne zadanie: zadanie regresji w przypadku DLR-LEM oraz zadanie klasyfikacji w przypadku SDL-LEM.

Sieć DLR-LEM zawiera warstwę LSTM, po której następuje szereg warstw gęstych. Przyjmuje ona dane opisujące pojedyncze łącze jako dane wejściowe i szacuje przewidywaną przepływność TCP jako dane wyjściowe (Rys. 3.16). W przypadku podejścia SDL-LEM (Rys. 3.17) wejście zawiera informacje opisujące wszystkie łącza dostępne dla węzła mobilnego. Aby procedura uczenia była bardziej efektywna i niewrażliwa na kolejność łączy, dla każdego łącza używana jest osobna instancja tej samej struktury (warstwy współdzielone). Wyjścia instancji tej struktury podlegają konkatencji i stanowią wejścia dla dalszej części modelu. Ponieważ w takiej architekturze informacje wejściowe dotyczące wszystkich łączy mogą być wykorzystane przez wszystkie warstwy

współdzielone, do wytrenowania modelu potrzebna jest mniejsza ilość danych. Po konkatenacji szereg warstw gęstych porównuje wyjścia warstw współdzielonych i wskazuje najlepszy możliwy interfejs za pomocą warstwy *softmax*.



Rys. 3.16 Struktura sieci DLR-LEM



Rys. 3.17 Struktura sieci SDL-LEM

Hiperparametry opisanych struktur zostały wyznaczone w szeregu testów pozwalających na ocenę wpływu różnej liczby warstw w poszczególnych fragmentach sieci, rozmiarze poszczególnych warstw, czy zastosowania algorytmów optymalizacji. Wyniki tego kroku zostały zaprezentowane w Tabeli 3.4.

Tabela 3.4 Hiperparametry i szczegóły procesu uczenia

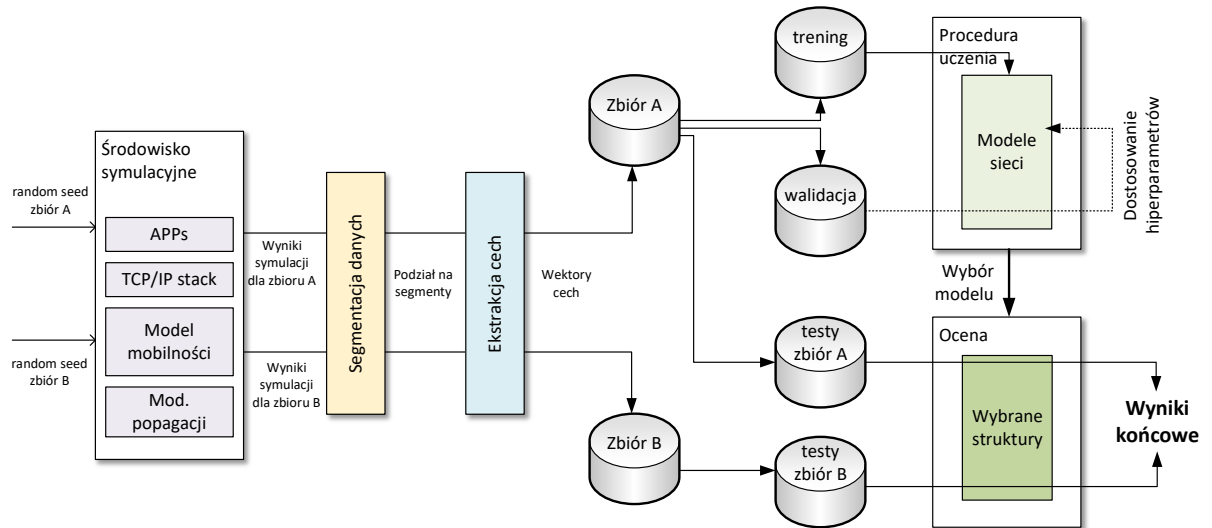
	DLR-LEM	SDL-LEM
Struktura sieci *	$L_{64}2xD_{64}3xD_{16} D_8 D_1$	$[L_{64} D_{64} 5xD_{32}]_I D_{32} D_{32} D_1$
Funkcja aktywacji (z wyjątkiem ostatniej warstwy)	ReLU	ReLU
Funkcja aktywacji (ostatnia warstwa)	softplus	softmax
Funkcja kosztu	błąd średniokwadratowy	entropia krzyżowa
Liczba epok	6000	6000
Rozmiar <i>batch size</i>	512	512
Algorytm optymalizacji	Adam	Adam
Stała uczenia	0,01	0,01

\*) L oznacza warstwę LSTM, D warstwę Dense, indeks dolny odnosi się do rozmiaru warstwy

Proces uczenia sieci neuronowych realizowany był przy założeniu standardowego podziału zbioru danych na część treningową, walidacyjną i testową. Podział ten realizowany był po przeprowadzeniu procedury segmentacji danych opisanej we wcześniejszym punkcie rozdziału oraz procedurze ekstrakcji cech. Przydział każdej z próbek do jednego ze zbiorów (treningowego, walidacyjnego i testowego) realizowany był losowo zgodnie z proporcjami 0,8, 0,1, 0,1. W trakcie procesu uczenia wykorzystywano dodatkowo struktury *dropout*, pozwalające na uniknięcie nadmiernego dopasowania. Na podstawie danych treningowych dokonano normalizacji parametrów w pozostałych zbiorach danych. W trakcie procesu uczenia dokonywano walidacji modelu wykorzystując definiowaną w punkcie 3.5.2 miarę  $\eta_T$ , a jako finalny model i zestaw jego parametrów wybrano ten, który cechował się najwyższą wartością wyznaczoną dla zbioru walidacyjnego.

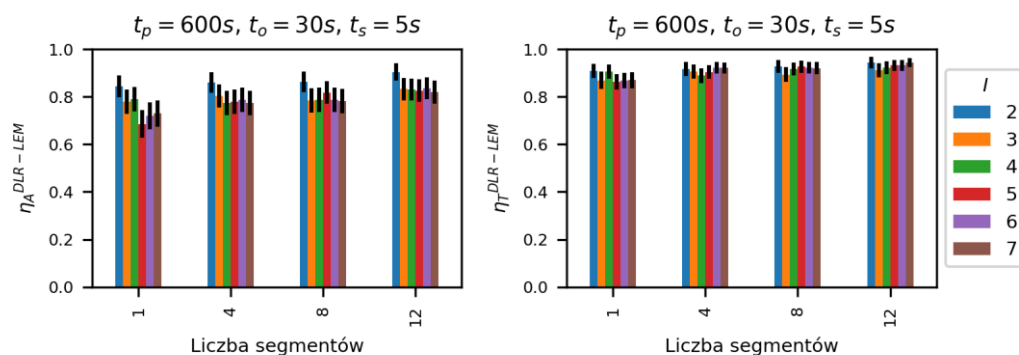
W dalszej kolejności wybrane modele zostały poddane procesowi oceny podobnemu do tego wykorzystywanego w poprzednikach punktach rozdziału, przeprowadzając analizę dla wartości  $t_o=30$  s,  $t_p=600$  s i  $t_s=5$  s oraz rozmiarów segmentu ze zbioru  $M \in \{1, 4, 8, 12\}$ . W opisywanej sytuacji przy założonej wartości  $t_s = 5$  s, która jest mniejsza niż  $t_o$  i  $t_p$  kolejne próbki danych wejściowych, przydzielone do różnych zbiorów mogą określać informacje pochodzące z częściowo nachodzących na siebie obiektów. W celu uniknięcia wpływu tego zjawiska na ocenę proponowanych metod wygenerowano dodatkowy zbiór danych symulacyjnych wykorzystywanych w całości do oceny efektywności metod wyboru łącza. Te dwa zbiory testowe można interpretować w następujący sposób: pierwszy (zbiór testowy A) jako zbiór informacji charakteryzujących

środowisko podobne do tego, które było wykorzystane w procesie uczenia sieci oraz, drugi (zbiór testowy B) jako zbiór charakteryzujący środowisko niepodobne do tego wykorzystywanego w procesie uczenia. Schemat wykorzystania danych symulacyjnych, ich podział na zbiory i wykorzystanie w ocenie proponowanych modeli zostały zaprezentowane na Rys. 3.18.

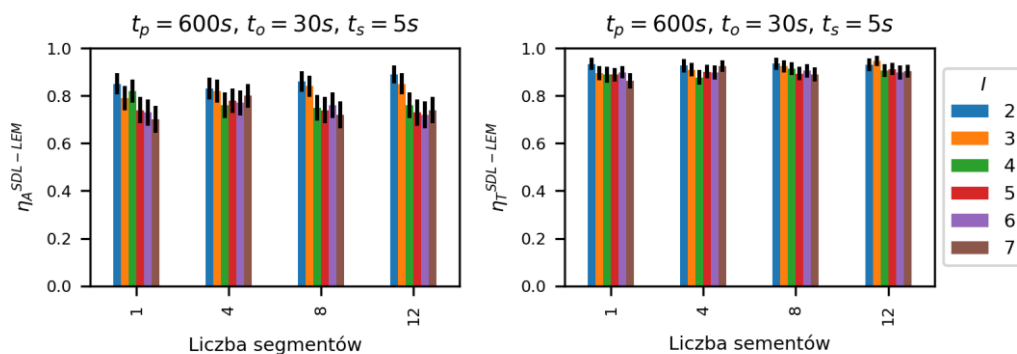


Rys. 3.18 Schemat przetwarzania danych wejściowych

Wyniki zaprezentowane na Rys. 3.19 pokazują, że otrzymane rezultaty dla zbioru testowego A są bardzo dobre, a wartość współczynnik  $\eta_T$  przekraczają 0,9. Widoczne jest również niewielkie zróżnicowanie wyników pomiędzy scenariuszami różniącymi się liczbą dostępnych interfejsów. W analizie tej odrobinę wyższe wartości  $\eta_T$  i  $\eta_A$  otrzymano dla wariantu DLR-LEM. W obu jednak przypadkach wyniki był lepsze niż dla scenariusza przyjętego jako referencyjny z wykorzystaniem aktywnych testów z połączeniami TCP, jako wskaźnik wyboru łącza.

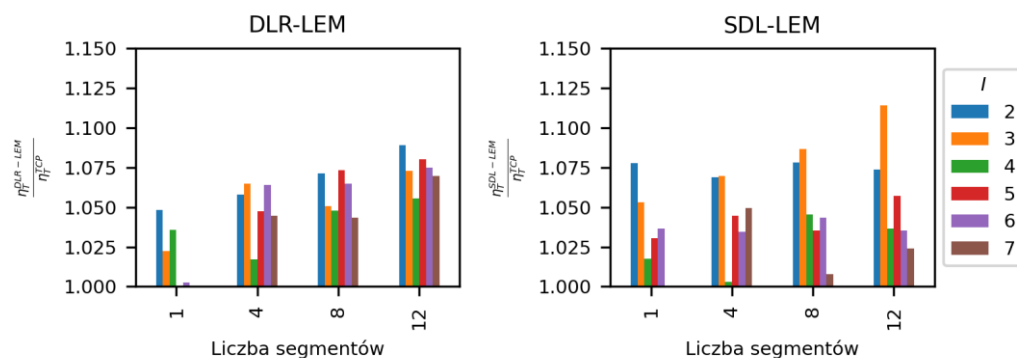


Rys. 3.19 Ocena efektywności wyboru łącza realizowanego zgodnie z metodą DLR-LEM



Rys. 3.20 Ocena efektywności wyboru łącza realizowanego zgodnie z metodą SDL-LEM

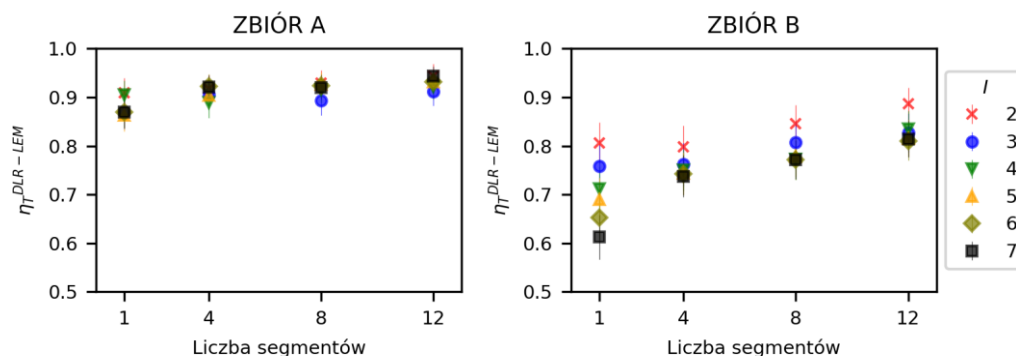
Bezpośrednie porównanie proponowanych metod oraz metody z referencyjnym wykorzystaniem połączeń TCP zostały zaprezentowane na Rys. 3.21, na którym pokazano stosunek przepływności uzyskanej w łączu wybranym przy pomocy jednej z proponowanych metod wspomaganych sieciami neuronowymi z przepływnością uzyskaną dla łącza wybranego na podstawie testowego połączenia TCP.



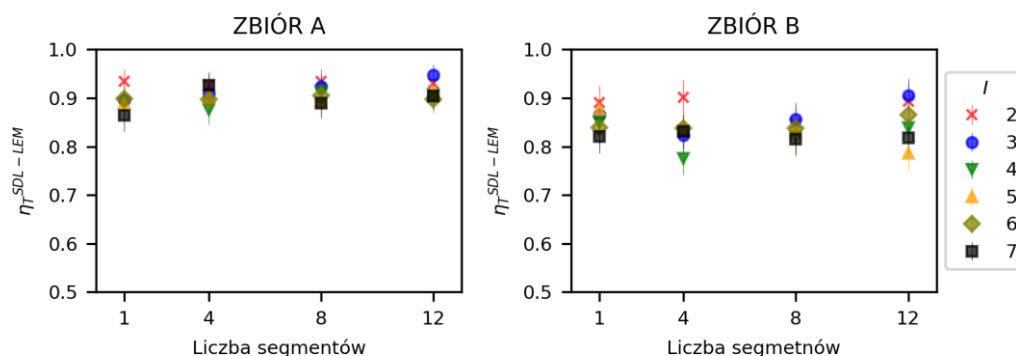
Rys. 3.21 Porównanie efektywności proponowanych metod z wyborem łącza na podstawie aktywnego testu TCP

Zestawienie wyników otrzymanych dla opisanych wcześniej zbiorów danych testowych zostało zaprezentowane na Rys. 3.22 i Rys. 3.23. Widoczne jest spodziewane pogorszenie efektywności proponowanych metod. Spadek ten jest szczególnie istotny dla metody DLR-LEM, dla której współczynniki  $\eta_T$  i  $\eta_A$  prezentują wartości niższe niż dla metody wyboru łącza przy pomocy testu TCP. Może to sugerować, że opis łącza w postaci jednego segmentu danych wejściowych jest niewystarczający do uogólnienia relacji pomiędzy charakterystyką opóźnień i strat pakietów w odniesieniu do przepływności testowego połączenia TCP. Dla większych wartości  $M$ , dla których zakres danych

wejściowych jest szerszy, sytuacja poprawia się. Opisany efekt jest mniej widoczny dla metody SDL-LEM, dla której utrzymano wartości  $\eta_T$  i  $\eta_A$  powyżej tych uzyskanych dla wyboru łącza z wykorzystaniem testowego połączenia TCP.

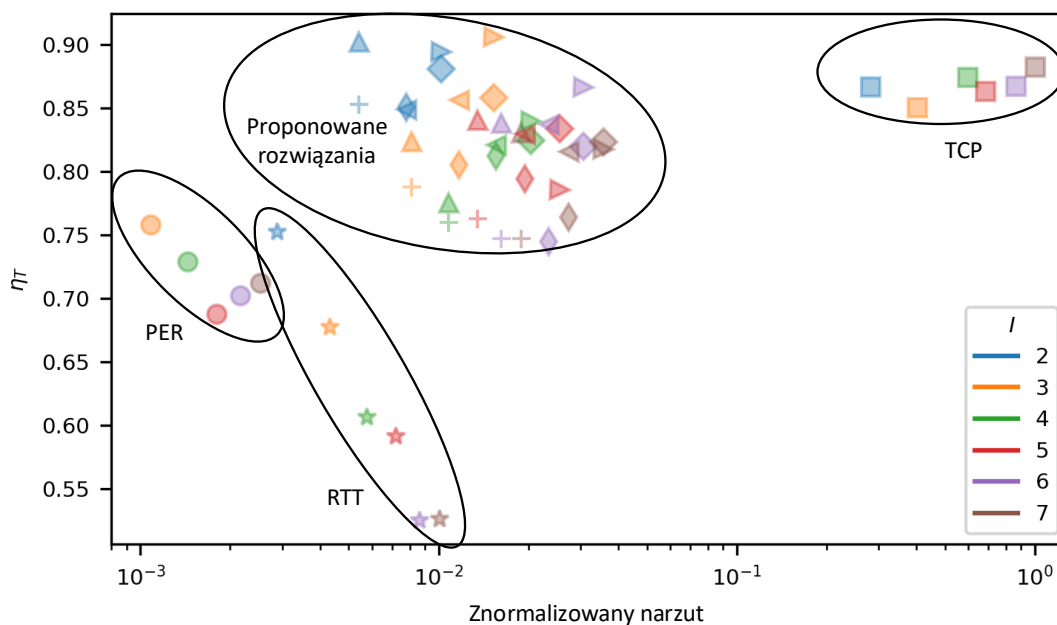


Rys. 3.22 Porównanie efektywności proponowanych metod dla różnych zbiorów testowych – metoda DLR-LEM



Rys. 3.23 Porównanie efektywności proponowanych metod dla różnych zbiorów testowych – metoda SDL-LEM

W celu pełnego zobrazowania korzyści płynących z zastosowania proponowanych metod, a wynikających z możliwości zmniejszenia narzutu danych pomiarowych danej metody, przygotowano wykres przedstawiający zależność  $\eta_T$  od znormalizowanej ilości danych potrzebnych do przeprowadzenia oceny łącza dla różnej liczby segmentów  $M \in \{4, 8, 12\}$  i liczby interfejsów (Rys. 3.24).



Rys. 3.24 Porównanie efektywności i narzutu wprowadzonego przez analizowane metody dla zbioru testowego B (\* - RTT; • - PER, ■ - aktywny test TCP; + - RDL-LEM M4; ◇ - RDL-LEM M8; ◆ - RDL-LEM M12; ▲ - SDL-LEM M4; ◀ - SDL-LEM M8; ▶ - SDL-LEM M12)

Na rysunku tym można zaobserwować trzy grupy wyników. Pierwsza z nich, obejmująca wyniki metod wyboru łącza na podstawie danych RTT i PER, widoczna jest w lewym dolnym rogu wykresu i oznaczona za pomocą \* dla metody RTT oraz • dla metody PER. Grupa ta charakteryzuje się najmniejszym narzutem, ale oferuje nieakceptowalne wartości  $\eta_T$ . Druga grupa odnosząca się do wyników metody TCP jest widoczna w prawej części wykresu. W tej grupie stosunkowo wysokie wartości  $\eta_T$  oferowane są przy bardzo wysokim narzucie. Trzecia grupa reprezentująca wyniki proponowanej metody uwypukla jej zalety — zróżnicowane, ale wysokie wartości  $\eta_T$  przy stosunkowo niskim narzucie. W proponowanych rozwiązaniach narzut jest kilkanaście razy mniejszy niż w przypadku metody TCP.



### **3.6 EFEKTYWNE METODY PRZEŁĄCZANIA W HETEROGENICZNYM ŚRODOWISKU KOMUNIKACJI MORSKIEJ**

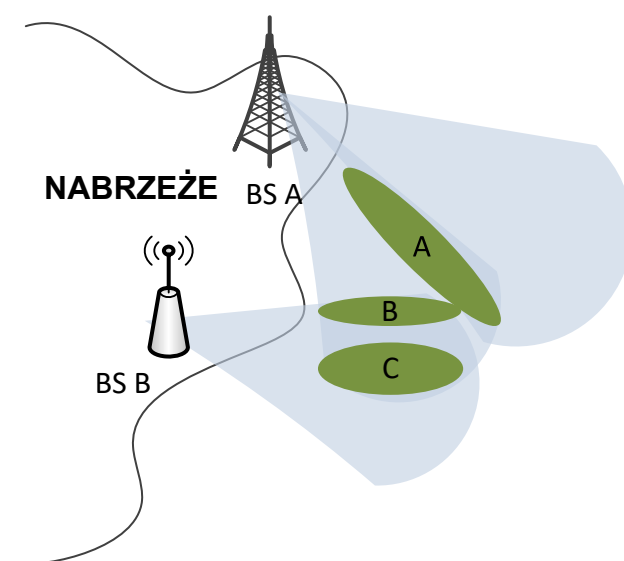
Na początku niniejszego rozdziału przedstawiono prezentowaną w literaturze taksonomię metod przełączania, stosowanych w środowisku heterogenicznych sieci bezprzewodowych, z podziałem na poszczególne etapy pozwalające na dekompozycję problemu wyboru łącza i zmiany punktu przyłączenia do sieci. Klasyfikacja ta pokazuje, że w dużej mierze sam schemat realizacji przełączania, protokoły sygnalizacyjne, czy dodatkowe elementy architektury sieciowej mogą być wykorzystywane niezależnie od przyjętego mechanizmu wyboru łącza, których przykłady i rozwiązania zaproponowane przez autora rozprawy zostały opisane w poprzednim punkcie. W niniejszym podpunkcie uwagę skupiono na rozwiązaniach protokolarnych pozwalających na realizację schematu przełączania. Zaprezentowane zostaną też kolejne propozycje usprawniające tę fazę ze szczególnym uwzględnieniem wymagań komunikacji w środowisku morskim.

Trzy scenariusze uwzględniane w mechanizmach obsługi mobilności dla statków poruszających się wzdłuż wybrzeża zostały przedstawione na Rys. 3.25:

- Przełączenia pomiędzy stacjami bazowymi jednej techniki bezprzewodowej dla sieci homogenicznych (obszar I),
- Przełączenie pomiędzy różnymi technikami transmisji dla sieci heterogenicznych pozwalające na optymalizację wykorzystania zasobów (obszar II),
- Przełączenie wynikające z ograniczonego zasięgu aktualnie wykorzystywanej techniki transmisji (obszar III).

Przełączenie w obrębie punktów dostępowych czy kolejnych sektorów wybranego systemu bezprzewodowego może być przeprowadzone przy pomocy dedykowanych dla tego systemu rozwiązań przewidzianych w jego specyfikacji. Przykładem tego typu rozwiązań są przełączenia z wykorzystaniem mechanizmów usprawniających proces uwierzytelnienia opisany w IEEE 802.11r [175], a stosowanych w sieciach Wi-Fi, czy też przełączenie z wykorzystaniem dedykowanych procedur, np. z wykorzystaniem schematów przewidzianych dla interfejsu X2 systemu LTE [176]. W większości przypadków mechanizmy takie zamykają swoje działania w obrębie wybranych, pojedynczych warstw stosu sieciowego, przy czym nie ingerują w łączność na poziomie wyższych warstw – warstwy sieciowej czy transportowej. Czas potrzebny na realizację

przełączenia w ramach tej grupy najczęściej jest na tyle niewielki, że nie powoduje on istotnego, z punktu widzenia użytkownika końcowego, pogorszenia jakości w transmisji danych. Inaczej jest w przypadku przełączenia realizowanego w sieciach heterogenicznych (zaznaczone obszary II i III na Rys. 3.25), w których to pojawia się konieczność obsługi przełączenia na poziomie warstwy sieciowej, stanowiącej element integrujący i spajający wykorzystywane systemy bezprzewodowej transmisji danych.



Rys. 3.25 Scenariusze obsługi mobilności w komunikacji przybrzeżnej

Jednym z istotnych problemów widocznych w sieciach IP, a bezpośrednio związanych z obsługą użytkowników mobilnych, jest podwójna rola przypisana adresom IP, które jednocześnie stanowią identyfikator konkretnego węzła (ID) oraz jego lokalizator w konkretnej topologii sieci (LOC). Dualne wykorzystanie adresu w tych dwóch rolach skutkuje szeregiem komplikacji widocznych zwłaszcza w sieciach bezprzewodowych, których istotnym elementem są przemieszczające się węzły, mogące w konsekwencji tego zmieniać punkt podłączenia do sieci. W trakcie takiej zmiany, jako skutek przełączenia i wynikającej z tego procedury rekonfiguracji węzła w nowej sieci, następuje przypisanie adresu IP innego niż ten wykorzystywany przed przełączeniem. Realizowane jest to zgodnie z polityką, mechanizmami i adresacją przyjętymi w sieci, do której następuje przełączenie. Ponieważ nowy adres pełni funkcję zarówno identyfikatora, jak i lokalizatora węzła, zmiana ta często będzie skutkować przerwaniem możliwości kontynuowania dotychczas zestawionych i wykorzystywanych połączeń. Jest to spowodowane tym, że

nawiązane wcześniej sesje pomiędzy rozważanym terminalem mobilnym a węzłami korespondującymi wykorzystują adres IP zgodny z adresacją poprzedniej sieci. Dodatkowo w związku ze zmianą punktu podłączenia do sieci, zmianą umiejscowienia węzła w jej topologii, niezbędna będzie modyfikacja ścieżki wykorzystywanej do transmisji pakietów dla danej sesji.

Ponieważ, jak zostało to opisane w pierwszych rozdziałach rozprawy, środowisko pracy węzłów systemu komunikacji na morzu jest bardzo charakterystyczne, do problemu zarządzania mobilnością tych węzłów należy podejść równie specyficznym, starając się znaleźć rozwiązania dedykowane dla tego środowiska. Opisywane w tym rozdziale i proponowane w rozprawie rozwiązania zostały częściowo opracowane w ramach realizacji projektu netBaltic [6] [22], do którego też będzie się odnosiła część przyjętych założeń, by zachować całościowe spojrzenie, spójność i kompatybilność z pozostałymi elementami systemu.

Istotnym wyróżnikiem proponowanego rozwiązania jest, odmienne niż w standardowych sieciach, statyczne powiązanie identyfikatora węzła systemu (jednostki pływającej) z adresem IPv6, który w tym podejściu nie jest przypisywany do konkretnego interfejsu, a węzła jako elementu całego systemu [82] [177]. Przydzielenie identyfikatora, a co za tym idzie adresu IPv6, realizowane będzie w fazie rejestrowania węzła w systemie i dostarczania mu podstawowej konfiguracji. Po stronie elementów infrastruktury systemu netBaltic i opracowanych w projekcie mechanizmów pozostaje kwestia zapewnienia dostępności poszczególnych węzłów oraz utrzymania łączności w sytuacji zmiany ich punktu podłączenia do sieci. W tym drugim przypadku rozważane powinny być dwa scenariusze: bezpośrednia zmiana punktu podłączenia do sieci oraz zmiana w strukturze drzewa rozgłoszeniowego w strefie B systemu [6] [92] – oba te scenariusze zostały szczegółowo opisane w dalszej części rozdziału.

Na podstawie przeprowadzonej analizy podjęto decyzję, że w opracowywanym rozwiązaniu wykorzystywana zostanie architektura systemu Proxy Mobile IPv6 [105]. Znaczącą zaletą obserwowaną w systemie PMIPv6 jest mniejszy narzut danych wynikający z braku tunelowania ruchu na łączu bezprzewodowym. Takie tunelowanie występuje w rozwiązaniach Mobile IPv6. Spodziewane trudne warunki propagacyjne w docelowym środowisku pracy rozwiązań dedykowanych komunikacji na morzu, podnoszą istotność znaczenia tego kryterium [22]. Analizując dwa opisane wcześniej podejścia do obsługi

mobilności węzłów można stwierdzić, że czas przełączania, po zastosowaniu pewnych mechanizmów optymalizacji MIPv6 [178], dla obu tych rozwiązań będzie porównywalny. Ale wybór rozwiązania bazującego na PMIPv6 i zastosowanie opisanych w dalszej części pracy propozycji pozwalają na znaczną redukcję wartości tego czasu.

W architekturze systemu Proxy Mobile IPv6 wprowadza się dwa elementy funkcjonalne: Mobile Access Gateway (MAG), Local Mobility Anchor (LMA), które pozwalają na zniesienie konieczności implementacji aplikacji do obsługi mobilności w terminalu mobilnym użytkownika (Rys. 3.26). Oba zlokalizowane są po stronie infrastruktury operatora sieci dostępowej.

Elementy MAG będące w bezpośredniej komunikacji z punktami dostępowymi czy stacjami bazowymi informowane są o wykryciu przełączenia do nowego punktu podłączenia do sieci w warstwie L2. Często rozwiązaniem spotykanym w praktyce jest implementacja funkcjonalności elementu MAG oraz punktu dostępowego w jednym urządzeniu. Podejście takie nie jest jednak wskazane w standardzie, a rozważając aspekty skalowalności można zauważyć, że w tym przypadku pojedynczy element MAG może obsługiwać jedynie jeden punkt dostępowy, co prowadzi do istotnych ograniczeń możliwości skalowalności takiego systemu.

Zgodnie z przyjętymi w PMIPv6 rozwiązaniami, terminal kliencki postrzega wszystkie elementy MAG jako jedną bramę domyślną, niezależnie od tego, do którego punktu dostępowego jest podłączony. Jest to możliwe dzięki przyjęciu niepoprawnej topologicznie adresacji (niezgodnej w domyślną adresacją w wizytowanej sieci), która pozostaje jednak zgodna z domową adresacją rozważanego terminala mobilnego. Każdy z elementów MAG na interfejsie połączonym z punktami dostępowymi ma przypisany taki sam adres IPv6. Podejście to jest dogodne dla terminala, który nawet w przypadku zmiany punktu przyłączenia nie ma konieczności ponownej konfiguracji adresu IPv6 i konfiguracji ścieżki przekazywania pakietów.

Zadania analogiczne do zadań przypisanych agentowi domowemu (*Home Agent MIPv6*) zdefiniowanemu dla rozwiązań Mobile IPv6, przypisane są do elementów LMA. W ich zakres wchodzi monitorowanie i utrzymanie informacji o trasach przekazywania pakietów dla poszczególnych terminali mobilnych – koordynacja łączności pomiędzy elementami MAG a węzłami korespondującymi. Jednocześnie to LMA na podstawie

zaimplementowanej w nim bazy danych decyduje o prefiksie sieci domowej (*HNP - Home Network Prefix*) przydzielanym do konkretnego terminala. W opisywanym rozwiązaniu na potrzeby węzła przypisywany jest cały 64-bitowy prefiks — jest to zatem implementacja podejścia *per-host prefix*, co pozwala na uniknięcie wystąpienia duplikacji adresów IPv6. Niemniej jednak, wprowadzenie rozwiązań Proxy Mobile IPv6 w żaden sposób nie narzuca sposobu konfiguracji adresów IPv6. Obie metody automatycznej konfiguracji adresów przewidziane w protokole IPv6 (bezstanowa *Stateless Address Autoconfiguration* (SLAAC) [179], stanowa DHCPv6 [180]) są możliwe do zastosowania. W pierwszym przypadku, adres IPv6 przypisany do terminala ustalany jest na podstawie prefiksu przydzielonego przez LMA, a dostarczanego przez MAG w wiadomości *Router Advertisement* (RA) z sieci domowej oraz aktualnego identyfikatora interfejsu sieciowego (np. identyfikatora EUI64) zgodnie ze standardowymi mechanizmami SLAAC. W przypadku trybu stanowego i zastosowania serwera DHCPv6, elementy MAG muszą pełnić funkcję pośrednika DHCPv6.

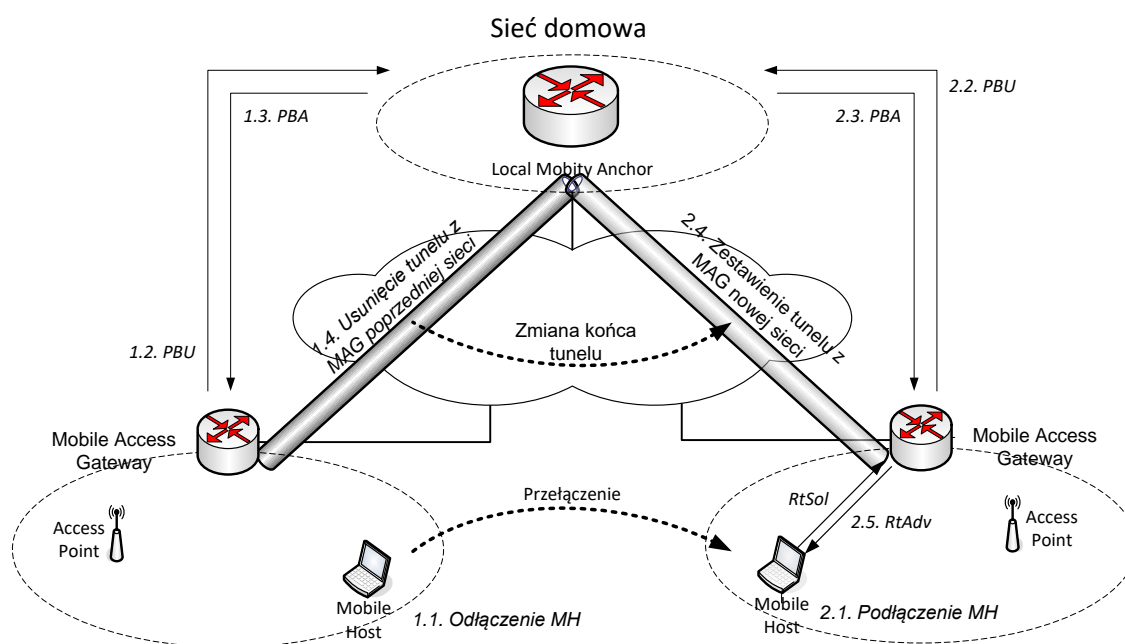
Efektywna realizacja obsługi mobilności w sieciach z zaimplementowanymi mechanizmami zdefiniowanymi dla PMIPv6 możliwa jest po wprowadzeniu pewnej integracji z urządzeniami odpowiedzialnymi za przełączenia w niższych warstwach. Procedury odpowiedzialne za komunikację pomiędzy elementami MAG a punktami dostępowymi lub stacjami bazowymi powinny informować o wyrejestrowaniu węzła z punktu dotychczas wykorzystywanego oraz o jego rejestracji w nowym punkcie. W pierwotnej wersji zakładano, że proces ten nie powinien polegać na interpretacji wiadomości przesyłanych przez terminal mobilny, lecz na bezpośredniej komunikacji punktu dostępowego oraz elementów MAG. Odejście od tego założenia, jak opisano w dalszej części rozdziału, pozwala na poprawę efektywności przełączania. Dzięki współpracy punktów dostępowych i elementów MAG, elementy infrastruktury PMIPv6 mogą śledzić trasę przemieszczania się terminala mobilnego i jeżeli zajdzie taka konieczność, bez zbędnej zwłoki rozpocząć procedurę przełączania w warstwie sieciowej.

Na Rys. 3.26 zaprezentowano schemat wymiany wiadomości w domenie PMIPv6 dla scenariusza, w którym przełączenie realizowane jest między dwoma elementami MAG. W celu zapewnienia większej przejrzystości schematu pominięto proces pierwszego podłączenia do sieci, opisany poniżej. Pierwszym, niezbędnym krokiem jest wykrycie przełączenia w warstwie łącza danych. Mając informację o przełączeniu pMAG (MAG



przypisany do sieci pierwotnej) pobiera informacje o identyfikatorze terminala, adresie LMA przypisanym do rozważanego użytkownika oraz sposobie konfiguracji adresów.

Na podstawie powyższych danych generowana jest wiadomość *Proxy Binding Update* (PBU) i przesyłana w imieniu terminala mobilnego przez pMAG do konkretnego LMA. Wiadomość PBU jest rozszerzeniem standardowej wiadomości *Binding Update* występującej w rozwiązaniu Mobile IPv6. Po uprzednim uwierzytelnieniu użytkownika mobilnego i weryfikacji poprawności wiadomości PBU, element LMA na podstawie danych zawartych w profilu użytkownika konstruuje odpowiedź – wiadomość *Proxy Binding Acknowledgement* (PBA). Wymiana wspomnianych wiadomości – PBU-PBA, dostarcza elementom LMA i MAG danych niezbędnych do zestawienia tunelu, w którym będą przesyłane dane pomiędzy konkretnym terminalem mobilnym i węzłami korespondującymi. Szczegóły dotyczące podtrzymania adresacji i konfiguracji bramy domyślnej przesyłane są do terminala w wiadomości *Router Advertisement* przez pMAG. Co ważne, w tym przypadku następuje odejście od standardowego sposobu dostarczania tej wiadomości pierwotnie realizowanej jako transmisja grupowa multicast. W związku z indywidualną konfiguracją przypisaną konkretnemu węzłowi, w PMIPv6 wiadomość RA dostarczana jest na adres unicast o zakresie łącza (*link-local*) interfejsu biorącego udział w przełączeniu.



Rys. 3.26 Architektura systemu PMIPv6

W porównaniu do pierwotnego podłączenia do sieci przełączenie pomiędzy dwoma obszarami systemu obsługiwanymi przez różne elementy MAG odbywa się w analogiczny sposób. Po wykryciu odłączenia w warstwie L2 od punktu dostępowego nadzorowanego przez pMAG obserwujemy wymianę wiadomości PBU i PBA (Rys. 3.26 – wiadomości 1.2, 1.3). Celem tej wymiany jest usunięcie powiązania w obrębie aktualnej sesji mobilności dla rozważanego użytkownika (Rys. 3.26 – oznaczenie 1.4). Niezależnie od tej procedury, jednocześnie realizowany może być proces podłączenia użytkownika do innego punktu dostępowego, w tym przypadku nadzorowanego przez nMAG (element MAG przypisany nowej sieci, do której realizowane jest przełączenie). Ten etap został zaprezentowany na rysunku jako wymiana wiadomości 2.1-2.5. Dla poprawy czytelności opracowanego schematu, wiadomości przesyłane między MAG i AP, które istotnie zależą od zastosowanej metody komunikacji, zostały zaznaczone jedynie schematycznie.

### **3.6.1 Poprawa efektywności przełączania PMIPv6**

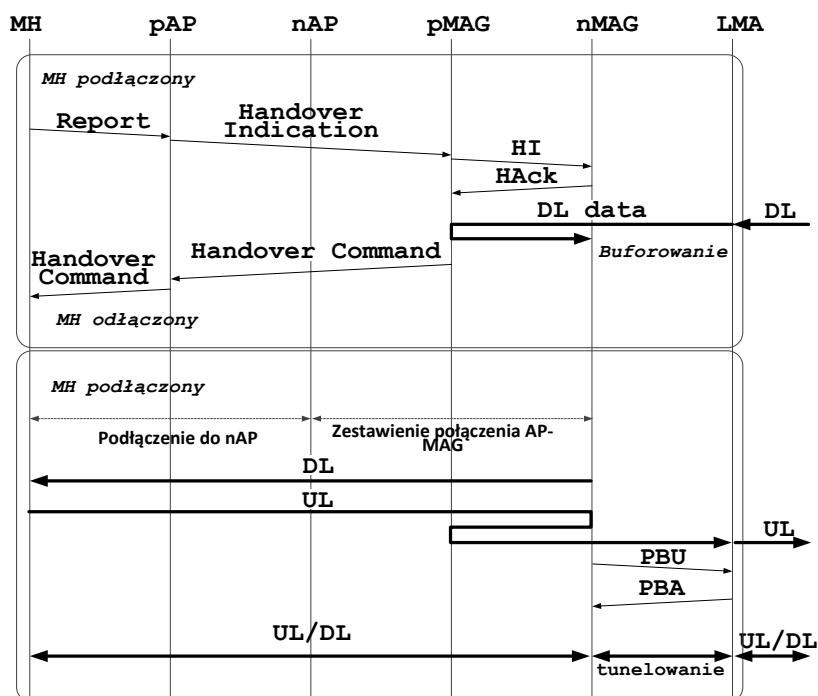
#### *Fast Handover for Proxy Mobile IPv6*

W celu poprawy wydajności mechanizmów zarządzania mobilnością zgodnych ze specyfikacją PMIPv6, w zaleceniu RFC 5949 [107] zaproponowano rozszerzenie *Fast Handover for Proxy Mobile IPv6* (FH-PMIPv6). W dokumencie tym opisane zostały mechanizmy pozwalające na zmniejszenie liczby utraconych pakietów i skrócenie czasu przełączania. Zoptymalizowane podejście korzysta z możliwości przekazywania informacji elementom MAG przez sygnalizację z niższych warstw informującą o odłączeniu lub dołączeniu terminala mobilnego. W rozwiązaniu tym, dwukierunkowy tunel pomiędzy pMAG i nMAG jest wykorzystywany do przekazywania ruchu (wysłanych pakietów) w trakcie trwania procedury przełączania – wymiany wiadomości sygnalizacyjnych.

Główna zaleta proponowanego rozszerzenia polega na możliwości buforowania transmitowanych danych (strumienia *downlink*) w czasie, gdy węzeł mobilny zostanie odłączony od wykorzystywanego wcześniej punktu podłączenia do sieci, a procedury przełączenia nie zostaną jeszcze w pełni zakończone. Usprawnienie to zmniejszając straty pakietów, wprowadza jednak dodatkowy wymóg (dla wszystkich elementów MAG w sieci) w postaci dostępności dedykowanych zasobów pozwalających na tymczasowe przechowywanie buforowanych danych.



Rozwiązanie FH-PMIPv6 może być implementowane na dwa sposoby – proaktywny i reaktywny. Schematy wymiany wiadomości dla obu wariantów zostały przedstawione na Rys. 3.27 i Rys. 3.28.

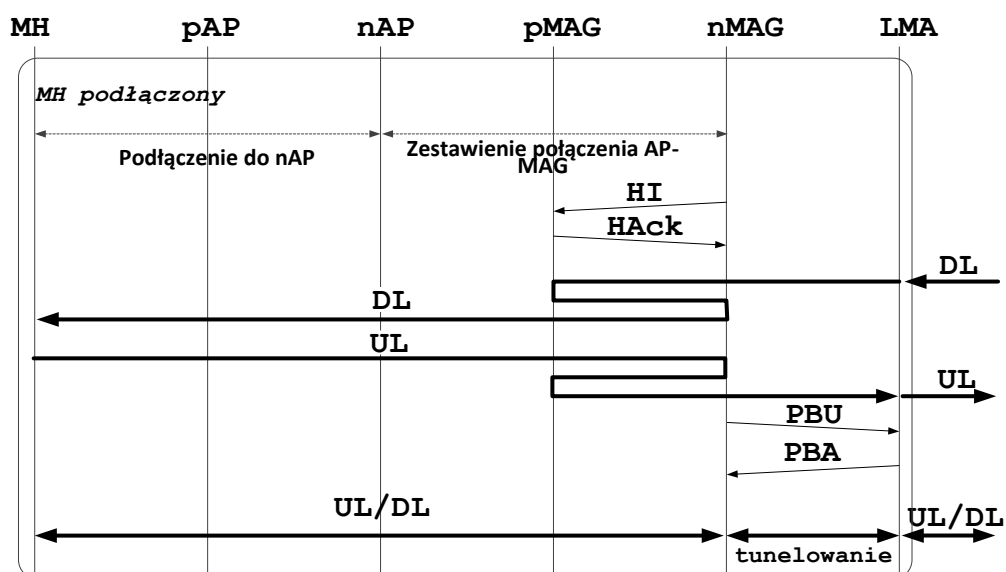


Rys. 3.27 Wymiana wiadomości zgodnie z wariantem proaktywnym FH-PMIP

W przypadku wariantu proaktywnego tunel wykorzystywany do transmisji danych od węzła korespondującego zestawiany jest jeszcze przed dołączeniem węzła ruchomego do elementu nMAG podłączonego do nowej sieci. Widoczne jest tutaj odejście od przyjętego w pierwotnym wariantcie PMIPv6 paradygmatu realizacji procedury przełączenia bez uwzględnienia w jej przebiegu operacji realizowanych przez terminal mobilny. W tym przypadku istotną rolę odgrywa raport przesyłany przez węzeł mobilny, który z wyprzedzeniem przekazuje pozostałym elementom sieci biorącym udział w tym procesie informacje o planowanym przełączeniu. Procedura ustanawiania tunelu jest inicjowana przez pMAG, po otrzymaniu komunikatu *Handover Indication* pochodzącego z niższych warstw (np. punktu dostępowego aktualnie wykorzystywanego przez terminal mobilny). Następnie dokonywana jest wymiana wiadomości *Handover Initiation* (HI) i *Handover Acknowledgment* (HACK) pomiędzy elementami MAG biorącymi udział w przełączeniu. W jej wyniku następuje przekierowanie tunelowanego ruchu do nMAG i buforowanie danych do czasu zakończenia przełączenia w niższej warstwie. Etap ten zostaje zakończony po przeprowadzeniu wymiany standardowych wiadomości PBU/PBA



ze standardowej wersji rozwiązania PMIPv6, po której ruch od terminala mobilnego przechodzi bezpośrednio przez nMAG.



Rys. 3.28 Wymiana wiadomości zgodnie z wariantem reaktywnym FH-PMIP

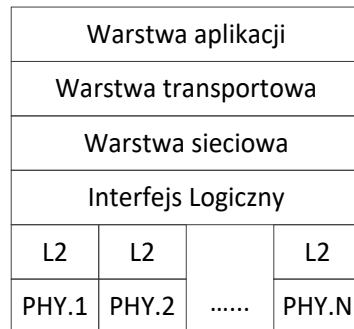
W trybie reaktywnym tunel między pMAG, a nMAG jest zestawiany po dołączeniu węzła mobilnego do nMAG. W związku z czym, w tym przypadku buforowanie danych nie jest potrzebne. Ten tryb pracy jest jednak mniej efektywny i nie zapewnia znaczącej poprawy, w związku z czym w praktyce jest rzadziej stosowany.

#### Miękkie przełączenie z wykorzystaniem PMIPv6

Zaproponowany, autorski schemat zarządzania mobilnością nie jest bezpośrednią implementacją systemu Proxy Mobile IPv6. Bazując na analizie standaryzowanych rozwiązań obsługi mobilności oraz proponowanych w literaturze ich ulepszeń, wprowadzone zostały mechanizmy dostosowujące proponowane rozwiązanie do wykorzystania w środowisku morskim. W przypadku projektowanego systemu niezbędne są elementy wspomagające zarządzanie mobilnością po stronie węzła – podobnie jak ma to miejsce w scenariuszu proaktywnym FH-PMIPv6. W związku z pracą w środowisku heterogenicznym, a co za tym idzie dostępnością wielu interfejsów różnych technik transmisji, opracowane rozwiązanie pozwoli na realizację miękkiego przełączenia z wykorzystaniem interfejsu logicznego.

W większości wykorzystywanych obecnie systemów operacyjnych, interfejs fizyczny jest powiązany z odpowiednim stosem sieciowym TCP/IP zapewniającym

obsługę ruchu IP. Interfejs logiczny jest dodatkową warstwą abstrakcji (często nazywaną warstwą 2.5) pozwalającą na ukrycie fizycznych interfejsów za jedną logiczną instancją interfejsu sieciowego (Rys. 3.29). W ten sposób, interfejs logiczny wykorzystywany jest jako rozwiązanie zapewniające możliwość realizacji mobilności w sieciach heterogenicznych spełniając w szczególności wymagania dotyczące systemu netBaltic.

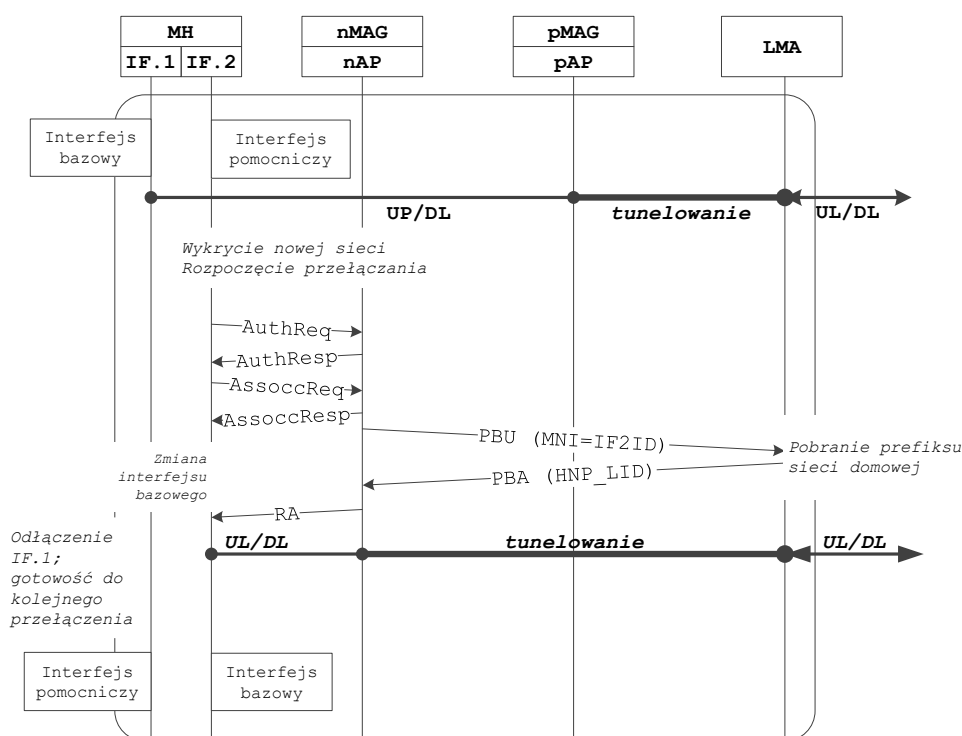


Rys. 3.29 Umieszczenie interfejsu logicznego w stosie sieciowym węzła

Na Rys. 3.30 przedstawiono wymianę wiadomości pozwalającą na realizację przełączenia zgodnie z proponowanym schematem nazwanym LISH (*Logical Interface Soft Handover*) [13]. W porównaniu ze standardowym przełączaniem, zgodnym ze specyfikacją PMIPv6, opisanym w poprzednim podrozdziale, w proponowanym rozwiązaniu możliwe jest zmniejszenie wpływu opóźnienia przełączania w warstwie L2 oraz niektórych procedur wpływających na czas przełączania w warstwie sieciowej (wykrycie podłączenia, procedury AAA (*Authentication Authorization, Accounting*) oraz część rejestracji lokalizacji).

W przedstawionym przykładzie, w fazie początkowej interfejs IF.1 ustawiony jest jako interfejs bazowy, natomiast IF.2 działa jako interfejs wspierający. W pierwszej kolejności realizowana jest procedura przełączania na poziomie warstwy L2. Po jej zakończeniu przeprowadzana jest wymiana wiadomości zgodna ze specyfikacją PMIPv6 pozwalająca na utrzymanie tras pomiędzy węzłem mobilnym a węzłami korespondującymi. Należy zauważyć, że w wiadomości PBU, opcja *Mobile Node Identifier* (MNI) będzie przyjmowała wartość identyfikatora interfejsu IF.2. W związku z tym, że istniejące w LMA powiązanie identyfikatora węzła i przypisanego mu prefiksu skonfigurowane jest dla identyfikatora IF.1, istnieje konieczność wprowadzenia zmian w strukturze wpisów *Binding Cache Entry* i procedurze *LMA Binding Cache Lookup*. LMA musi być w stanie wyszukać prefiks sieci domowej przypisany do terminala mobilnego

przy użyciu dowolnego identyfikatora interfejsu fizycznego zgrupowanego w ramach tego samego interfejsu logicznego. Komunikat *Proxy Binding Acknowledgment* jest standardową odpowiedzią zgodną ze specyfikacją PMIPv6. Element MAG, po otrzymaniu tego komunikatu, przesyła prefiks sieci domowej w wiadomości *Router Advertisement* (RA). Terminal mobilny po jej otrzymaniu zmienia konfigurację interfejsu logicznego i ustawia ten interfejs jako interfejs bazowy.

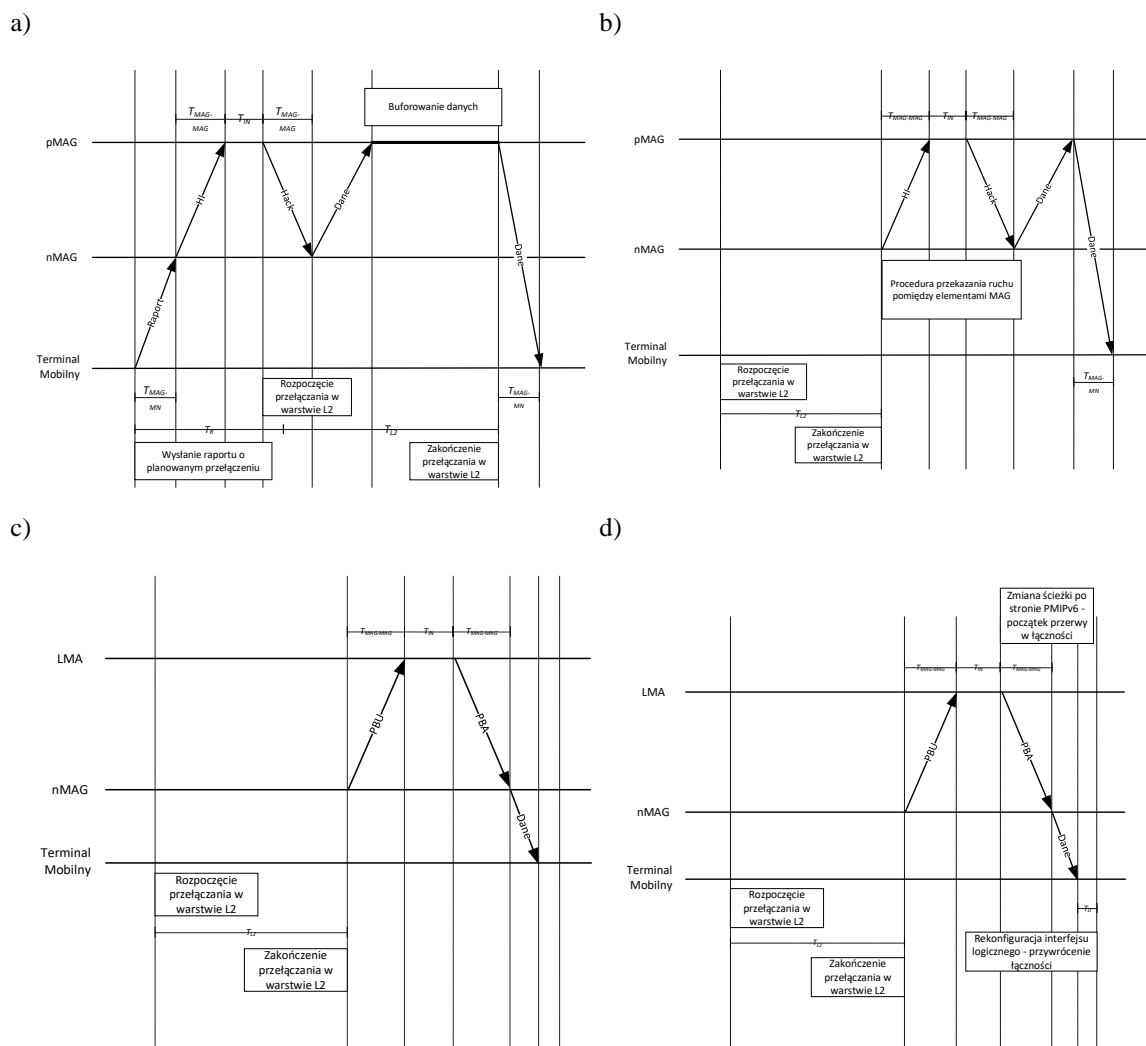


Rys. 3.30 Wymiana wiadomości zgodnie z procedurą LISH [13]

### 3.6.2 Ocena efektywności proponowanego rozwiązania przełączania

Zaproponowane rozwiązanie zostało porównane ze standardowym rozwiązaniem PMIPv6 oraz dwoma wariantami FH-PMIPv6 przy wykorzystaniu modelu analitycznego, wzorując się na modelu zaprezentowanym w [181]. W pracy tej wykazano dużą zbieżność wyników opisanego modelu z badaniami symulacyjnymi, co spowodowało, że został on również wykorzystany w innych pracach czy artykułach przeglądowych – m.in. [182] [183] [184].

Wizualizacja scenariuszy uwzględnionych w analizie została przedstawiona na Rys. 3.31. Pokazano na nim poszczególne składowe czasu przełączania, relacje między ich kolejnością i najważniejsze zdarzenia wpływające na proces przełączania.



Rys. 3.31 Wizualizacja scenariuszy uwzględnionych w analizie – a) FH-PMIPv6 tryb proaktywny , b) FH-PMIPv6 tryb reaktywny, c) PMIPv6, d) LISH

W przedstawionej analizie przyjęto założenie, że czas  $T_{L2}$  uwzględnia oprócz wszystkich procedur niezbędnych do przeprowadzenia przełączenia w warstwie L2 również czas potrzebny na przesłanie informacji o przełączeniu pomiędzy punktem dostępowym, do którego nastąpiło przełączenie, a elementem MAG powiązany z tym punktem. W dużej mierze komunikacja ta zależy od rozważanego środowiska implementującego konkretne rozwiązanie. Autor rozprawy, w innych realizowanych pracach, wskazywał na możliwość zastosowania zmodyfikowanych komunikatów architektury *Media Independent Handover* (MIH) opisanej w IEEE 802.21 (szczegóły w

[12]) lub wiadomości wykorzystywanych do realizacji funkcji rozliczania występujących w serwerze AAA (np. z wykorzystaniem protokołu Radius [185] lub Diameter [186]). Parametry uwzględnione w analizie zostały zaprezentowane w Tabeli 3.5.

Tabela 3.5 Parametry analizy efektywności rozważanych metod przełączania

Parametr	Opis	Wartość
$T_{L2}$	Czas potrzebny na realizację przełączenia w niższej warstwie. Czas ten uwzględnia również czas powiadomienia o przełączeniu między punktem dostępowym a elementem MAG.	150 ms
$T_{MAG-LMA}$	Opóźnienie pomiędzy elementami MAG i LMA	15 ms
$T_{MAG-MAG}$	Opóźnienie pomiędzy pMAG-nMAG	$0.5T_{MAG-LMA}$
$T_{IN}$	Czas potrzebny na realizację wewnętrznych procedur – weryfikację profili, aktualizację tras, itp.	10 ms
$T_{MN-MAG}$	Opóźnienie na łączu MN-MAG	5 ms
$T_R$	Czas pomiędzy przesłaniem raportu o konieczności realizacji przełączenia a rzeczywistym wystąpieniem zerwania połączenia.	15 ms
$T_{LI}$	Czas potrzebny na rekonfigurację interfejsu logicznego.	5 ms
$\tau$	Współczynnik narzutu buforowania.	1.2
$T^{METH/}$	Przerwa w łączności wynikająca z przełączenia dla analizowanych metod - PMIP, FREA, FPRO, LISH odnoszących się do PMIPv6, reaktywnego PFMIP, proaktywnego PFMIP i rozwiązania proponowanego w rozprawie.	

Czas potrzebny na realizację przełączenia dla rozwiązania PMIPv6 zgodnie z przyjętym modelem może być zapisany jako:

$$T^{PMIP} = T_{L2} + T_{MAG-LMA} + T_{IN} + T_{MAG-LMA} + T_{MAG-MN} \quad (3.5)$$

$T^{PMIP}$  jest sumą składników obejmujących opóźnienie przełączania w warstwie niższej ( $T_{L2}$ ), wymianę komunikatów PBU i PBA ( $2 \times T_{MAG-LMA}$ ), wewnętrzne operacje LMA ( $T_{IN}$ ) oraz wysłanie komunikatu RA do MH ( $T_{MAG-MN}$ ).

Opóźnienie przełączania w przypadku reaktywnego i proaktywnego FH-PMIPv6 można wyznaczyć, korzystając odpowiednio z zależności (3.6) i (3.7)-(3.8).

Przełączenie reaktywne:

$$T^{FREA} = T_{L2} + T_{IN} + 2T_{MAG-MAG} + T_{MN-MAG} \quad (3.6)$$

Przełączenie proaktywne:

dla  $T'' > T_R + T_{L2}$

$$T^{FPRO} = \max(T_R - (2 T_{MAG-MAG} + T_{IN} + T_{MN-MAG}), 0) + T_{L2} + T_{MN-MAG} \quad (3.7)$$

dla  $T'' \leq T_R + T_{L2}$

$$T^{FPRO} = \max(2 T_{MAG-MAG} + T_{IN} + T_{MN-MAG} - T_R, 0) + \tau T_{MAG-MAG} + T_{MN-MAG} \quad (3.8)$$

gdzie  $T''$  to czas od momentu, w którym został wysłany raport do odebrania przez terminal mobilny pierwszego pakietu danych. Obejmuje on czas komunikacji MN-MAG potrzebny do wysłania powiadomienia o mającym nastąpić przełączeniu ( $T_{MN-MAG}$ ), czas wymiany komunikatów HI/HACK i transmisji tunelowanych danych ( $(2+\tau) T_{MAG-MAG}$ ), a także potrzebny na realizację procedur wewnętrznych w nMAG ( $T_{IN}$ ).

$$T'' = T_{MN-MAG} + (2 + \tau) T_{MAG-MAG} + T_{IN} \quad (3.9)$$

Jeżeli  $T_R + T_{L2} < T''$ , nie pojawia się potrzeba buforowania danych, MN zakończył bowiem swoje przełączenie L2 przed zakończeniem procedury FH-PMIPv6. W przeciwnym przypadku nMAG musi buforować pakiety danych, aby zminimalizować liczbę utraconych pakietów.

Czas  $T^{LISH}$  potrzebny na realizację przełączania w proponowanym rozwiązaniu LISH, obliczany jest zgodnie z zależnością (3.10) i obejmuje czasy wysłania wiadomości PBA ( $T_{MAG-LMA}$ ), wysłania HNP w wiadomości RA ( $T_{MAG-MN}$ ) oraz dostosowania interfejsu logicznego ( $T_{LI}$ ).

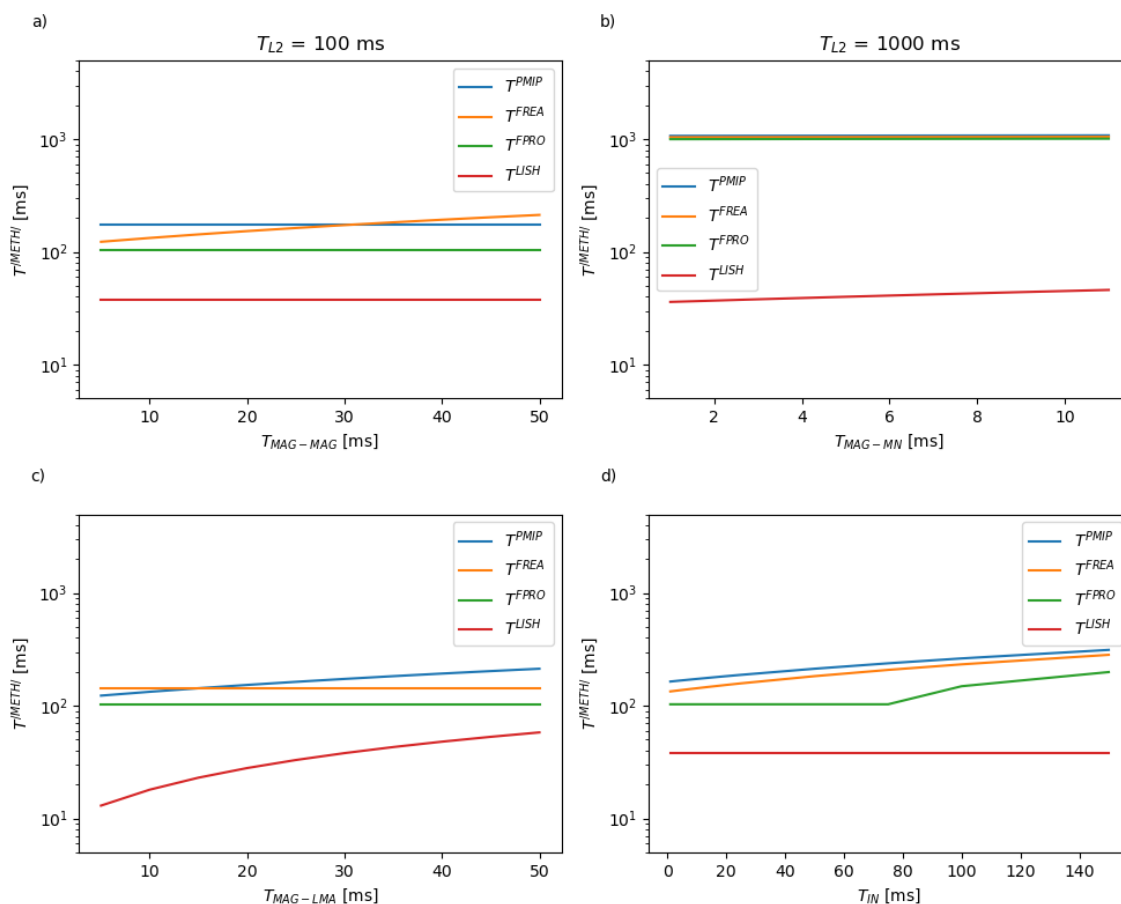
$$T^{LISH} = T_{MAG-LMA} + T_{MAG-MN} + T_{LI} \quad (3.10)$$

Implementacja proponowanego rozwiązania LISH upraszcza procedury przełączania i skutkuje zmniejszeniem czasu potrzebnego na ich realizację. Szczegółowe porównanie analizowanych rozwiązań dla różnych wartości parametrów wejściowych, odnoszących się do rzeczywistych scenariuszy, przedstawiono na Rys. 3.32 - Rys. 3.34. Jeżeli w opisie

rysunków nie podano innych wartości, to parametry modelu przyjmują wartości przedstawione w Tabeli 3.5.

Należy zauważyć, że proponowane rozwiązanie jest niewrażliwe na zmiany wartości  $T_{L2}$  i  $T_{IN}$  (Rys. 3.33, Rys. 3.34). Co więcej, wpływ opóźnień pomiędzy elementami systemu PMIPv6 na całkowite opóźnienie przełączania jest również mniejszy niż w przypadku innych analizowanych protokołów, dla których całkowite opóźnienie przełączania zależy od dwukrotnie występującego składnika  $T_{MAG-LMA}$  lub wymiany wiadomości/tunelowania pomiędzy elementami MAG.

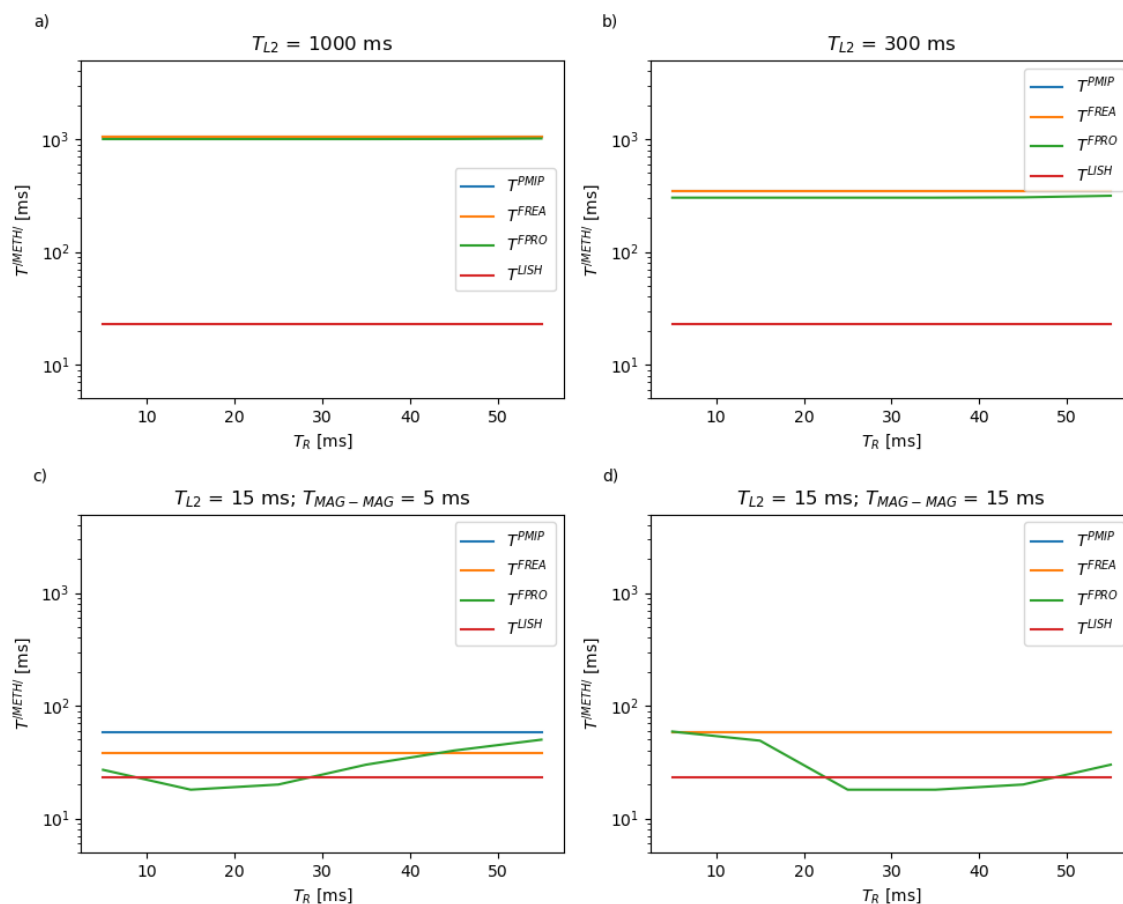
Wykresy zaprezentowane na Rys. 3.32 a), Rys. 3.32 c) i Rys. 3.32 d) pokazują zależność czasu potrzebnego na realizację przełączenia od parametrów  $T_{MAG-MAG}$ ,  $T_{MAG-LMA}$ ,  $T_{IN}$ . Widoczna jest istotna przewaga w postaci zmniejszenia czasu przełączania, proponowanej metody LISH w porównaniu do pozostałych rozważanych rozwiązań. Nawet dla dużych wartości opóźnienia pomiędzy elementami MAG i LMA – składnika, który najbardziej wpływa na czas przełączenia dla metody LISH, zapewnia ona krótszy czas niż pozostałe analizowane protokoły. Z oczywistych powodów widoczna jest też niewrażliwość poszczególnych metod na te parametry, które nie występują w opisie danego rozwiązania.



Rys. 3.32 Ocena wpływu wybranych parametrów na efektywność realizacji przełączania z wykorzystaniem analizowanych metod przełączania

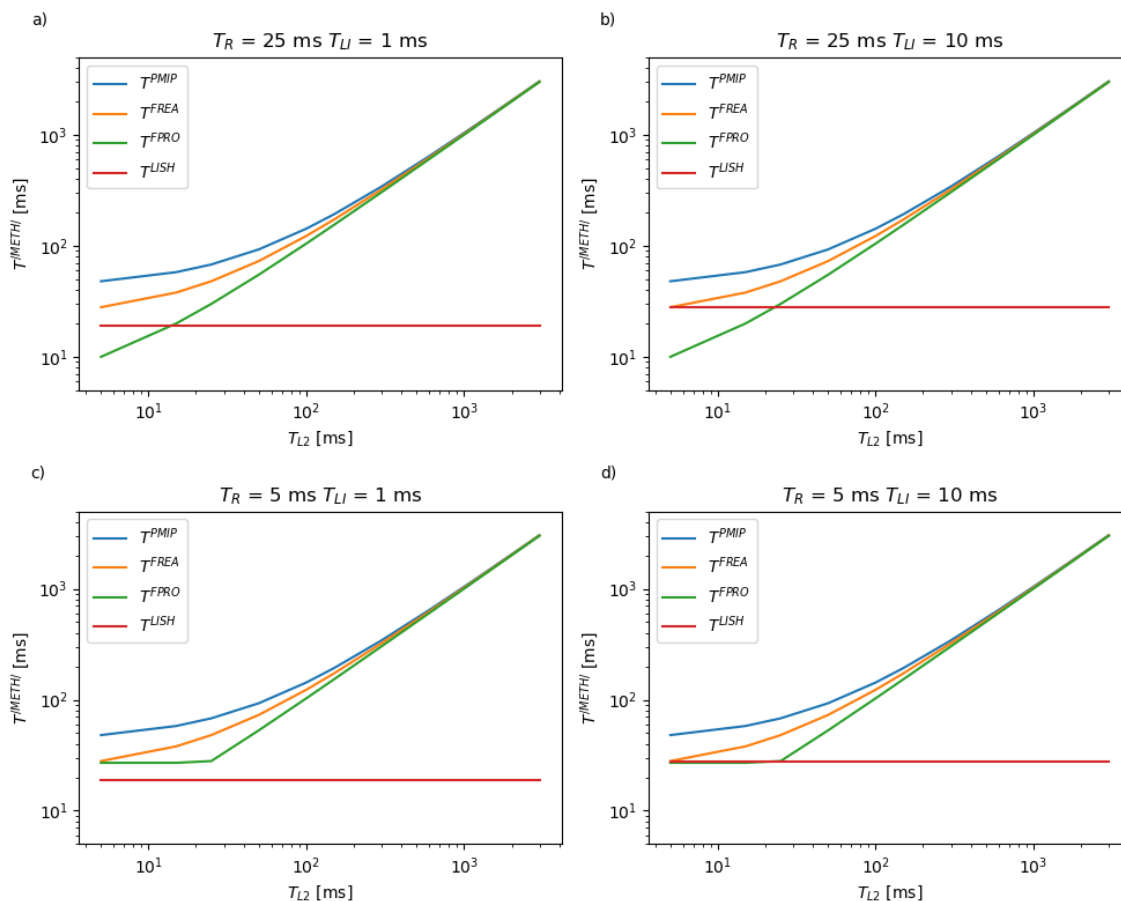
Charakterystyczną cechą proaktywnej wersji protokołu FH-PMIPv6 jest wysłanie raportu zawierającego informacje o planowanej realizacji przełączenia. Czas  $T_R$  pomiędzy wysłaniem raportu a rozpoczęciem przełączenia będzie istotnym parametrem wpływającym na efektywność tego rozwiązania. Zestawienie różnych wariantów i porównanie ich z pozostałymi ocenianymi algorytmami zostało zilustrowane na wykresach przedstawionych na Rys. 3.33. Analiza zaprezentowanych tam wyników pozwala na wyciągnięcie kilku wniosków. Jednym z nich jest obserwacja, że wpływ  $T_R$  będzie zależał od wartości pozostałych parametrów modelu – głównie czasu przełączenia w warstwie L2 (wykresy a, b i c). Z kolei przy małych wartościach czasu przełączenia  $T_{L2}$  można zauważyć, że w pewnych zakresach  $T_R$ , metoda FH-PMIPv6 oferuje krótszy czas przełączania niż proponowana metoda LISH. Jest to jednak scenariusz rzadko występujący w środowisku rzeczywistym, w którym to czas przełączenia w warstwie L2 może być zdecydowanie dłuższy [8].





Rys. 3.33 Ocena wpływu czasu raportowania na efektywność analizowanych metod przełączania

Dokładniejsza analiza wpływu  $T_{L2}$  na efektywność poszczególnych metod przełączania została zaprezentowana na Rys. 3.34. Uwzględniono na nim bardziej realistyczne zakresy  $T_{L2}$  oraz różne wartości  $T_R$ ,  $T_{LI}$ , pokazując ich wpływ na czas potrzebny na realizację przełączenia. Ponownie, w zakresie niewielkich wartości  $T_{L2}$  (mniejszych niż ok. 10 ms) proaktywny wariant FH-PMIPv6 cechuje się największą efektywnością. Jednak przewaga ta spada wraz z wydłużeniem się czasu potrzebnego na realizację przełączenia w warstwie L2. W efekcie, dla realistycznych wartości czasu przełączania w warstwie L2, proponowana w rozprawie metoda cechuje się zyskiem wynoszącym dwa/trzy rzędy wielkości. Zysk ten w dużej mierze zależy będzie od czasu  $T_{L2}$ , który to w przypadku zastosowania interfejsu logicznego i mechanizmów miękkiego przełączania nie wpływa na czas przełączania i może zostać pominięty.



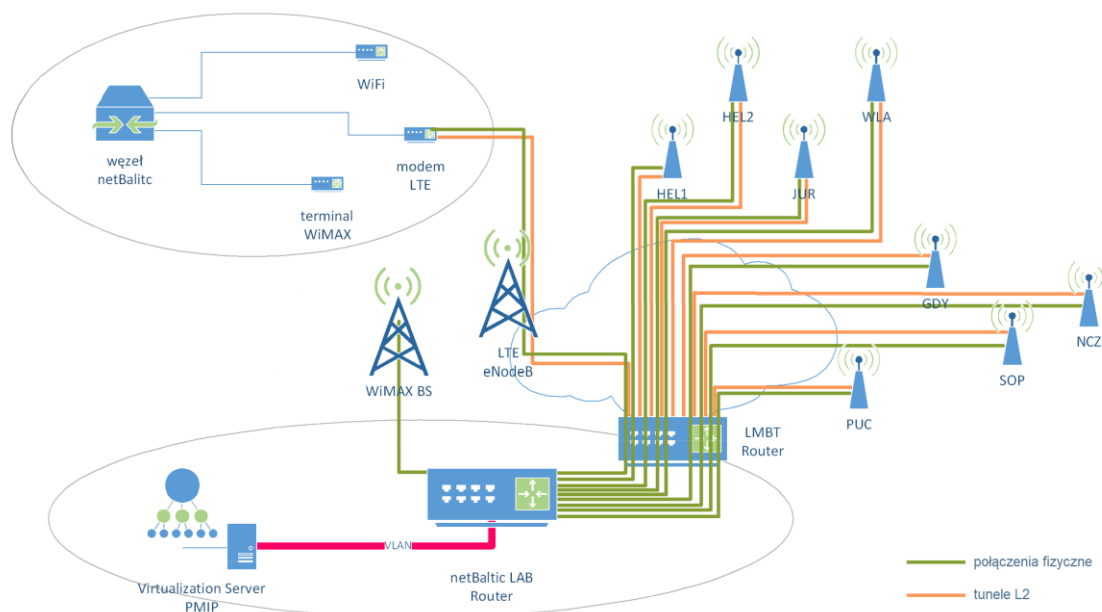
Rys. 3.34 Analiza wpływu czasu przełączania w warstwie L2 na efektywność wybranych metod

### 3.6.3 Weryfikacja opracowanej metody przełączania w środowisku rzeczywistym

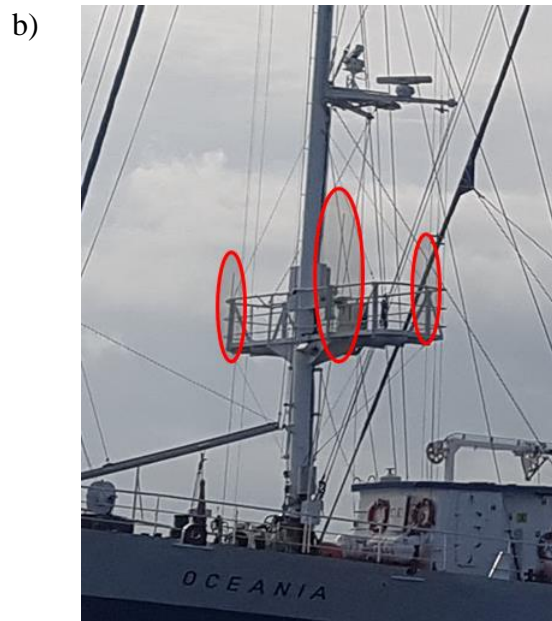
Schemat przełączania opisany w tym podrozdziale został wykorzystany jako rozwiązanie będące częścią implementacji węzła systemu netBaltic, którego weryfikacji dokonano w trakcie testów integracyjnych i współpracy z innymi komponentami systemu netBaltic [20]. Architekturę węzła oraz obsługiwane dzięki zastosowanym rozwiązaniom scenariusze, opisano w kolejnym podpunkcie rozdziału. Uwzględnienie na etapie opracowywania architektury węzła systemu netBaltic podziału na moduły funkcjonalne oraz specyfikacja interfejsu programistycznego API (*Application Programming Interface*) [22] wykorzystywanego do wymiany informacji pomiędzy nimi dostarczają możliwość separacji rozwiązań odpowiedzialnych za wybór łącza, oraz samą realizację przełączenia.

Do przeprowadzenia testów wykorzystano infrastrukturę badawczą Laboratorium Mobilnych Technik Bezprzewodowych [187] (będącym częścią systemu PL-LAB [188]) adaptując rozwiązania pozwalające na elastyczną konfigurację połączeń pomiędzy systemami dostępowymi oraz elementami MAG. Jako heterogeniczne środowisko integrujące różne techniki transmisji przygotowana została instalacja składająca się z sieci Wi-Fi rozlokowanej wokół Zatoki Gdańskiej, instalacji systemu WiMAX ze stacją bazową zlokalizowaną na budynku A Wydziału ETI PG, oraz adaptacji systemu LTE polegającej na tunelowaniu ruchu pomiędzy modemem LTE a elementem MAG. Schemat instalacji testowej wykorzystywanej w trakcie prowadzonych prac zaprezentowano na Rys. 3.35.

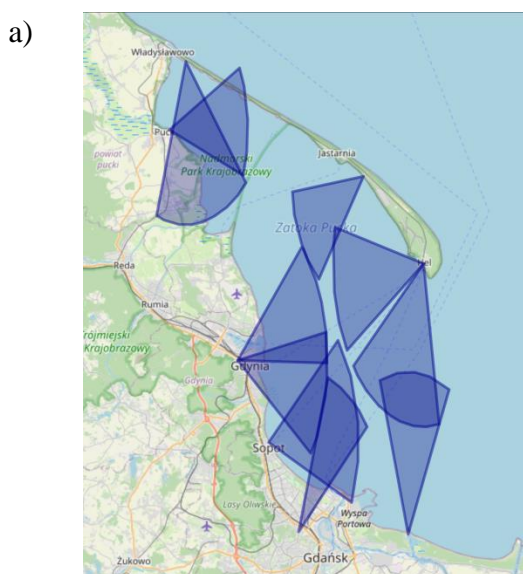
Zaproponowany w rozprawie schemat przełączania LISH został przetestowany w środowisku rzeczywistym w trakcie rejsów badawczych statku *RV Oceania*, należącego do Instytutu Oceanologii PAN. Rejsy te odbyły się w dniach: 2018-03-07 oraz 2018-03-08. Na Rys. 3.36 zaprezentowano przykładowe miejsce instalacji komponentów sieci Wi-Fi oraz lokalizację anten na jednostce pływającej. Kolejny Rys. 3.37 prezentuje wizualizację kierunku sektorów antenowych sieci Wi-Fi oraz przebieg trasy rejsów testowych.



**Rys. 3.35** Konfiguracje systemu testowego wykorzystywanego do analizy efektywności przełączania



Rys. 3.36 Przykładowe miejsca instalacji: a) punktu dostępowego, b) anten na jednostce pływającej



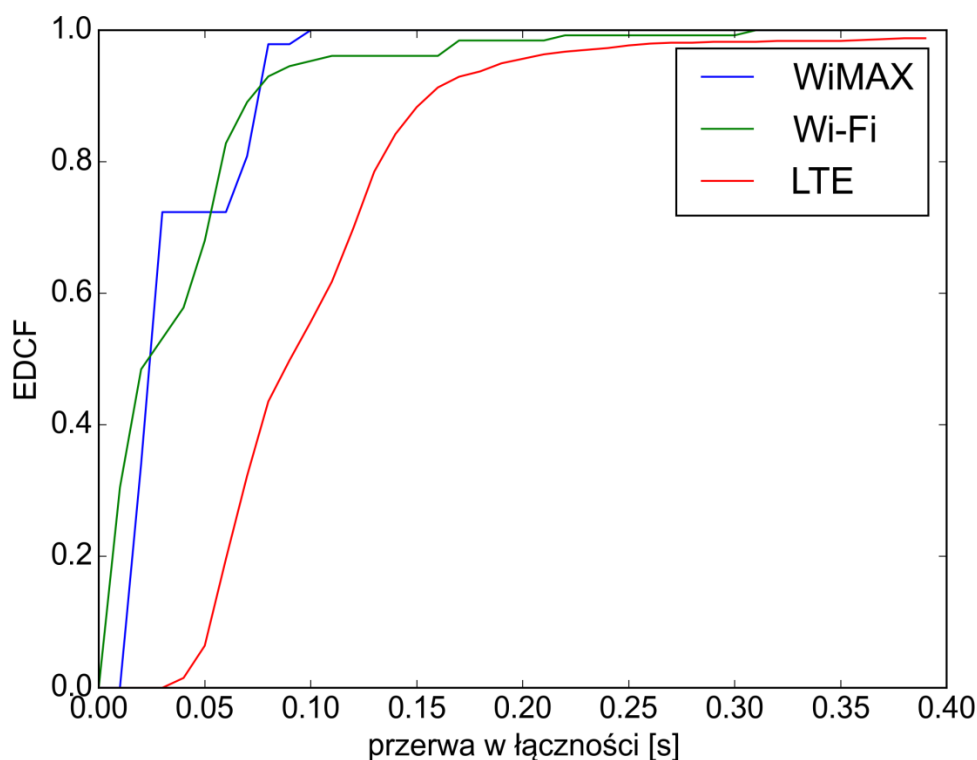
Rys. 3.37 Wizualizacja punktów dostępowych ułożonych na brzegu (a) oraz trasa rejsu testowego (b)

W trakcie połączeń testowych wykonanych podczas obu rejsów zebrano dane pozwalające na analizę czasową 163 przełączeń zrealizowanych pomiędzy różnymi technikami transmisji. Kolejne przełączania były inicjowane automatycznie przez skrypt zarządzający eksperymentem. Szczegóły pokazujące liczbę przełączeń pomiędzy konkretnymi technikami podano w Tabeli 3.6.

Tabela 3.6 Liczba zrealizowanych przełączeń pomiędzy testowanymi technikami transmisji

Interfejs bazowy			
Interfejs docelowy	LTE	Wi-Fi	WiMAX
LTE	-	58	14
Wi-Fi	59	-	9
WiMAX	13	10	-

Przeprowadzone kampanie pomiarowe dostarczyły szeregu cennych informacji o stabilności połączeń, w tym o przedziałach czasu związanych z udanymi przełączeniami oraz przerwami w komunikacji. Szczegółowa analiza przerw w łączności, występujących podczas procesu przełączania dla zgromadzonych danych, została zaprezentowana na Rys. 3.38 w postaci dystrybuanty empirycznej czasu przełączania. Analiza teoretyczna wykorzystanego rozwiązania pokazała silną zależność przerw w łączności od czasu transmisji danych pomiędzy elementami MAG i węzłem mobilnym, czasu przekazywania pakietu pomiędzy elementem LMA i odpowiednim elementem MAG połączonym ze stacją bazową rozważanej techniki transmisji oraz czasy realizacji wewnętrznych operacji w elemencie MAG. W związku z powyższym, przy jednakowych opóźnieniach pomiędzy LMA oraz elementami MAG przerwa w łączności będzie w dużej mierze zależała od analizowanej techniki transmisji, do której następuje przełączenie. Ponieważ rozważane rozwiązanie jest implementacją miękkiego przełączania, obecnie wykorzystywane łącze ma niewielki wpływ na czas realizacji samego przełączania. W przebadanych scenariuszach testowych dla przełączeń na następujące techniki transmisji: WiMAX, Wi-Fi, LTE otrzymano średnie wartości czasu przełączania odpowiednio równe  $0,036 \pm 0,04$  s,  $0,037 \pm 0,071$  s,  $0,104 \pm 0,106$  s. We wszystkich przypadkach, do weryfikacji wyników, wykorzystano 90% przedziały ufności.

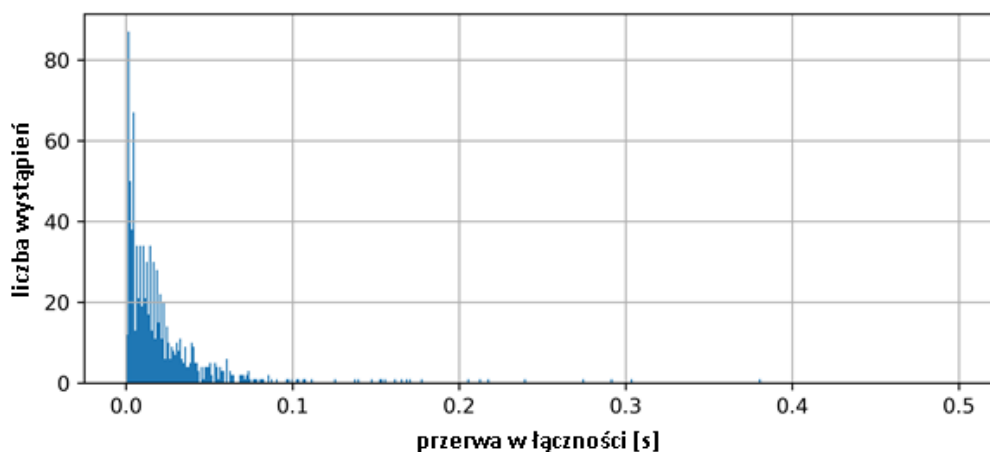


Rys. 3.38 Dystrybuanta empiryczna przerwy w łączności dla analizowanych przełączeń

Analizowane środowisko, realizowane przy współpracy z lokalnym operatorem TK Chopin [189], odzwierciedla praktyczne wdrożenie systemu netBaltic w architekturze wirtualnego operatora systemu komórkowego (por. Rys. 3.35). We wdrożeniu tym, dodatkowy narzut wprowadzały, zastosowane w systemie testowym, mechanizmy tunelowania dające praktyczną możliwość realizacji łączności w warstwie łącza danych pomiędzy elementem MAG i węzłem systemu. Największe opóźnienia występowały dla łącza systemu LTE, co spowodowane było koniecznością tunelowania ruchu już od modemu sieci komórkowej, czyli również przez łącze radiowe. W przypadku sieci Wi-Fi oraz WiMAX tunelowaniu podlegał ruch jedynie w sieci przewodowej, czyli od stacji bazowej (ew. punktu dostępowego) do elementów systemu netBaltic.

Opisywane tym punkcie przerwy łączności były wynikiem działania mechanizmów obsługi mobilności wdrożonych w środowisku testowym systemu netBaltic. Jak zostało to jednak opisane już w Rozdziale 2., w związku z bardzo specyficznym środowiskiem pracy systemów łączności na morzu, podobne przerwy w możliwości transmisji danych mogą występować w wyniku ruchu jednostek pływających czy zmieniających się warunków

propagacyjnych. Starając się odnieść wartości czasów przerw wynikających z przełączania oraz tych, które są specyficzne do środowiska morskiego, na Rys. 3.39 zaprezentowano histogram takich przerw dla łączności realizowanej z wykorzystaniem techniki TDMA, w paśmie 5,8 GHz dla spokojnego morza na dystansie 14 km. Widać, że zaproponowane rozwiązania obsługi mobilności wprowadzają przerwy w transmisji porównywalne (zwłaszcza dla Wi-Fi i WiMAX) z przerwami obserwowanymi dla takich łączności.



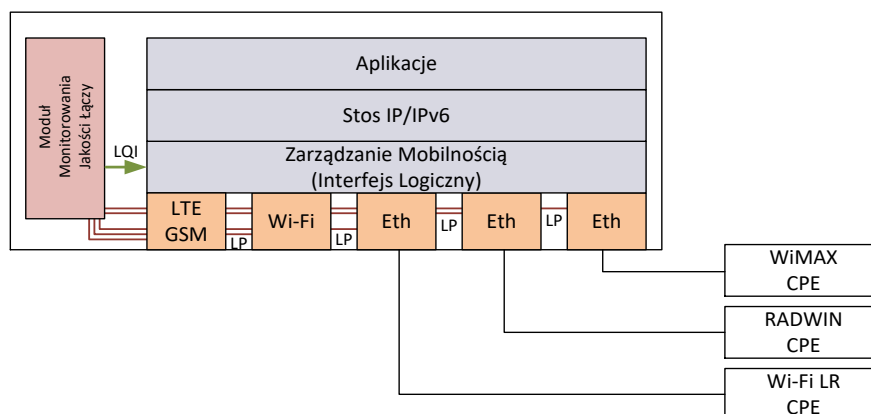
Rys. 3.39 Histogram przerw w transmisji danych dla łączności ląd - R/V Oceania (odległość 14 km, TDMA 5.8 GHz, spokojne morze)

### 3.7 ZASTOSOWANIE PROPONOWANEGO ROZWIĄZANIA W SYSTEMIE NETBALTIC

Zaproponowany w poprzednim podrozdziale schemat obsługi mobilności terminala LISH został wykorzystany w systemie szerokopasmowej komunikacji na morzu opracowanym w ramach projektu netBaltic [15] [22]. Możliwość zastosowania interfejsu logicznego, korzyści wynikające ze skrócenia czasu przełączania, czy redukcji narzutu tunelowania względem innych rozwiązań spowodowały, że rozwiązanie to stało się istotnym elementem systemu heterogenicznej szerokopasmowej komunikacji na morzu, adresując problem przełączania w strefie A oraz usprawniając mechanizmy sieci wieloskokowej w strefie B.

Z punktu widzenia architektury systemu netBaltic, opisanego w Rozdziale 2., w stosie sieciowym węzła systemu powinny zostać dodane dwa dedykowane moduły pozwalające na wykorzystanie wielu interfejsów bezprzewodowych różnych technik

transmisji. W tym celu niezbędne było wprowadzenie dodatkowych modułów funkcjonalnych, w tym: *Modułu Zarządzania Mobilnością* (MZM) oraz *Modułu Monitorowania Jakości Łączy* (MMJŁ), które zostały zaprezentowane na Rys. 3.41.



**Rys. 3.40** Architektura stosu sieciowego węzła systemu dla mechanizmów obsługi mobilności zaproponowanych w systemie netBaltic

Moduł Zarządzania Mobilnością odpowiedzialny jest za implementację zaproponowanych i opisanych w poprzednim punkcie rozdziału mechanizmów obsługi interfejsu logicznego zapewniających ciągłość transmisji przy zmianie punktu podłączenia do sieci. Pozwala on, w sposób transparentny dla wyższych warstw stosu sieciowego i niezauważalny dla pracujących w węźle aplikacji, na realizację przełączania na wybraną technikę transmisji. Ponieważ dane przesyłane z wyższych warstw (warstw aplikacyjnych) trafiają do interfejsu logicznego, pojawia się potrzeba odpowiedniego przekierowania i przekazania pakietów do właściwego interfejsu fizycznego zgodnie z obowiązującymi założeniami oraz warunkami panującymi w sieci.

Wybór odpowiedniej w danym momencie techniki transmisji jest istotnym zadaniem pojawiającym się po stronie węzła systemu netBaltic. Każda z wykorzystywanych w tym systemie technik transmisji może cechować się zróżnicowanym zestawem parametrów opisujących jakość sygnału oraz dodatkowymi czynnikami, które wpływają na jakość transmisji. W związku z tym niezbędny jest dodatkowy element pozwalający na realizację dodatkowych pomiarów, tak aby można było porównywać ich aktualną jakość. Elementem odpowiedzialnym za realizację zadania zbierania paramentów dostępnych technik transmisji oraz wybór nowego łącza jest Moduł Monitorowania Jakości Łączy.



Komunikacja pomiędzy modułami węzła w systemie netBaltic w postaci API powinna zapewniać możliwość dostarczania informacji o szacowanej jakości połączenia do dostępnych w obrębie węzła interfejsów fizycznych. W celu możliwie pełnej wymiany danych pomiędzy modułami Modułu Zarządzania Mobilnością do Modułu Monitorowania Jakości Łączy zdefiniowano szereg wiadomości, które pozwalają na ustalenie dostępnych interfejsów oraz komunikację przekazującą informację o parametrach połączeń [15].

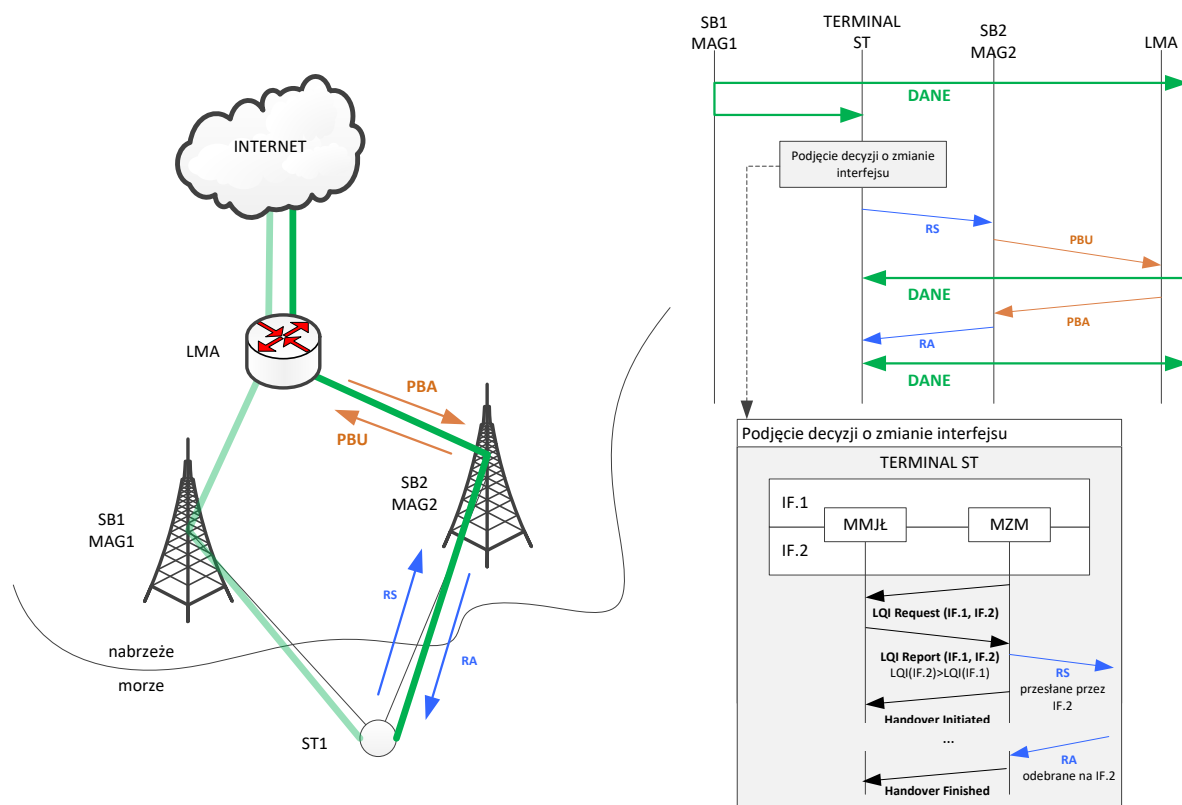
### 3.7.1 Obsługiwane scenariusze przełączania

Spojrzenie na obsługę mobilności w heterogenicznym systemie komunikacji na morzu implementowanym w projekcie netBaltic jest szerokie i nie ogranicza się jedynie do standardowego wyboru łącza, które oczywiście jest istotne i stanowi podstawowy scenariusz wykorzystania opisywanych mechanizmów. Wdrożenie opisywanych mechanizmów pozwala również na zmianę topologii drzewa transmisji w łączności wieloskokowej.

Na Rys. 3.41 zaprezentowano schemat wymiany wiadomości dla scenariusza uwzględniającego wykorzystanie interfejsu logicznego w celu zwiększenia efektywności przełączania w Proxy Mobile IPv6.

Po podjęciu decyzji przez mechanizmy Modułu Oceny Jakości Łączy o przełączeniu do wybranej techniki transmisji (np. w wyniku wymiany wiadomości *LQI Request-LQI Report*) Moduł Zarządzania Mobilnością przesyła wiadomość *Router Solicitation (RS)* poprzez interfejs nowej techniki transmisji do elementu MAG z architektury systemu PMIPv6. Odebranie wiadomości RS rozpoczyna procedurę przełączania w warstwie L3 bazując na zmodyfikowanym schemacie Proxy Mobile IPv6 (zgodnym z LISH). W tym momencie Moduł Zarządzania Mobilnością przesyła informacje o rozpoczęciu procedury przełączania do Modułu Monitorowania Jakości Łączy. Należy zauważyć, że korzystając z interfejsu logicznego pojawia się konieczność modyfikacji standardowych procedur systemu PMIPv6, polegających na rozszerzeniu możliwości bazy powiązań (*Binding Cache*), w szczególności opisanych we wcześniejszej części pracy. W proponowanym rozwiązaniu niezbędna jest możliwość pobrania wpisu dotyczącego rozważanego powiązania (*Binding Cache Entry*) niezależnie od wykorzystywanego interfejsu fizycznego należącego do tego samego interfejsu logicznego. Wiadomość *Proxy Binding Acknowledgment* nie wymaga w tym procesie dodatkowych modyfikacji i jest ona

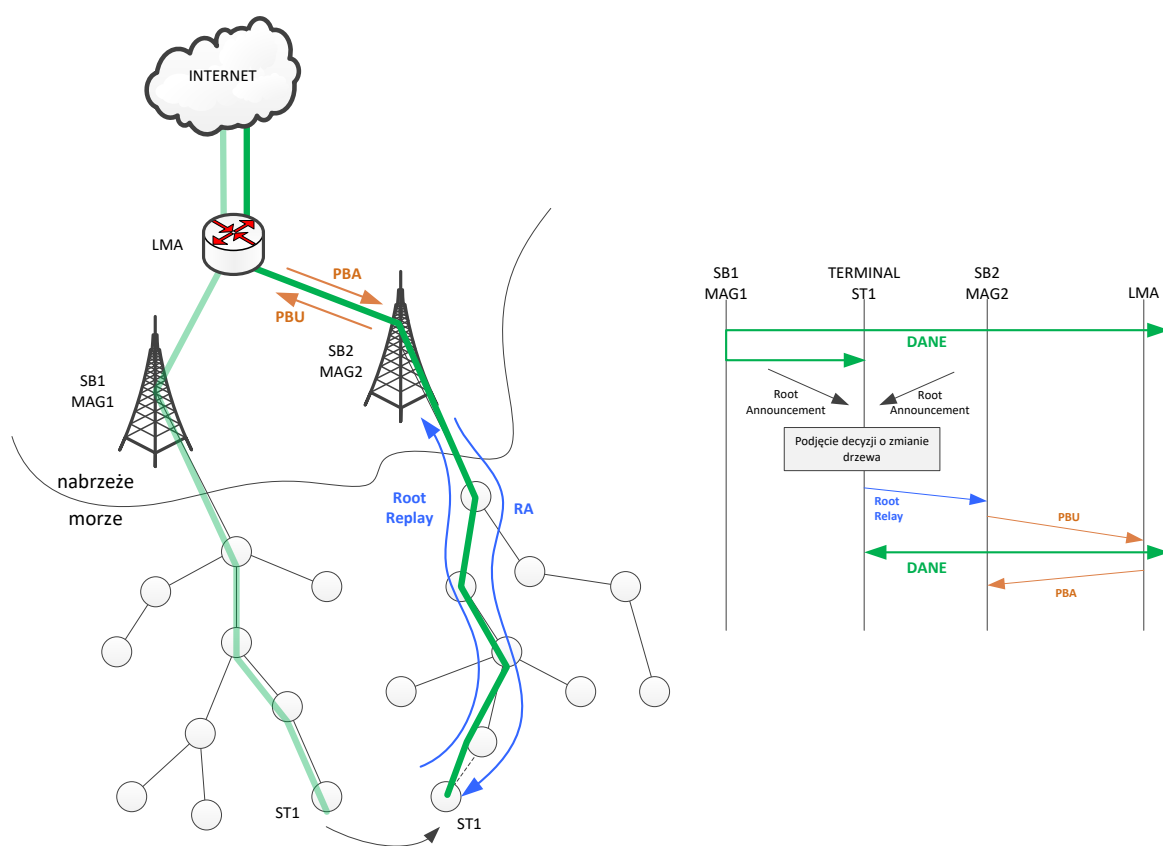
identyczna jak w standardowym schemacie przełączania PMIPv6. W omawianym przykładzie, po otrzymaniu na interfejsie pomocniczym wiadomości *Router Advertisement* (RA), Moduł Zarządzania Mobilnością realizuje zmianę w powiązaniu interfejsów – interfejs, na którym odebrano wiadomość RA (zakończono z powodzeniem procedurę przełączania w warstwie L3) od tego momentu pracuje jako interfejs bazowy, a pozostałe interfejsy pełnią funkcję interfejsów pomocniczych. Wiadomość RA nie dostarcza do węzła danych związanych z adresacją, która w proponowanych rozwiązaniach jest przypisana do węzła statycznie na etapie jego dołączenia do systemu, co w szczególności zostało opisane w artykule [177]. Informacja o zakończeniu procedury przełączania sygnalizowana jest do modułu Monitorowania Jakości Łączny z wykorzystaniem wiadomości *Handover Finished*.



Rys. 3.41 Scenariusz obsługi mobilności przy zmianie techniki transmisji

Drugi z omawianych przypadków (Rys. 3.42) przedstawia scenariusz zmiany wykorzystywanego do wieloskokowej transmisji danych drzewa z korzeniem w stacji bazowej. Zagadnienia związane ze szczegółami ustalania struktury takiego drzewa zostały opisane w artykule [92]. Z punktu widzenia implementacji mechanizmów zarządzania

mobilnością istotna jest konieczność obsługi zmiany punktu podłączenia w postaci zmiany korzenia drzewa sieci w sieci kratowej strefy B. W systemie netBaltic zastosowano protokół routingu pozwalający na tworzenie drzewiastych struktur (*Tree-Based Routing – TBR*), których korzenie kolokowane są z elementami MAG. Okresowo, każdy z korzeni rozsyła wiadomość *Root Announcement*, przekazywaną poprzez poszczególne węzły systemu dalej, w głąb drzewa. Po odebraniu wiadomości *Root Announcement* węzeł systemu ma możliwość zmiany aktualnie wykorzystywanego drzewa na inne, przesyłając do wybranego korzenia wiadomość *Root Replay*.



**Rys. 3.42** Scenariusz obsługi mobilności przy zmianie ścieżki w sieci typu mesh

W omawianym przypadku scenariusz przełączenia będzie inicjowany przez odebranie wiadomości *Root Replay* w elemencie MAG. Pierwotnie, w rozwiązaniach spotykanych do tej pory, nie było to elementem mechanizmów zarządzania mobilnością, a jedynie standardowych mechanizmów ustalania ścieżki transmisji danych w sieciach kratowych. Przesyłana poprzez sieć kratową wiadomość *Root Replay* ustala w węzłach pośredniczących trasę przekazywania wiadomości pomiędzy korzeniem i węzłem

końcowym. Do poprawnej wymiany danych z węzłami korespondującymi niezbędna jest realizacja scenariusza przełączania rozszerzającego schemat PMIPv6. W tym przypadku (Rys. 3.42) zmiany, już po wykryciu przełączania, są mniej widoczne niż w pierwszym z opisanych scenariuszy. Przy ścisłej integracji bramy strefy B systemu i elementu MAG, można pominąć uwierzytelnienie w tej warstwie. Analogiczna procedura zostanie przeprowadzona przez mechanizmy opracowane na potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa systemu [177]. Po odebraniu przez element MAG wiadomości *Root Replay* przesyłana jest wiadomość PBU zawierająca identyfikator obsługiwanego węzła – można w tym wypadku zastosować standardowe pole *Mobile Node Identifier* [105]. Do poprawnej komunikacji niezbędne pozostaje jeszcze przekonfigurowanie tunelu pomiędzy LMA i MAG przesyłającego dane użytkownika.

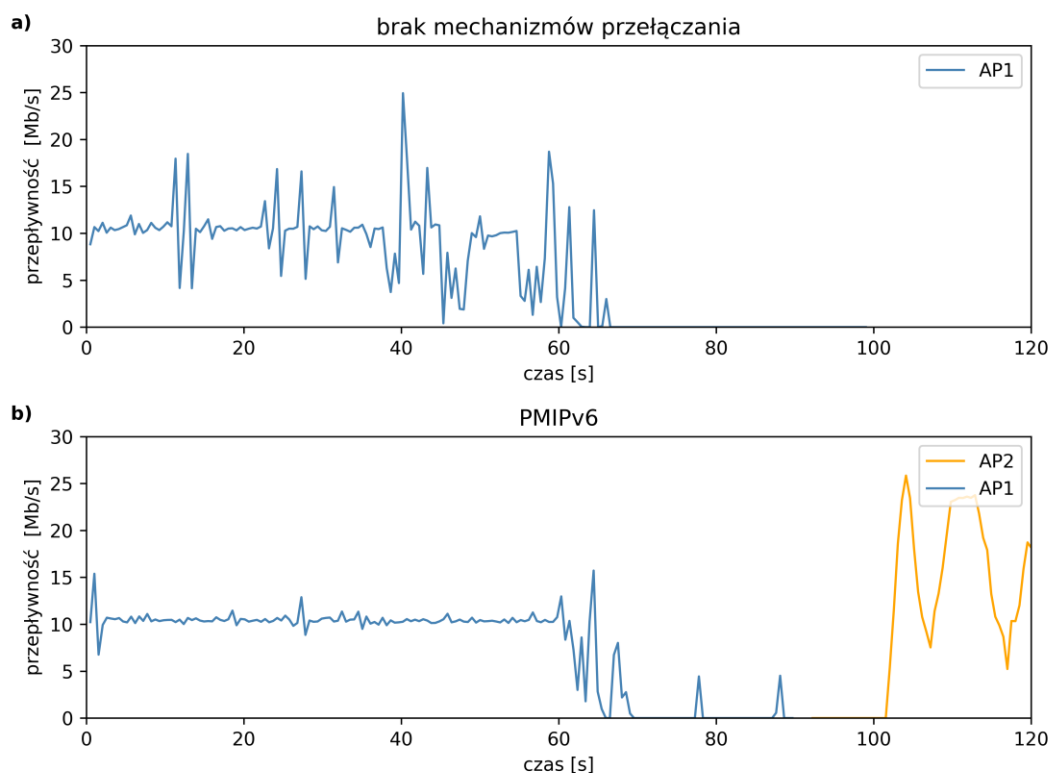
### **3.8 INTEGRACJA I WERYFIKACJA DZIAŁANIA PROPONOWANYCH ROZWIĄZAŃ**

Istota zastosowania efektywnych mechanizmów zarządzania mobilnością uwidacznia się w przypadku analizy ich wpływu na transmisję danych w warstwie transportowej. Przerwa w transmisji danych związana z przełączaniem rzutuje na jakość i efektywność dostarczania danych. W przypadku protokołów bezpołączeniowych takich jak UDP (*User Datagram Protocol*), czy ICMP (*Internet Control Message Protocol*) w zależności od intensywności strumienia datagramów bezpośrednio będzie się ona przekładała na utratę części z przesyłanych danych. Jednak w przypadku protokołów połączeniowych (np. TCP) ten problem jest dużo bardziej złożony, a przerwa w transmisji może rzutować na wydłużenie czasu dostarczenia części segmentów, również tych transmitowanych po zakończeniu przerwy w łączności.

Brak odpowiednich mechanizmów obsługi mobilności węzłów może doprowadzić do przerw w możliwości realizacji skutecznej transmisji danych. Przykłady takich scenariuszy zostały zaprezentowane na Rys. 3.43, gdzie na wykresie a) zobrazowano zerwanie połączenia TCP dla węzła bez zaimplementowanych mechanizmów zarządzania mobilnością, który po wyjściu z zasięgu sieci obsługiwanego przez AP1 nie miał możliwości kontynuowania sesji TCP. Drugi z pokazanych scenariuszy uwzględnia zastosowanie standardowego rozwiązania PMIPv6, bez wprowadzanych metod pozwalających na skrócenie czasu realizacji przełączania. W tym przypadku przełączenie do sieci

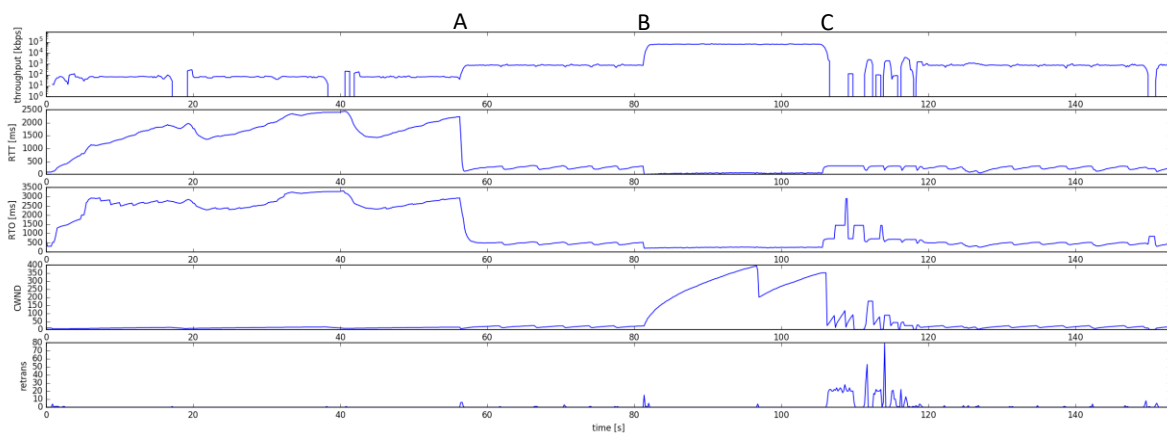
obsługiwanej przez AP2 następowało po zerwaniu połączenia z AP1, co znacznie wydłużyło przerwę w możliwości transmisji danych.

Na efektywność przełączania, jak zostało to wskazane w poprzednich punktach rozdziału, wpływa również odpowiedni wybór docelowej sieci, do której realizowane będzie przełączenie. Analiza zachowania połączenia TCP w trakcie realizacji przełączania pomiędzy różnymi sieciami, dla dwóch algorytmów unikania przeciążenia newReno oraz Cubic, została zilustrowana na Rys. 3.44 i Rys. 3.45. Prezentują one odpowiednio przełączenia pomiędzy różnymi technikami transmisji. W celu zobrazowania opisywanych zjawisk wybrane zostały rozwiązania o zróżnicowanych możliwościach: D-STAR (rozwiązanie radioamatorskie, pracujące w paśmie 1,2 GHz, pozwalające na transmisję danych pakietowych), WiMAX (cechujące się relatywnie średnią przepustowością względem pozostałych technik transmisji), Wi-Fi (skonfigurowane tak, aby wśród analizowanych systemów bezprzewodowych oferować największą przepustowość). Momenty kolejnych przełączeń zaznaczono odpowiednio literami A, B i C, wskazującymi na przełączenie z sieci D-STAR do sieci WiMAX, z sieci WiMAX do sieci Wi-Fi oraz z sieci Wi-Fi do sieci WiMAX.

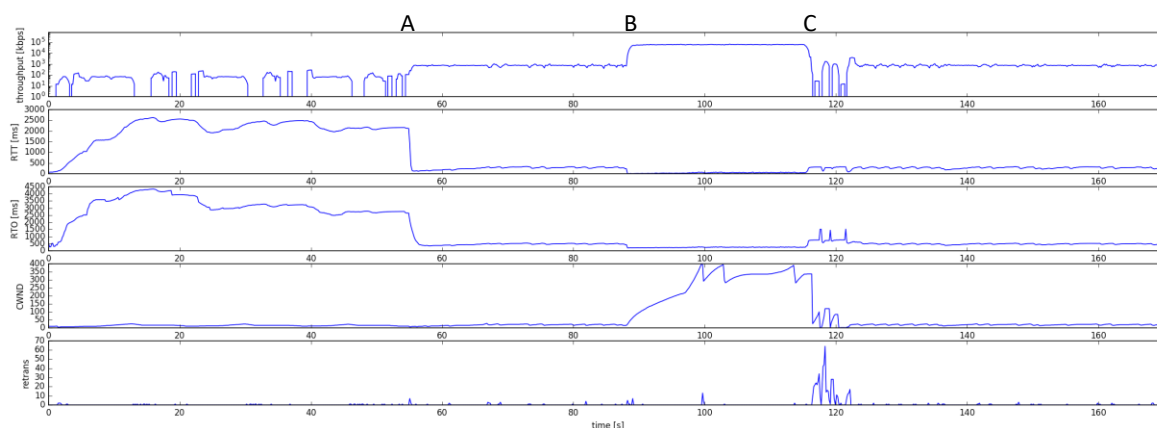


Rys. 3.43 Przepływność połączenia TCP w trakcie wychodzenia z zasięgu sieci bezprzewodowe przy a) braku mechanizmów zarządzania mobilnością; b) standardowej implementacji PMIPv6

W obu analizowanych scenariuszach widoczne jest zwiększenie przepływności połączenia testowego w przypadku przełączenia z sieci o gorszych parametrach do sieci o większej przepustowości. Znaczenie dobrego wyboru łącza w procesie decyzyjnym, pokazano na przykładzie przełączenia zaznaczonego na wykresie jako punkt C – przełączenie z sieci Wi-Fi do sieci WiMAX. W tym przypadku nastąpiło przełączenie z sieci oferującej dużą przepustowość na łącze o znacznie mniejszych możliwościach, czego rezultatem była konieczność zmniejszenia rozmiaru okna nadawczego CWND (*congestion window CWND*) oraz nagły skok wartości RTT. Analizując charakterystykę parametrów połączenia TCP, po przeprowadzeniu omawianego przełączenia można zaobserwować istotne pogorszenie efektywności transmisji danych trwające, w zależności od analizowanego wariantu protokołu TCP, kilkanaście (por. Rys. 3.45) lub kilkadziesiąt sekund (por. Rys. 3.44). Różnice w czasie dostosowania przepływności połączenia do przepustowości sieci dla analizowanych wariantów algorytmów przeciążenia sieci wynikają z zastosowania różnych funkcji określających szerokość okna nadawczego.

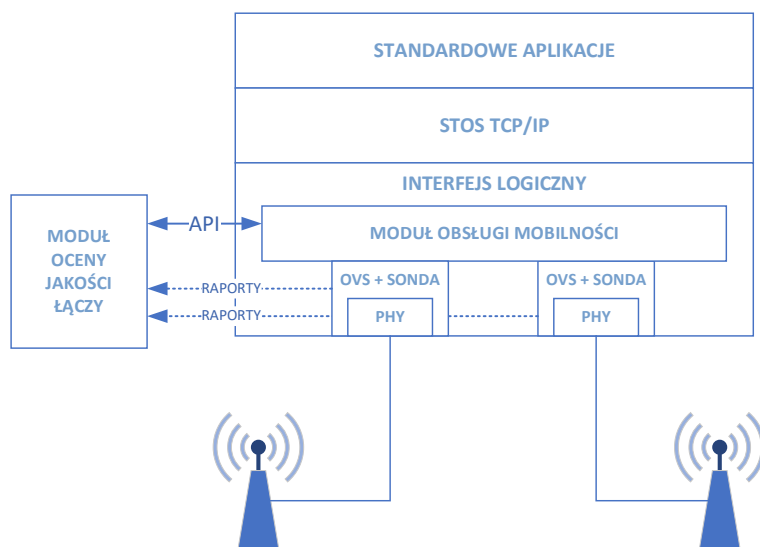


**Rys. 3.44** Analiza parametrów połączenia TCP dla algorytmu New Reno w trakcie przełączania pomiędzy różnymi technikami transmisji



**Rys. 3.45** Analiza parametrów połączenia TCP dla algorytmu Cubic w trakcie przełączania pomiędzy różnymi technikami transmisji

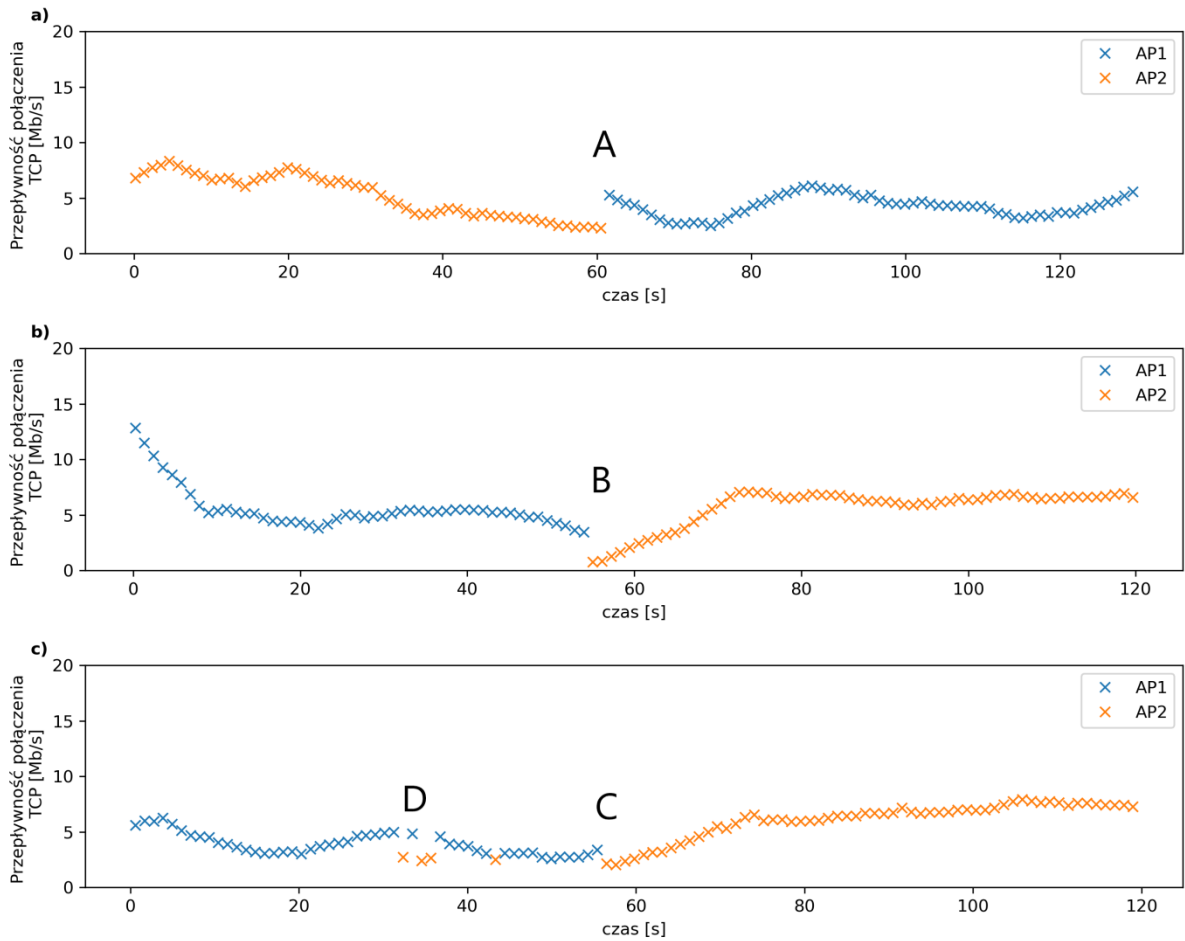
Uniknięcie opisanych i zaprezentowanych na poprzednich rysunkach problemów możliwe jest dzięki zastosowaniu opracowanych przez autora rozprawy rozwiązań. Integracja zaproponowanej metody wyboru łącza z mechanizmem przełączania LISH została zrealizowana z wykorzystaniem stanowiska badawczego zaprezentowanego na Rys. 3.46. W trakcie przeprowadzonych testów wykorzystano urządzenia Mikrotik konfigurując jedno z łączy do pracy w paśmie 2,4 GHz a drugie 5 GHz. Interfejs logiczny stanowiący trzon zaproponowanego mechanizmu realizacji przełączania został połączony z fizycznymi interfejsami przy pomocy instancji przełącznika programowalnego Open vSwitch [190]. Pozwoliło to na podłączenie do tych interfejsów aplikacji realizujących pomiary strat pakietów oraz RTT (opisane w podrozdziale 3.5). Zgromadzone dane przekazywane były do autorskiej implementacji Modułu Oceny Jakości Łącza, w której wykorzystano wytrenowaną na danych symulacyjnych sieć neuronową (wariant SDL-LEM).



Rys. 3.46 Architektura węzła klienckiego wykorzystanego w ramach testów integracyjnych

Przykładowe wyniki w postaci średniej wartości przepływności połączenia TCP wyznaczanej dla kolejnych sekund trwania połączeń testowych, ilustrujące zalety zaproponowanych rozwiązań zostały zaprezentowane na Rys. 3.47. W trakcie testów terminal mobilny przemieszczany był na trasie częściowo znajdującej się w zasięgu obu podłączonych sieci bezprzewodowych, a docelowa sieć wskazywana była przez implementację SDL-LEM ( $M=4$ ). Punktami A, B i C zaznaczono momenty przełączania wynikające w poprawnego wskazania nowej sieci. W żadnym z tych przypadków nie zaobserwowano znaczącej przerwy w możliwości transmisji danych. Połączenia były kontynuowane po przełączeniu do nowego punktu dostępowego i zmianie interfejsu. Kolejną zaletę wynikającą z wdrożenia opracowanych przez autora rozprawy metod pokazano na Rys. 3.47 c) w obszarze zaznaczonym literą D. Widoczna jest tutaj pewna fluktuacja wskazań realizowanych przez metodę SDL-LEM, prowadząca do częstego przełączania pomiędzy dostępnymi sieci. Zastosowanie procedury obsługi mobilności węzłów zgodnej z zaproponowanym schematem LISH znacząco skracającej czas potrzeby na realizację przełączenia i pozwala na minimalizację wpływu tego zjawiska na efektywność transmisji danych.





**Rys. 3.47** Ilustracyjne wyniki działania zintegrowanych mechanizmów wyboru łącza i realizacji przełączenia

Przedstawione wykresy pokazują, jak ważne jest całościowe podejście do problemu zarządzania mobilnością węzłów w sieciach heterogenicznych. Istotne w takim przypadku, będą zarówno rozwiązania pozwalające na minimalizację czasu realizacji przełączenia (często wprost powodujące przerwę w transmisji danych) oraz mechanizmy wspomagające podjęcie decyzji o czasie przełączenia i docelowej sieci. Takie szerokie podejście zostało zaprezentowane przez autora rozprawy.



## 4 KODOWANIE SIECIOWE W ARCHITEKTURZE MECHANIZMÓW ZARZĄDZANIA MOBILNOŚCIĄ JAKO METODA POPRAWY JAKOŚCI TRANSMISJI

---

W Rozdziale 3 wykazano korzyści płynące z możliwości wykorzystania wielu interfejsów, różnych technik transmisji, które przy zastosowaniu proponowanych rozwiązań wyboru łącza i mechanizmów przełączania pozwalają na wskazanie łącza oferującego najlepszą przepustowość oraz skrócenie przerw w łączności wynikających ze zmiany interfejsu. W mechanizmach tych zakładano powszechnie przyjęty scenariusz, w którym transmisja danych użytkownika realizowana jest z wykorzystaniem tylko jednego interfejsu. Pojawia się jednak pytanie, czy możliwe jest wykorzystanie większej liczby interfejsów równocześnie i jak wpływałoby to na poprawę efektywności komunikacji.

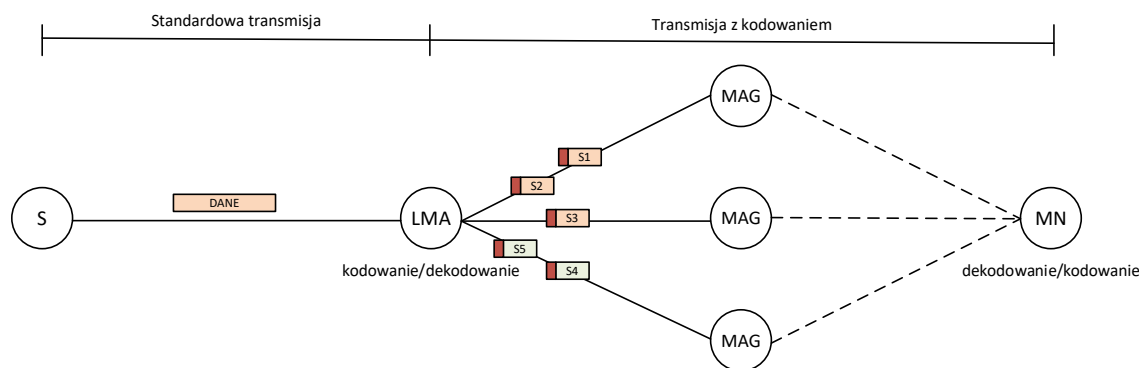
Analiza dostępnych rozwiązań wskazuje, że często nie są one dostosowane do zastosowania w rozważanym środowisku. W przypadku węzłów, które są bezpośrednio połączone do więcej niż jednej sieci dostępowej, i które wykorzystują w tym celu więcej niż jeden interfejs (konfiguracja nazywana multihoming [191] [192]), zastosowanie może mieć rozwiązanie flow-mobility [193] [194] [195], czyli wyznaczanie różnych ścieżek dla różnych strumieni danych przesyłanych pomiędzy terminalem mobilnym a węzłami korespondującymi. Jednak w scenariuszu rozważanym w rozprawie – systemie komunikacji na morzu, niejednokrotnie stacje robocze oraz elementy sieci wewnętrznych jednostek pływających będą podpięte do sieci jednym interfejsem, a router wyjściowy z sieci statku będzie dysponował większą liczbą łączy. Nie ma zatem możliwości wysyłania bezpośrednio do i ze stacji klienckiej strumieni różnymi ścieżkami, a rozwiązanie to nie ma zastosowania do rozważanego systemu.

Podobna sytuacja ma miejsce dla komunikacji z wykorzystaniem kilku łączy realizowanej przy zastosowaniu mechanizmów ulokowanych w warstwie transportowej, wprowadzających możliwość skorzystania z kilku adresów IP. Zaliczyć do nich można stosowany od wielu lat protokół *Stream Control Transmission Protocol* – SCTP [196] [197], czy zyskujący ostatnio dużą popularność *MultiPath TCP* – MPTCP [198] [199] oraz pojawiające się propozycje wielościeżkowego wariantu protokołu QUIC [200] [201]. W każdym z tych przypadków komunikacja realizowana jest end-to-end, co nie pozwala na bezpośrednie zastosowanie tych mechanizmów na jednostkach pływających.

W rozprawie zaproponowano inne podejście, w którym łącza wykorzystywane będą jednocześnie na potrzeby transmisji fragmentów poszczególnych pakietów poddawanych specjalnej procedurze kodowania. W niniejszym rozdziale opisane zostało zagadnienie zastosowania kodowania sieciowego, przedstawiono model przepływności wykorzystany w analizie efektywności opracowanej metody oraz dwa algorytmy wspomagające kodowanie, które pozwalają na poprawę efektywności transmisji danych z wykorzystaniem protokołu TCP.

#### 4.1 KODOWANIE SIECIOWE

Pojęcie kodowania sieciowego – *network coding*, jest szerokie i nie do końca jednoznacznie zdefiniowane. Za pionierską pracę uznaje się [202], w której podano bardzo ogólną definicję kodowania sieciowego jako kodowania realizowanego w węźle sieci („[...] *we will refer to coding at a node in a network as network coding*”). Tak ogólne spojrzenie na kodowanie sieciowe wprowadza pewnego rodzaju niejednoznaczność. Kwestia ta jest dosyć istotnie zaznaczona w książce [203], w której jako definicję kodowania sieciowego przyjęto kodowanie w sieci o pakietowej transmisji danych realizowane powyżej warstwy fizycznej („[...] *network coding [...] is coding at a node in a packet network (where data is divided into packets and network coding is applied to the contents of packets), or more generally, coding above the physical layer*”). W niniejszej rozprawie przyjęto podobne założenia i definicję kodowania sieciowego. Model sieci, w którym zaproponowane mechanizmy kodowania będą analizowane, został zaprezentowany na Rys. 4.1. Jest to zobrazowanie architektury opisanej w poprzednim rozdziale z zaznaczeniem w szczególności tych elementów, które pełnią istotną funkcję w mechanizmach opisanych w dalszej części rozdziału. W proponowanym zastosowaniu nadmiarowość wprowadzana przez kodowanie dotyczy głównie części sieci bezprzewodowej łączącej element LMA poprzez elementy MAG z węzłem systemu odgrywającym rolę routera w sieci wewnętrznej (łącze bezprzewodowe zaznaczono przerywaną linią na Rys. 4.1). Jest to miejsce, w którym spodziewać się można łączy o słabych parametrach – dużych stratach i opóźnieniach.



Rys. 4.1 Model rozważanej sieci i ulokowanie mechanizmów kodowania/dekodowania

W przeprowadzonej w dalszej części rozdziału analizie, ocenie poddano kodowanie z wykorzystaniem kodu RaptorQ [204]. Chociaż powszechnie jest on wykorzystywany jako kod typu FEC (*Forward Error Correction*) [205] albo kod stosowany na poziomie aplikacji [206], a w wielu pracach dotyczących kodowania sieciowego analizuje się głównie rozwiązania klasy RLNC (*Random Linear Network Codes*), mając jednak na uwadze praktyczne ukierunkowanie przeprowadzonych prac, autor rozprawy zdecydował się skupić uwagę na rozwiązaniu powszechnie przyjętym i zestandaryzowanym (RFC6330 [204]), posiadającym wsparcie sprzętowe [206] [207] oraz przebadanym pod kątem czasu potrzebnego na realizację kodowania i dekodowania [208] [209]. Przedstawiona architektura pokazuje również, że w związku ze stosowaniem kodowania w niezależnych łączach, w przewidywanym rozwiązaniu nie będzie realizowane rekodowanie (mieszanie odebranych pakietów i na ich podstawie generowanie nowych pakietów pośrednich), którego zastosowanie mogłoby być cechą przeważającą na korzyść RLNC [210]. Większą efektywność komunikacji przy zastosowaniu kodów Raptor (poprzednik RaptorQ) nad RLNC przy braku rekodowania potwierdziły wyniki pokazane w [211]. Przedstawiona tam analiza proponuje schemat zastosowania kodu RaptorQ, ale nie jest bezpośrednio z nim związana i kod ten może zostać zastąpiony w przyszłości innym rodzajem kodowania – podobna idea została przedstawiona w strukturze ramowej architektury Fulcrum [212] [213] [214].

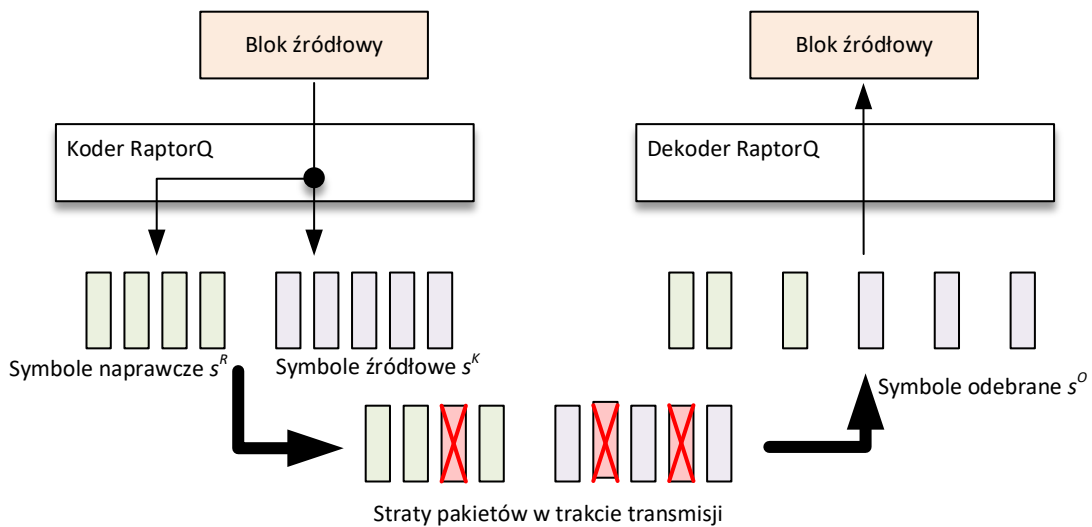
RaptorQ jest kodem blokowym, który operuje na segmentach danych o równym rozmiarze, zwanych symbolami źródłowymi. Rozmiar bloku oraz rozmiar symbolu źródłowego są konfigurowane, a w przypadku takiej potrzeby, stosowane jest uzupełnienie danych (*padding*) dostosowujące rozmiar danych wejściowych. Koder RaptorQ, na

podstawie symboli źródłowych, generuje symbole naprawcze o takim samym rozmiarze co symbole źródłowe. Kod RaptorQ jest implementacją kodu fontannowego (*fountain codes* [215]) z potencjalnie nieograniczoną sekwencją symboli kodujących, z których odbiór dowolnych  $s^K$  lub więcej symboli kodujących umożliwia odkodowanie bloku źródłowego z określonym od góry prawdopodobieństwem. W praktyce prawdopodobieństwo to jest często niższe, ale nie powinno być gorsze niż to określone zależnością (4.1). Zgodnie z dostępnymi analizami, prawdopodobieństwo błędu dekodowania będzie zależało od liczby odebranych symboli i dla  $s^N < s^K$  wynosi 1, a w pozostałych przypadkach może być określone wzorem [205]:

$$p_{bd}(s^o, s^k) = 0,01 * 0,01^{s^o - s^k} \quad (4.1)$$

Schemat wykorzystania kodowania fontannowego zakłada przesyłanie kolejnych symboli, tak długo, aż nadawca otrzyma potwierdzenie odebrania wystarczającej liczby symboli pozwalającej na zdekodowanie bloku źródłowego. W praktyce koder może być uruchomiony z góry określoną konfiguracją opisującą liczbę symboli naprawczych, co pozwala uniknąć dodatkowej komunikacji pomiędzy nadawcą a odbiorcą. Pojawia się jednak możliwość wykorzystania adaptacyjnego sterowania nadmiarowością wprowadzaną na etapie kodowania, co zostało opisane i przeanalizowane w dalszej części pracy.

Zgodnie z dokumentem RFC 6330 [204] każdy zakodowany symbol powinien być wysyłany w osobnym pakiecie wraz z nagłówkiem o rozmiarze 32 bitów. Nagłówek ten nazywany jest FEC Payload ID (PID) i składa się z 8-bitowego identyfikatora bloku źródłowego i 24-bitowego identyfikatora zakodowanego symbolu, które razem pozwalają po stronie odbiorczej zidentyfikować zakodowany symbol. Dodatkowo niezbędne jest przekazanie pomiędzy koderem a dekerem informacji opisujących wybrany wariant użycia kodu RaptorQ - zapisywany w postaci nagłówków Object Transmission Information (OTI): Common FEC Object Transmission Information for RaptorQ FEC (zawierający rozmiar przekazywanego obiektu) oraz Scheme-Specific FEC Object Transmission Information (zawierający liczbę symboli źródłowych i podbloków) – w sumie nagłówki te mają rozmiar 96 bitów.



Rys. 4.2 Schemat dostarczania danych z wykorzystaniem kodu RaptorQ

Na Rys. 4.2 pokazano schemat dostarczania obiektów danych zabezpieczonych przed mogącymi wystąpić stratami z wykorzystaniem kodu RaptorQ. Ponieważ RaptorQ jest kodem systematycznym, widoczne jest dodanie symboli naprawczych do symboli źródłowych, które zawierają dane bloku źródłowego. Do każdego z symboli w procesie kodowania dodawane są pola PID i OTI oraz nagłówek IPv6. Jeżeli tylko straty w trakcie transmisji symboli nie spowodują, że do odbiorcy dotrze mniej niż  $s^K$  symboli, to będzie on w podjąć próbę zdekodowania odebranych danych.

W dalszej części rozdziału poddano ocenie analitycznej możliwość wykorzystania opisanego kodowania w dwóch wariantach: dla pojedynczego interfejsu, przez który transmitowany był cały ruch (rozszerzenie metody realizacji przełączania opisaną w Rozdziale 3.) oraz przy jednoczesnym wykorzystaniu wszystkich dostępnych interfejsów na podstawie dwóch zaproponowanych algorytmów. Przed przystąpieniem do omówienia tych propozycji opisano model przepływności połączeń TCP Cubic, który stanowił miarę pozwalającą na ocenę korzyści wynikających z zastosowania zaproponowanych rozwiązań.

## 4.2 MODEL TCP CUBIC Z WYKORZYSTANIEM PROCESU MARKOVA

Popularne od wielu lat warianty protokołu TCP, takie jak TCP-Reno [216], czy TCP-NewReno [217] [218] wykorzystują funkcję liniową do określenia wartości rozmiaru

okna nadawczego. W przypadku sieci, w których iloczyn minimalnej przepustowości i opóźnienia (*Bandwidth-Delay Product* – BDP) jest duży, wspomniane rozwiązania nie pozwalają na efektywne wykorzystanie możliwości takich sieci [219]. Jako sposób rozwiązania tego problemu zaproponowano rozszerzenie protokołu TCP [220], w którym przy uwzględnieniu aktualnej wartości rozmiaru okna nadawczego i czasu od poprzedniego zdarzenia utraty pakietu, wartość okna nadawczego zmieniana jest zgodnie z funkcją sześcienną, stąd też nazwa nowego wariantu – TCP Cubic. Funkcja ta pozwala na uzyskanie wypłaszczenia funkcji określającej rozmiar okna nadawczego w okolicach jego optymalnej wartości [227]. TCP Cubic został zaprojektowany, tak aby możliwe było sprawiedliwe współdzielenie zasobów sieci dla połączeń z różnymi wartościami RTT, przy czym stosunek między wartościami przepływności tych połączeń będzie odwrotnie proporcjonalny do stosunku czasów RTT obserwowanych dla każdego z nich [220]. W sieciach cechujących się mniejszymi wartościami BDP, TCP Cubic funkcjonuje podobnie jak standardowe rozwiązania TCP, osiągając porównywalne przepływności dla połączeń realizowanych przy jego pomocy. Jest to więc rozwiązanie uniwersalne, co z pewnością jest jednym z argumentów stojących za obserwowaną w ostatnim czasie rosnącą popularnością tego rozwiązania.

Analiza przepływności połączeń TCP możliwa jest poprzez zastosowanie modeli wykorzystujących proces Markova – rozwiązanie takie można spotkać w publikacjach: [221] [222] [223]. Model prezentowany w niniejszej pracy wykorzystuje metodę zaprezentowaną w [224], wprowadzając modyfikacje pozwalające zwiększyć dokładność szacowania przepływności połączeń w przypadku większej intensywności strat. Modyfikacja ta jest szczególnie istotna z punktu widzenia analizy proponowanych w pracy mechanizmów kodowania sieciowego, wprowadzonego na poziomie interfejsu logicznego.

Zgodnie z [224], rozmiar okna nadawczego  $w_{cwnd}$ , którego wartość będzie zależała od wartości rozmiaru okna tuż przed wystąpieniem utraty pakietu  $w_0$  oraz czasu, który upłynął od tego zdarzenia –  $t$ , może zostać określony zależnością:

$$w_{cwnd}(w_0, t) = \alpha \left( t - \sqrt[3]{\frac{x(1-\beta)}{\alpha}} \right)^3 + w_0 \quad (4.2)$$

gdzie, parametry  $\alpha$  i  $\beta$  oznaczają odpowiednio współczynnik zwiększenia i współczynnik zmniejszenia rozmiaru okna nadawczego. Szerokość tego okna w przypadku wystąpienia



utruty pakietu uwzględniającej zarówno straty będące następstwem błędów w transmisji, jaki i te wynikające z przeciążenia łącza, zredukowany jest poprzez wymnożenie przez  $\beta$  i od tej chwili wzrasta zgodnie z zależnością (4.2).

Przekształcając wyrażenie (4.2), tak aby otrzymać funkcję określającą czas potrzebny na zwiększenie rozmiaru okna nadawczego z wartości  $w_0$  do wartości  $w_y$  wyprowadzić można zależność:

$$t_{w_{cwna}}(w_0, w_y) = \sqrt[3]{\frac{y - w_0}{\alpha}} + \sqrt[3]{\frac{(1 - \beta)w_0}{\alpha}} \quad (4.3)$$

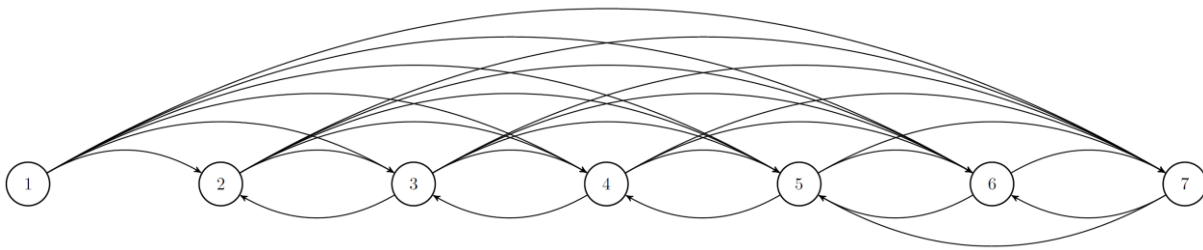
W prezentowanym modelu zakłada się występowanie  $N_M$  stanów, z których każdemu odpowiada przypadający na dany stan uśredniony rozmiar okna nadawczego. Przedział określający wartości rozmiaru okna nadawczego  $(0, W_{max}]$  podzielony został na  $N_M$  równych części,  $i$ -ty przedział (dla  $i \in [1, 2, \dots, N_M]$ ) dotyczy zakresu wartości okna nadawczego  $\left(\frac{(i-1)W_{max}}{N_M}, \frac{iW_{max}}{N_M}\right]$ , a uśredniony rozmiar okna nadawczego dla tego stanu będzie miał następującą wartość:

$$w_i = \frac{(i - 0.5)W_{max}}{N_M} \quad (4.4)$$

Przyjmijmy, że  $X_k$  oznacza stan, w którym znajduje się model w chwili  $k$ , czyli w momencie  $k$ -tej utraty pakietu. Jeżeli  $X_k = i$ , to model w  $k$ -tym kroku będzie w  $i$ -tym stanie z rzeczywistą wartością szerokości okna nadawczego  $x_k$  z zakresu  $\left(\frac{(i-1)W_{max}}{N_M}, \frac{iW_{max}}{N_M}\right]$ , uśrednioną do jednej wartości przypisanej do stanu, którą możemy wyrazić w postaci  $\tilde{x}_k = w_i$ . Jako że każdy stan opisywanego procesu odwzorowuje rozmiar okna nadawczego, to proces znajduje się w tym stanie, dopóki nie nastąpi utrata pakietu i wynikająca z tego redukcja rozmiaru okna nadawczego.

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości parametru  $N_M$ , maleje zakres wartości długości okna nadawczego przypadający na każdy ze stanów, a co za tym idzie, wzrasta dokładność opisywanego modelu, ale jednocześnie wzrasta złożoność obliczeniowa i czas potrzebny na wyznaczenie stanu ustalonego. Przykładowa wizualizacja grafu stanów dla modelu z  $N_M = 7$  została zaprezentowana na Rys. 4.3. Jest to jednak

wartość zapewniająca niewielką dokładność, a w dalszych obliczeniach i prezentowanej analizie przyjęto wartość  $N_M = 100$  (za [224]).



Rys. 4.3 Wizualizacja wykorzystywanego modelu dla parametrów  $\beta=0,75$ ,  $N_M=7$

Wizualizacja opisywanego modelu pokazuje dwa rodzaje przejść pomiędzy stanami, wynikające ze zwiększenia rozmiaru okna (strzałki w prawo – przejście ze stanu o mniejszym numerze do stanu o większym numerze) oraz związane z redukcją rozmiaru okna (strzałki w lewo – przejście ze stanu o większym numerze do stanu o mniejszym numerze). Część przejść pomiędzy niektórymi stanami nie jest możliwa, co wynika z definicji opisywanego modelu. Jeżeli w chwili  $k$  rozmiar okna nadawczego ma wartość  $w_i$ , to po wystąpieniu zdarzenia utraty pakietu następuje jego redukcja do  $\beta w_i$ . Dla stanu w chwili  $k+1$  oznaczonego przez  $j$  (czyli  $X_k=i$ ,  $X_{k+1}=j$ ), rozmiar okna nadawczego  $x_{k+1}$  będzie się zawierał w zakresie  $\left(\frac{(j-1)W_{max}}{N}, \frac{jW_{max}}{N}\right]$ , gdzie wartość ta nie może być mniejsza niż  $\beta w_i$ . W związku z czym przejście pomiędzy stanami  $i$  oraz  $j$  dla  $\frac{jW_{max}}{N} < \beta w_i$  nie jest możliwe. Co, po przywołaniu definicji  $w_i$  (wzór (4.4)), może zostać zapisane w następujący sposób:

$$P(X_{k+1} = j | X_k = i) = 0, \text{ jeżeli } j < \beta(i - 0.5) \quad (4.5)$$

Dla pozostałych przypadków, prawdopodobieństwo przejścia pomiędzy stanami  $i$  oraz  $j$  będzie zależało od czasu pomiędzy kolejnymi zdarzeniami utraty pakietu oznaczonego  $\tau_{loss}$ , dla którego można zapisać zależność:

$$\tau_{i,j}^{min} < \tau_{loss} < \tau_{i,j}^{max} \quad (4.6)$$

gdzie  $\tau_{i,j}^{min}$  oznacza minimalny czas dla przejścia pomiędzy stanami  $i$  oraz  $j$ , po którym rozmiar okna nadawczego osiągnie wartość  $\frac{(j-1)W_{max}}{N_M}$ . Wykorzystując definicję  $t_w(w_0, \gamma)$ ,  $\tau_{i,j}^{min}$  określone będzie jako:

$$\begin{aligned}\tau_{i,j}^{min} &= \mathcal{R}\left(t_w\left(w_i, \frac{(j-1)W_{max}}{N_M}\right)\right) \\ &= \mathcal{R}\left(\sqrt[3]{\frac{\frac{(j-1)W_{max}}{N_M} - w_i}{\alpha}} + \sqrt[3]{\frac{(1-\beta)w_i}{\alpha}}\right)\end{aligned}\quad (4.7)$$

gdzie  $\mathcal{R}$  definiujemy jako  $\mathcal{R}(x) = \max(x, 0)$ .

W analogiczny sposób może zostać zdefiniowany  $\tau_{i,j}^{max}$  jako maksymalny czas upływający do kolejnego zdarzenia utraty pakietu, po którym rozmiar okna nadawczego osiągnie wartość  $\frac{jW}{N_M}$ , czyli:

$$\begin{aligned}\tau_{i,j}^{max} &= \mathcal{R}\left(t_w\left(w_i, \frac{jW}{N_M}\right)\right) \\ &= \mathcal{R}\left(\sqrt[3]{\frac{\frac{jW}{N_M} - w_i}{\alpha}} + \sqrt[3]{\frac{(1-\beta)w_i}{\alpha}}\right)\end{aligned}\quad (4.8)$$

Prawdopodobieństwo przejścia pomiędzy stanami  $i$  oraz  $j$  dla  $j \geq \beta(i - 0.5) \wedge j \neq N_M$  może zostać przedstawione w następujący sposób:

$$P(X_{k+1} = j | X_k = i) = P(\tau_{i,j}^{min} < \tau_{loss} < \tau_{i,j}^{max}) \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned}
&= P \left( \mathcal{R} \left( \sqrt[3]{\frac{(j-1)W_{max} - w_i}{N_M \alpha}} + \sqrt[3]{\frac{(1-\beta)w_i}{\alpha}} \right) < \tau_{loss} \right. \\
&\quad \left. < R \left( \sqrt[3]{\frac{jW_{max} - w_i}{N_M \alpha}} + \sqrt[3]{\frac{(1-\beta)w_i}{\alpha}} \right) \right) \\
&= e^{-\lambda \mathcal{R} \left( \sqrt[3]{\frac{(j-1)W_{max} - w_i}{N_M \alpha}} + \sqrt[3]{\frac{(1-\beta)w_i}{\alpha}} \right)} - e^{-\lambda R \left( \sqrt[3]{\frac{jW_{max} - w_i}{N_M \alpha}} + \sqrt[3]{\frac{(1-\beta)w_i}{\alpha}} \right)}
\end{aligned}$$

Ponieważ maksymalny rozmiar okna nadawczego ograniczony jest od góry wartością  $W_{max}$ , dla  $j = N_M$ , przejście do stanu  $X_{k+1} = j$ , nie będzie bezpośrednio zależało od czasu wystąpienia zdarzenia kolejnej utraty pakietu, a może być zdefiniowane w następujący sposób:

$$P(X_{k+1} = N_M | X_k = i) = 1 - \sum_{j=1}^{N-1} P(X_{k+1} = j | X_k = i) \quad (4.10)$$

Rozkład stacjonarny prawdopodobieństwa poszczególnych stanów z przedstawionego modelu może zostać wyznaczony poprzez rozwiązanie zależności:

$$\forall j \in \{1, \dots, N\} : \sum_{i=1}^N \pi_i P(X_{k+1} = j | X_k = i) = \pi_j \quad (4.11)$$

$$\sum_{i=1}^N \pi_i = 1 \quad (4.12)$$

Dysponując prawdopodobieństwami poszczególnych stanów w stanie ustalonym modelu, można wyznaczyć średnią przepływność analizowanego połączenia. Wyznaczona w ten sposób średnia przepływność połączenia może być wyrażona wzorem:

$$\begin{aligned} \mathcal{J} & \quad (4.13) \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{r(t)}{t} \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{RTT} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \pi_i P(X_{k+1} = j | X_k = i) \int_0^{\tau_{i,j}} w_{cwnd}(w_i, t) dt}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \pi_i P(X_{k+1} = j | X_k = i) \tau_{i,j}} \end{aligned}$$

gdzie,  $\tau_{i,j}$  to średni czas potrzeby na przejście ze stanu  $i$  do stanu  $j$ , który przy wystarczająco dużych  $N_M$  [224], może zostać przybliżony w następujący sposób:

$$\tau_{i,j} \approx \mathcal{R} \left( t_w \left( w_i, \frac{(j - 0.5)W_{max}}{N_M} \right) \right) \quad (4.14)$$

Wyrażenie  $\int_0^{\tau_{i,j}} w_{cwnd}(w_i, t) dt$  jest całką oznaczoną funkcji rozmiaru okna nadawczego wyliczaną w granicy średniego czasu trwania kroku, w którym następuje przejście ze stanu  $i$  do  $j$ , przyjmującą postać:

$$\begin{aligned} \int_0^{\tau_{i,j}} w_{cwnd}(w_i, t) dt &= \int_0^{\tau_{i,j}} \left( \alpha(t - K(w_i))^3 \right) dt = w_i \tau_{i,j} + \\ & \quad \frac{\alpha}{4} \left( (\tau_{i,j} - K(w_i))^4 - K(w_i)^4 \right) \end{aligned} \quad (4.15)$$

gdzie,  $K(x)$  zostało zdefiniowane jako  $K(x) = \sqrt[3]{\frac{(1-\beta)x}{\alpha}}$ . Wyrażanie (4.13) przedstawia średnią przepływność połączenia jako średni rozmiar okna nadawczego kroku podzielony przez czas RTT.

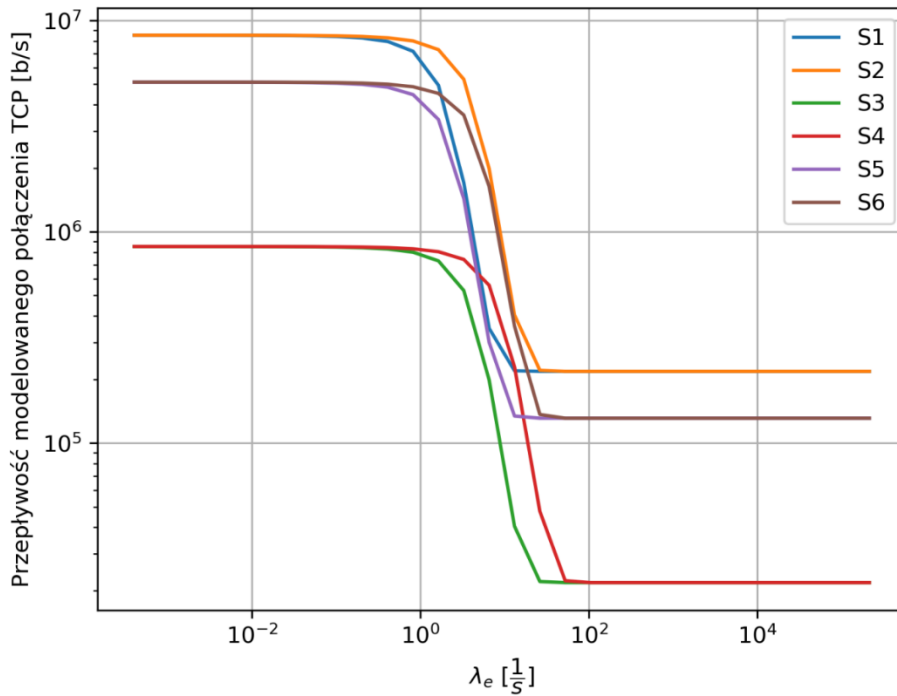
Model opisany powyżej, a pierwotnie zaproponowany w [224], został porównany z wynikami analizy symulacyjnej potwierdzającymi dużą zbieżność wyników analitycznych oraz symulacyjnych. Patrząc jednak na wyniki otrzymywane z wykorzystaniem tego modelu, widoczne są pewne niedokładności, których zobrazowanie zostało przedstawione

na Rys. 4.4. Parametry kilku wybranych do analizy scenariuszy zostały opisane w Tabeli 4.1.

**Tabela 4.1** Scenariusze uwzględnione w analizie opisanego modelu przepływności TCP-Cubic

Scenariusz	$\alpha$	$\beta$	RTT [s]	C [Mb/s]	N
S1	1	0,5	0,1	10	100
S2			0,01	10	
S3			0,1	1	
S4			0,01	1	
S5			0,1	6	
S6			0,01	6	

Na Rys. 4.4 zaprezentowano zależność przepływności, analizowanego połączenia TCP od intensywności utraty pakietów, wyznaczoną na podstawie zaprezentowanego modelu, który w oryginalnej publikacji [224] został porównany z wynikami analizy symulacyjnej w zakresie  $\lambda_e \leq 1$ . Obserwowane wypłaszczenie dla wszystkich zaprezentowanych scenariuszy dla  $\lambda_e > 10$  uwidacznia niedokładność tego modelu dla tego zakresu strat. Wraz ze wzrostem intensywności utraty pakietów model powinien wskazywać spadek przepływności aż do zera, a nie, co jest obserwowane, stabilizować się na określonej przepływności.

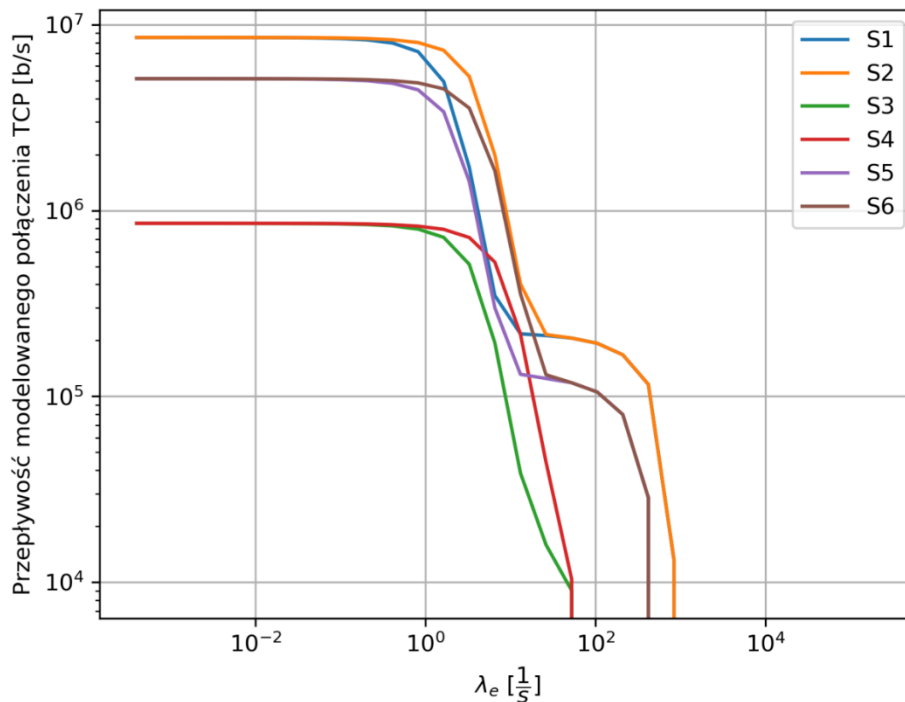


Rys. 4.4 Wyniki analizy przepływności połączenia TCP - model bez modyfikacji

Spodziewane zachowanie modelu jest widoczne po wprowadzeniu modyfikacji uwzględniającej wpływ intensywności utraty pakietów na efektywną przepustowość łącza.

$$W_{MAX} = RTT C_{eff} = RTT \mathcal{R}(C - \lambda_e l_{pkt}) \quad (4.16)$$

gdzie,  $C_{eff}$  jest efektywną przepustowością łącza wyznaczaną na podstawie zależności  $\mathcal{R}(C - \lambda_e l_{pkt})$ , a  $l_{pkt}$  rozmiarem pakietu. W rezultacie, po zastosowaniu zaproponowanych poprawek widoczne są spodziewane spadki przepływności przy wartościach granicznych  $C = \lambda_e l_{pkt}$  (wyniki zaprezentowane na wykresie z Rys. 4.5).



Rys. 4.5 Wyniki analizy przepływności połączenia TCP - model z modyfikacjami

W dalszej części pracy do analizy efektywności mechanizmów kodowania sieciowego wykorzystany zostanie model z zaproponowaną modyfikacją. Jego parametrami będą  $\lambda_e$ ,  $l_{pkt}$ ,  $C$ .

### 4.3 ZASTOSOWANIE KODOWANIA PRZY JEDNYM INTERFEJSIE

Wprowadzenie możliwości dodatkowego kodowania pakietów transmitowanych poprzez łącze, na którym występują straty pakietów, daje oczywiste zyski w postaci zwiększonego prawdopodobieństwa poprawnego odebrania segmentu danych, a co za tym idzie potencjalnie zwiększonej przepływności połączenia TCP. Korzyści te nie będą jednak obserwowalne w każdych warunkach. Koszt związany z kodowaniem w postaci dodatkowego opóźnienia kodowania i dekodowania będzie miał znaczenie, zwłaszcza w przypadku analizy łączy o stosunkowo dobrych parametrach, pozwalających na realizację połączeń o dużej przepływności. Warto jednak zaznaczyć, że proponowane rozwiązania są projektowane do zastosowania w sieciach bezprzewodowych, których wykorzystanie w środowisku morskim cechować będzie się przeciętnymi lub słabymi jakościowo łączami.



Zastosowanie zaproponowanego kodowania pozwoli na zmniejszenie intensywności strat pakietów przysłanych przez łącze bezprzewodowe, a obserwowana różnica będzie zależała od efektywności użytego kodowania. Aby wyznaczyć efektywną intensywność strat pakietów oznaczaną jako  $\lambda'_e$  niezbędne jest określenie prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu pomiędzy LMA a węzłem systemu, przy uwzględnieniu jego zakodowania przy pomocy kodu RaptorQ (por. Rys. 4.1). Korzystając z analizy przedstawionej w [225], [226], [228],  $\lambda'_e$  można wyrazić jako stosunek prawdopodobieństwa wystąpienia błędu i czasu transmisji pakietów:

$$\lambda'_e = \frac{p'_c C}{l_{pkt}} = \frac{p'_c}{t'_{pkt}} \quad (4.17)$$

gdzie,  $t_{pkt}$  jest czasem transmisji pakietu, a  $p'_c$  jest prawdopodobieństwem utraty pakietu z uwzględnieniem strat na łączu bezprzewodowym (prawdopodobieństwo straty z powodu błędu w transmisji  $p_t$ ) oraz przeciążania sieci (prawdopodobieństwo straty z powodu przeciążenia  $p_p$ ) [226]. W wyniku zastosowania kodowania czas transmisji pakietu ulegnie zmianie i może zostać opisany wzorem:

$$t'_{pkt} = 2 \times t_c + s^N(l_{IPv6} + l_s)/C \quad (4.18)$$

gdzie,  $t_c$  to czas potrzebny na kodowanie i odkodowanie wiadomości (liczony podwójnie włączając do analizy czas potrzebny na obie operacje – na podstawie [206]),  $s^N$  to liczba symboli wysłana przez interfejs ( $s^N = s^K + s^R$ ), a  $l_{IPv6}$  oraz  $l_s$  odpowiednio długość nagłówka IPv6 oraz długość segmentu danych wynikająca z  $s^K$  oraz uwzględniająca PID i OTI. Wartość  $t_c$  będzie w dużej mierze zależała od liczby symboli oraz ich rozmiaru, zatem będzie to przedmiot analizy omówionej w dalszej części rozdziału, w której to, na podstawie [208], przyjęto wartości czasu kodowania/dekodowania przedstawione w Tabeli 4.2.

**Tabela 4.2 Czas kodowania/dekodowania dla kodu RaptorQ (na podstawie [208])**

Liczba symboli	Czas kodowanie/dekodowania [ms]
4	0.003
8	0.01
16	0.08

Drugi z parametrów wpływających na efektywną intensywność strat pakietów –  $p_c$ , może być wyznaczone w następujący sposób (za [227]):

$$p_c \approx \frac{p_t}{1 - e^{-\frac{p_t}{p_p}}} \quad (4.19)$$

natomiast  $p_p$  dla TCP Cubic korzystając z [228] można wyliczyć następująco:

$$p_p \approx \frac{4 RTT}{4 - \beta} \sqrt[3]{\frac{\alpha}{\beta W_{max}^4}} \quad (4.20)$$

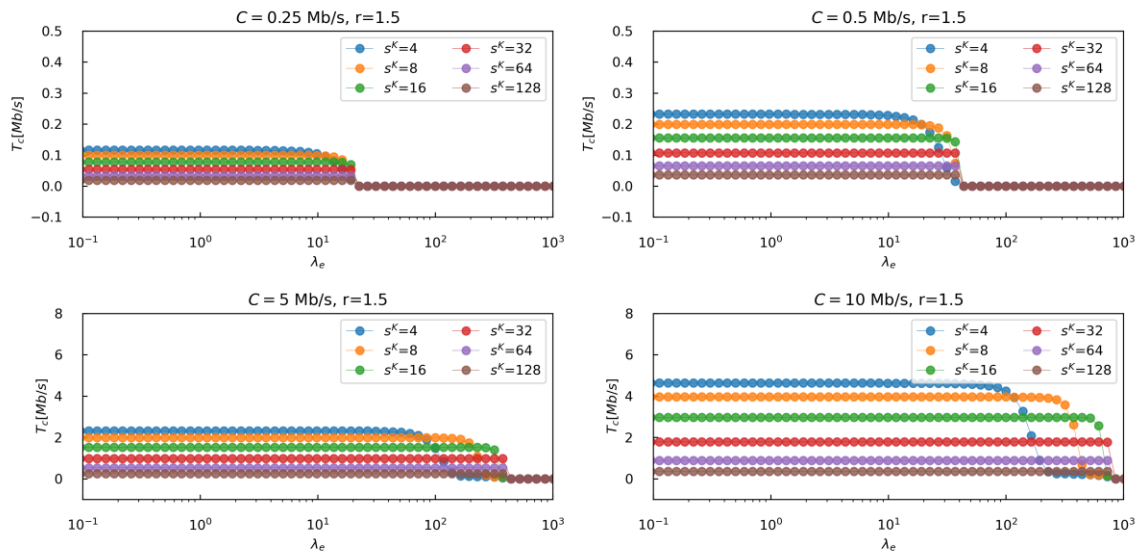
Dysponując  $p_p$  i  $p_c$  można numerycznie wyznaczyć  $p_t$ , co pozwoli na wyznaczenie prawdopodobieństwa utraty pojedynczego symbolu zgodnie ze wzorem (4.21):

$$p_s = 1 - (l_{pkt} \sqrt{(1 - p_t)})^{l_{IPv6} + l_s} \quad (4.21)$$

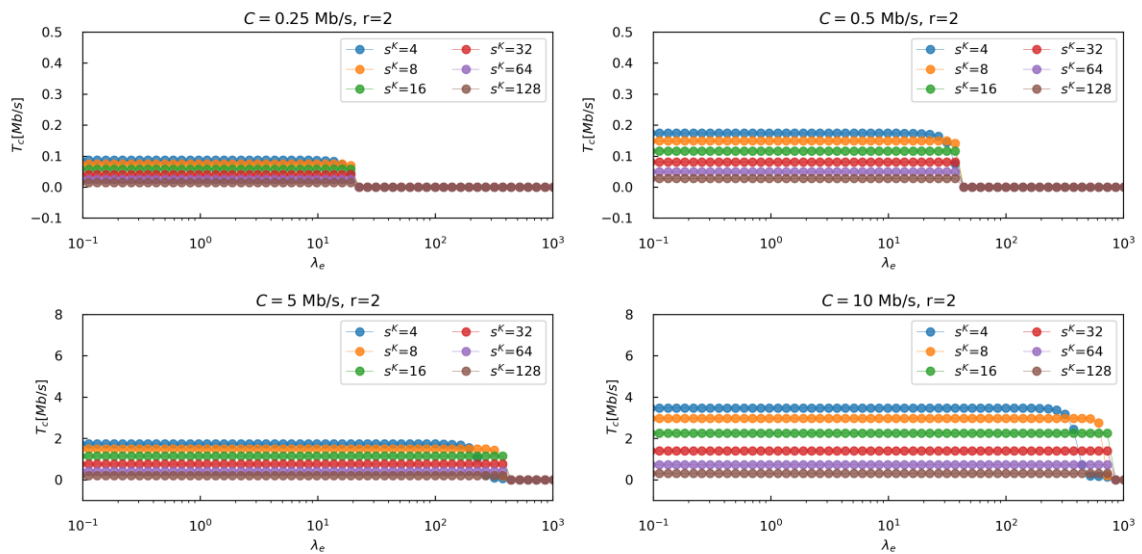
Prawdopodobieństwo utraty pakietu po zastosowaniu kodowania wyznaczyć można korzystając ze wzoru:

$$p'_t = 1 - \sum_{s^O = s^K}^{s^N} (1 - p_{bd}(s^O, s^K)) \binom{s^N}{s^O} p_s^{s^N - s^O} (1 - p_s)^{s^O} \quad (4.22)$$

Po czym podstawiając  $p'_t$  do wzoru (4.19) możemy wyznaczyć  $p'_c$ , a następnie docelowe  $\lambda_e^1$ , które będzie z kolei nowym parametrem modelu przepływności połączenia TCP. Na podstawie [220], w dalszych obliczeniach przyjęto  $\alpha = 0,4$  i  $\beta = 0,25$ . Analizę wybranych scenariuszy dla różnych wariantów wartości  $RTT$  i  $C$  zaprezentowano na Rys. 4.6 oraz Rys. 4.7. Na rysunkach prezentujących wyniki zaobserwować ograniczenie przepływności połączenia TCP względem analizowanej przepustowości łącza przy niewielkich wartościach  $\lambda_e$ . Jest to efekt zastosowania kodowania, które w tym zakresie, poprzez wprowadzenie dodatkowego narzutu (dodatkowych nagłówków) oraz czasu kodowania/dekodowania, zmniejsza przepływność analizowanego połączenia. Jednak zakres efektywnego wykorzystania łącza został rozszerzony o większe wartości  $\lambda_e$ . Wyniki analizy tego zjawiska zostały zaprezentowane na kolejnych rysunkach Rys. 4.8 - Rys. 4.11.



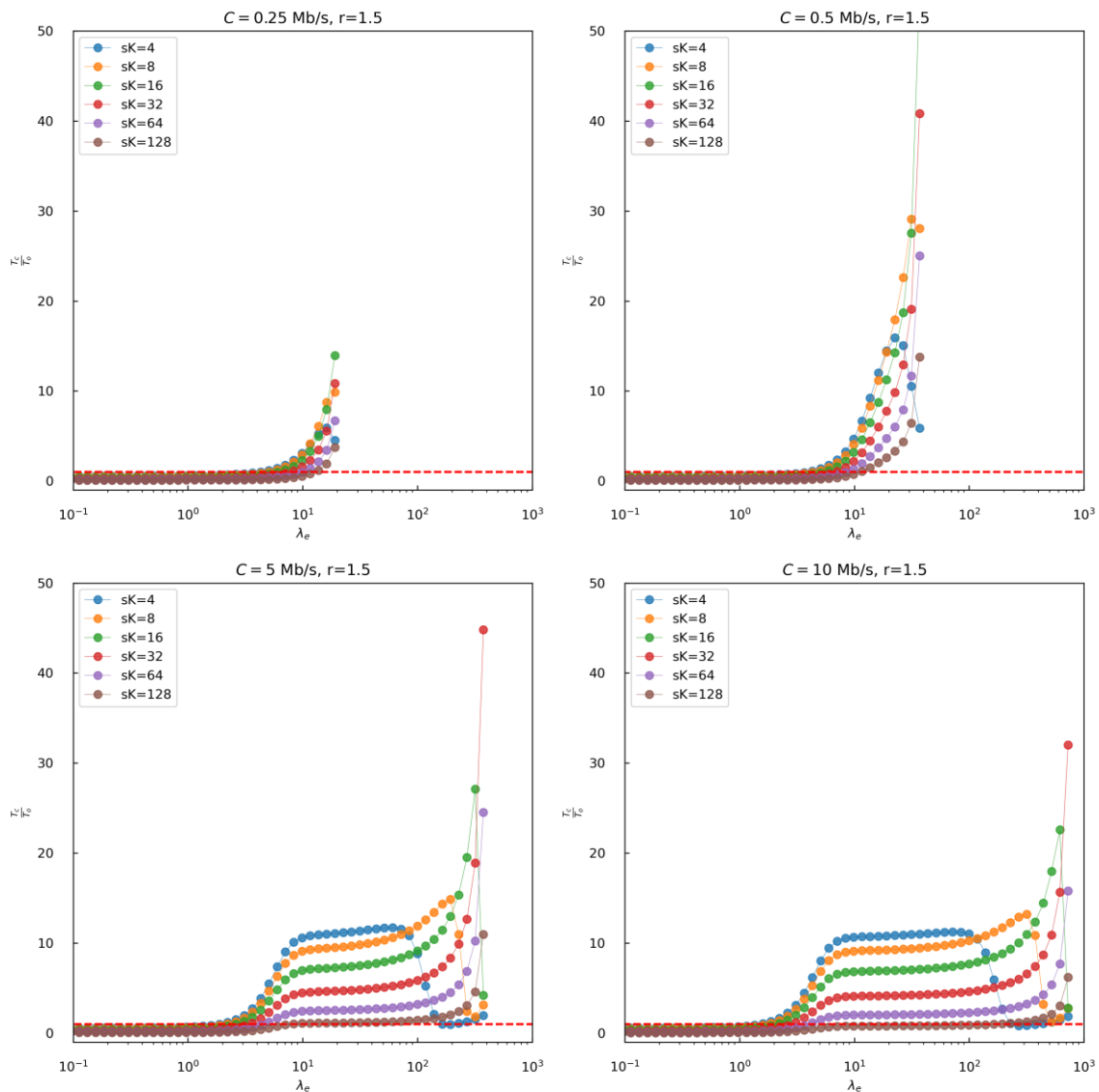
Rys. 4.6 Przepływność połączenia TCP po zastosowaniu kodowania dla  $r=1.5$



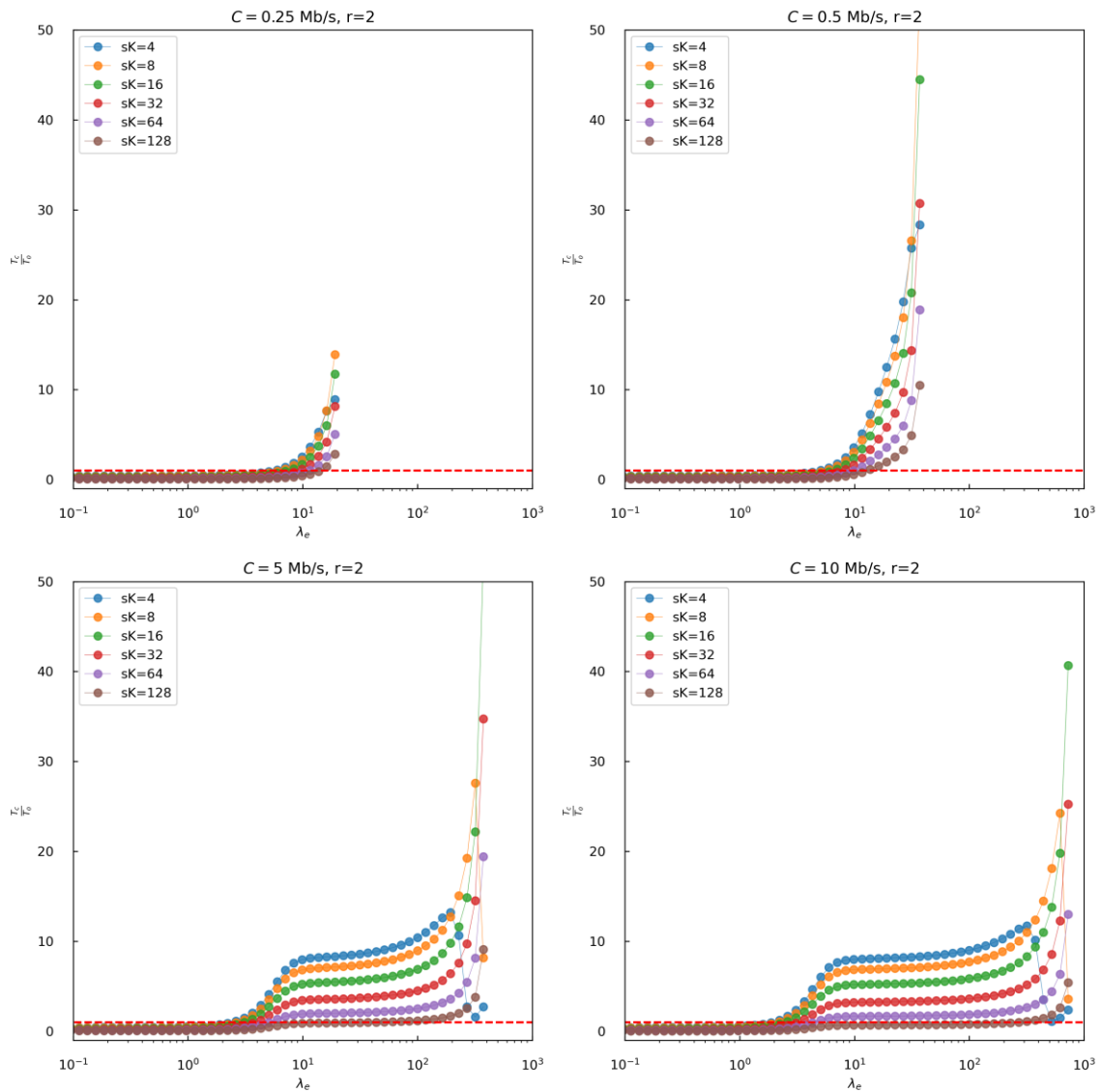
Rys. 4.7 Przepływność połączenia TCP po zastosowaniu kodowania dla  $r=2$

Stosunek przepływności połączenia TCP po zastosowaniu zaproponowanego schematu kodowania dla wybranych wartości  $r$  został zaprezentowany na Rys. 4.8 oraz Rys. 4.9. Na każdym z wykresów czerwoną poziomą linią zaznaczono wartość 1, która pokazuje równowagę pomiędzy wartością przepływności standardowego połączenia TCP a połączenia realizowanego zgodnie z zaproponowanym schematem. Widoczny jest zakres,

w którym zastosowane kodowanie nie przynosi zysków – w zależności od przepustowości analizowanego łącza będzie on miał różne wartości, ale w ogólności prawdziwe jest stwierdzenie, że przy złych warunkach, a takie spodziewane są w komunikacji na morzu, kodowanie może przynieść istotną poprawę efektywności transmisji danych. W wielu scenariuszach, zwłaszcza dla niewielkich wartości przepływności standardowego połączenia TCP otrzymywane wartości są kilkadziesiąt razy większe.

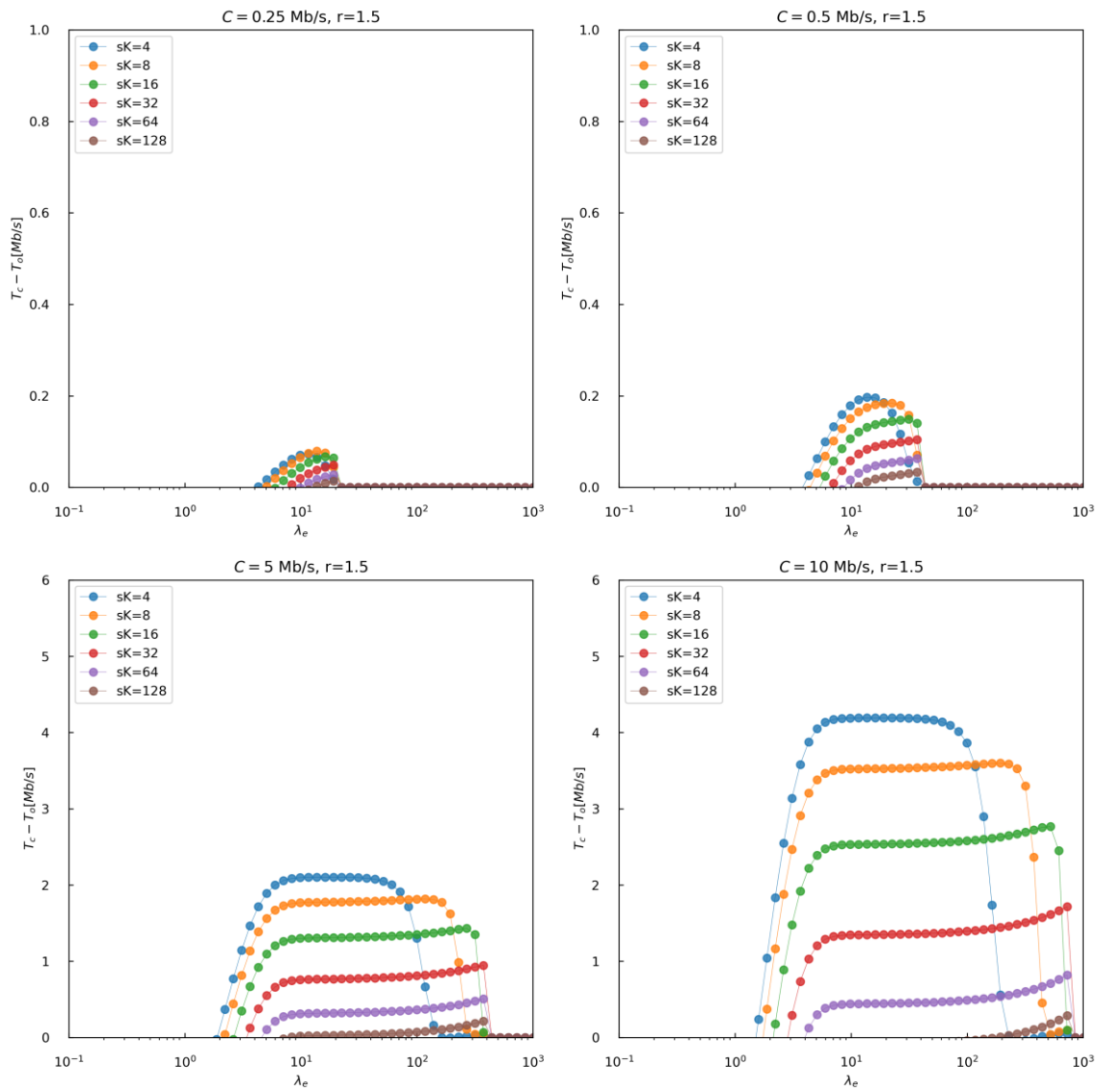


Rys. 4.8 Stosunek przepływności połączenia TCP po zastosowaniu kodowania do przepływności połączenia realizowanego przez łącze bez kodowania  $r=1.5$

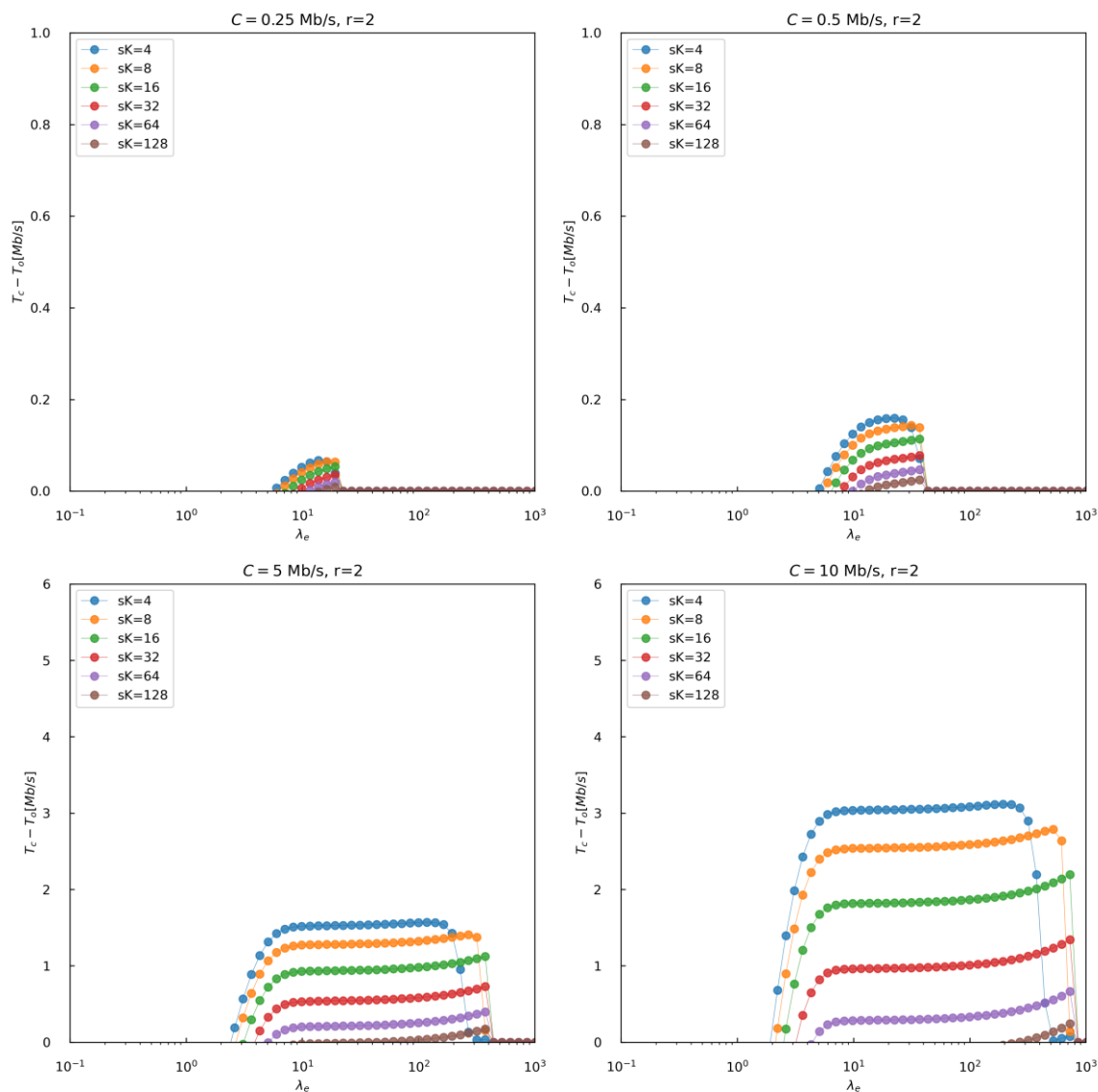


**Rys. 4.9** Stosunek przepływności połączenia TCP po zastosowaniu kodowania do przepływności połączenia realizowanego przez łącze bez kodowania  $r=2$

Różnicę przepływności uzyskiwanej dla połączenia TCP dla wybranych wartości  $r$  zaprezentowano na Rys. 4.10 oraz Rys. 4.11. Widoczna jest możliwość uzyskania większej przepływności dla  $r=1.5$ , ale przy zapewnieniu odporności na błędy w węższym zakresie  $\lambda_e$ . Dla  $r=2$  maksymalna możliwa do uzyskania przepływność połączenia TCP jest mniejsza (wynika to z większej liczby symboli naprawczych), ale otrzymujemy większą odporność na straty pakietów.

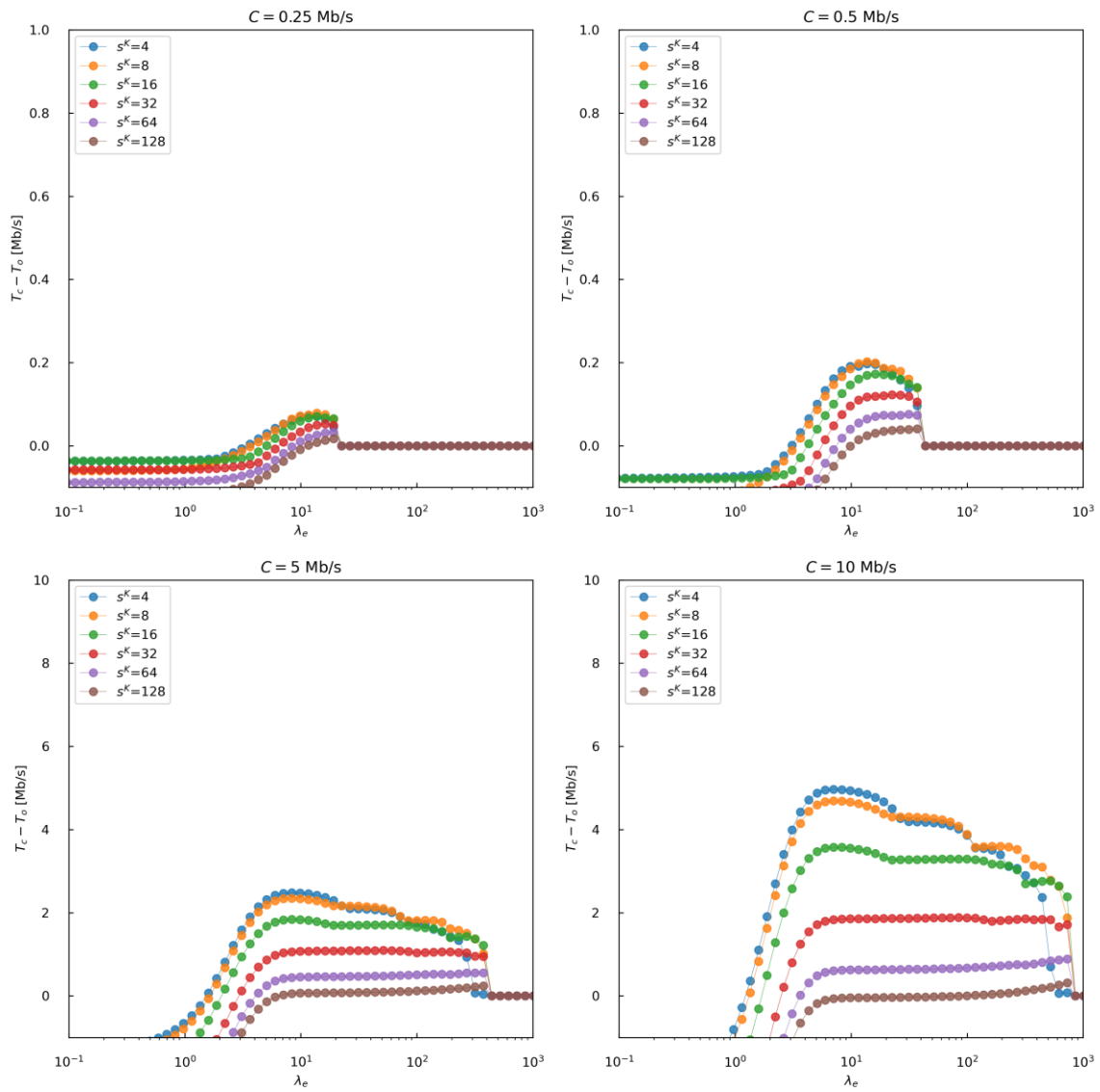


Rys. 4.10 Różnica przepływności połączenia TCP względem połączenia realizowanego przez łącze bez kodowania  $r=1.5$



Rys. 4.11 Różnica przepływności połączenia TCP względem połączenia realizowanego przez łącze bez kodowania  $r=2$

Istotna korzyść z zastosowania kodu RaptorQ, który jest kodem typu *rateless* została pokazana na Rys. 4.12. Dzięki możliwości zmiany liczby generowanych symboli naprawczych koder dynamicznie, na podstawie obserwowanych warunków, może dostosować pożądaną nadmiarowość tak, aby zapewnić możliwie najlepszą z dostępnych w tym mechanizmie przepływność połączenia TCP.



Rys. 4.12 Różnica w uzyskiwanej przepływności połączeń TCP po zastosowaniu najlepszych wartości  $r$  dla różnych intensywności strat pakietów



#### 4.4 KODOWANIE PRZY WYKORZYSTANIU WIELU INTERFEJSÓW BEZPRZEWODOWYCH

W zaproponowanym schemacie kodowania sieciowego efektywność transmisji może być dodatkowo zwiększona w scenariuszu, w którym urządzenie klienckie oraz LMA dysponują więcej niż jednym interfejsem fizycznym – czyli w docelowym środowisku pracy analizowanego heterogenicznego systemu łączności na statku. O ile w przypadku jednego dostępnego w węźle interfejsu sieciowego istotny jest wybór parametrów kodowania i dekodowania, a wszystkie segmenty danych przesyłane są jedną ścieżką, w scenariuszu, w którym do dyspozycji mamy większą liczbę interfejsów, sprawa jest bardziej złożona. Powstałe w wyniku działania algorytmów kodowania sieciowego symbole mogą być przesłane z wykorzystaniem różnych interfejsów, a każdy z tych interfejsów będzie cechował się różnymi parametrami przepustowości, czasu transmisji czy prawdopodobieństwem poprawnego dostarczenia symbolu. W związku z tym dodatkowo potrzebne jest rozwiązanie, które pozwoli określić jak rozlokować powstałe w wyniku kodowania segmenty.

Istotnymi z punktu widzenia efektywności opisywanej metody są sposób rozdzielania poszczególnych symboli na fizyczne interfejsy oraz dobór parametrów kodowania – rozmiar segmentu danych ( $l_{seg}$ ) zależący od  $s^K$  oraz liczba segmentów naprawczych ( $s^R$ ). W dalszej analizie założono, że liczba segmentów wysłanych na poszczególnych interfejsach określona jest jako zbiór:

$$\mathbf{s}^W = \{s_i^W \mid \sum_{i=1}^I s_i^W = s^N\} \quad (4.23)$$

gdzie,  $\mathbf{s}^W$  jest wektorem o  $I$  elementach, którego elementy  $s_i^W$  określają liczbę segmentów wysłanych na  $i$ -tym interfejsie fizycznym.

W analogiczny sposób opisać można zbiór określający wektory z możliwą do uzyskania liczbą segmentów odebranych na poszczególnych interfejsach:

$$\Phi_o(\mathbf{s}^W) = \{s^O \mid \sum_{i=1}^I s_i^O \leq s^N \wedge \sum_{i=1}^I s_i^O \geq s^K \wedge \forall_i s_i^O \leq s_i^W\} \quad (4.24)$$

gdzie,  $\mathbf{s}^0$  jest wektorem o rozmiarze  $I$ , którego elementy  $s_i^0$  określają liczbę segmentów odebranych na  $i$ -tym interfejsie fizycznym. Z punktu widzenia dalszej analizy, ponieważ pakiet będzie mógł być zdekodowany z niezerowanym prawdopodobieństwem tylko jeżeli  $\sum_{i=1}^I s_i^0 \geq s^K$ , w dalszej analizie zbiór  $\Phi_0$  został ograniczony tylko do tych wektorów, w których suma odebranych segmentów jest większa niż  $s^K$ , pozwalając na podjęcie próby dekodowania wiadomości.

Prawdopodobieństwo utraty pakietu w trakcie jego transmisji, po zakodowaniu i wykorzystaniu wielu interfejsów, może być opisane wzorem (4.25):

$$p''_t = 1 - \sum_{\mathbf{s}^0 \in \Phi_0(\mathbf{s}^W)} \left( (1 - p_{bd}(\sum_{i=1}^I s_i^0, s^K)) \prod_{i=1}^I \binom{s_i^W}{s_i^0} p_{si}^{s_i^W - s_i^0} (1 - p_{si})^{s_i^0} \right) \quad (4.25)$$

gdzie  $p_{si}$  oznacza prawdopodobieństwo błędu przy przesyłaniu pojedynczego segmentu poprzez  $i$ -ty interfejs. Jego wartość można wyznaczyć z użyciem (4.20) - (4.22), z tą różnicą, że w tym przypadku ( $C_i, \lambda_{ei}$ ) będą dotyczyły poszczególnych interfejsów. Tym samym zmiana względem (4.22) polega na uwzględnieniu wszystkich możliwych scenariuszy, w których prawdopodobieństwo błędu dekodowania jest mniejsze od 1, przy założeniu, że wysłane zostały segmenty zgodnie z  $\mathbf{s}^W$ . Wszystkie te możliwości zostały określone przez  $\Phi_0$ .

Warto podkreślić, że w tym wariancie, czas potrzebny na przesłanie pakietu po zakodowaniu może być krótszy niż w wariancie korzystającym tylko z jednego interfejsu – możliwa jest bowiem równoległa transmisja segmentów. Do wyznaczenia wartości czasu potrzebne na przesłanie pakietu skorzystamy ze wzoru:

$$t''_{pkt} = 2 \times t_c + \max_i \left( \frac{s_i^W (l_{pv6} + l_s)}{C_i} \right) \quad (4.26)$$

uwzględniającego czas potrzebny na zakodowanie wiadomości, najdłuższy czas spośród wszystkich interfejsów potrzebny na przesłanie wszystkich symboli przypadających na ten interfejs i czas dekodowania.

#### 4.4.1 Heurystyczny algorytm rozlokowania symboli na poszczególnych interfejsach

Zastosowanie transmisji z wykorzystaniem wielu interfejsów pozwala na rozlokowanie wygenerowanych segmentów na poszczególnych z nich. Rozważając ten scenariusz, pojawia się jednak pytanie – ile segmentów należy przesłać poprzez poszczególne interfejsy. Jako rozwiązanie tego problemu zaproponowano dwa algorytmy, z których pierwszy jest algorytmem heurystycznym wyznaczającym liczbę segmentów, które powinny być przesłane poprzez poszczególne interfejsy. Drugi, natomiast, jest zastosowaniem podejścia uczenia ze wzmocnieniem, w którym to realizowane jest uczenie się prawidłowego zachowania poprzez zbieranie doświadczenia z obserwowanego środowiska. W przypadku algorytmu heurystycznego, jego pseudokod został przedstawiony na Rys. 4.13.

---

**Algorithm 1** Algorytm wyznaczania liczby dla poszczególnych interfejsów

---

```
1: procedure SENDING SCHEME( $C, \lambda_e, l_{pkt}, s^N$ )
2:   Wyznaczenie znormalizowanej proporcji pomiędzy liczbą symboli wynikającą z
   efektywnej przepływności poszczególnych łączy
   a:  $\forall_i r_i = \max(0, C_i - l_{pkt} * \lambda_{ei})$ 
   b:  $\forall_i r_i = r_i / \text{sum}(r)$ 
3:   Inicjalizacja współczynnika redukcji  $w_r = 1.0/s^N$ 
4:   Inicjalizacja zmiennej wyjściowej  $\forall_i s^W_i = 0$ 
5:   while  $\text{sum}(s^W_i) < s^N$  do
   a:  $i = \text{argmax}(r)$ 
   b:  $s^W_{i+} = 1$ 
   c:  $r_{i-} = w_r$ 
```

---

Rys. 4.13 Pseudokod zaproponowanego algorytmu konfiguracji mechanizmu kodowania sieciowego z użyciem wielu interfejsów

Jako dane wejściowe dla proponowanego algorytmu podawane są wartości opisujące  $C_i, \lambda_{ei}$  poszczególnych interfejsów, średnia długość pakietu oraz  $s^N$  jako liczba segmentów, które należy rozlokować pomiędzy dostępne interfejsy. Jako wewnętrzną zmienną stanowiącą wskaźnik proporcji pomiędzy liczbą symboli przypisanych do poszczególnych interfejsów wykorzystano znormalizowaną efektywną przepustowość poszczególnych łączy wyznaczaną zgodnie z krokami 2a i 2b algorytmu. Następnie, rozpoczynając od maksymalnej wartości  $C_i$  przypadającej dla konkretnego interfejsu,

przypisywany jest do niego jeden segment (zgodnie z 5a-5b), a wartość  $C_i$  jest redukowana o wartość współczynnika redukcji  $w_r$ . Procedura ta (krok 5 algorytmu) powtarzana jest do czasu rozłokowania wszystkich przewidzianych do transmisji symboli. Wynikiem działania algorytmu jest wektor  $s^W$  zawierający liczbę symboli przeznaczonych do transmisji na poszczególnych łączach.

Na potrzeby analizy pokazującej efektywność takiego podejścia przeprowadzono symulacje numeryczne, w których dla zadanej liczby  $I$  interfejsów wchodzących w skład interfejsu logicznego losowane były wartości opóźnienia w łączach, przepustowości oraz współczynnika utraty pakietu. Na podstawie tych danych wybierany był wariant rozłokowania poszczególnych segmentów pomiędzy dostępne interfejsy zgodnie z zaproponowanym algorytmem. Jako rozwiązanie referencyjne przyjęto przepływność połączenia realizowanego poprzez jedno, najlepsze z dostępnych łączy – w dalszej części rozdziału oznaczone symbolem  $T_{org}$ . Ponieważ generowanie danych wejściowych dla większej liczby symboli naprawczych przy  $s^K = 16$  było zadaniem wymagającym dużej ilości zasobów (pliki binarne zawierające możliwe warianty zbioru  $\phi_o(s^W)$  zajmowały kilka gigabajtów), a otrzymane wyniki pokazują trend kolejnych wyników, w tym przypadku zakres analizowanych możliwości został ograniczony. Każdy ze scenariuszy powtórzony został 150 razy, a otrzymane wartości są wartościami średnimi z otrzymanych wyników. W każdym kroku symulacji wyznaczone były losowe wartości  $C_i$  i  $\lambda_{ei}$  zgodnie z poniższymi zależnościami:

$$C_i = a 10^b \quad (4.27)$$

$$\lambda_{ei} = 0.01 c \times 10^6 \quad (4.28)$$

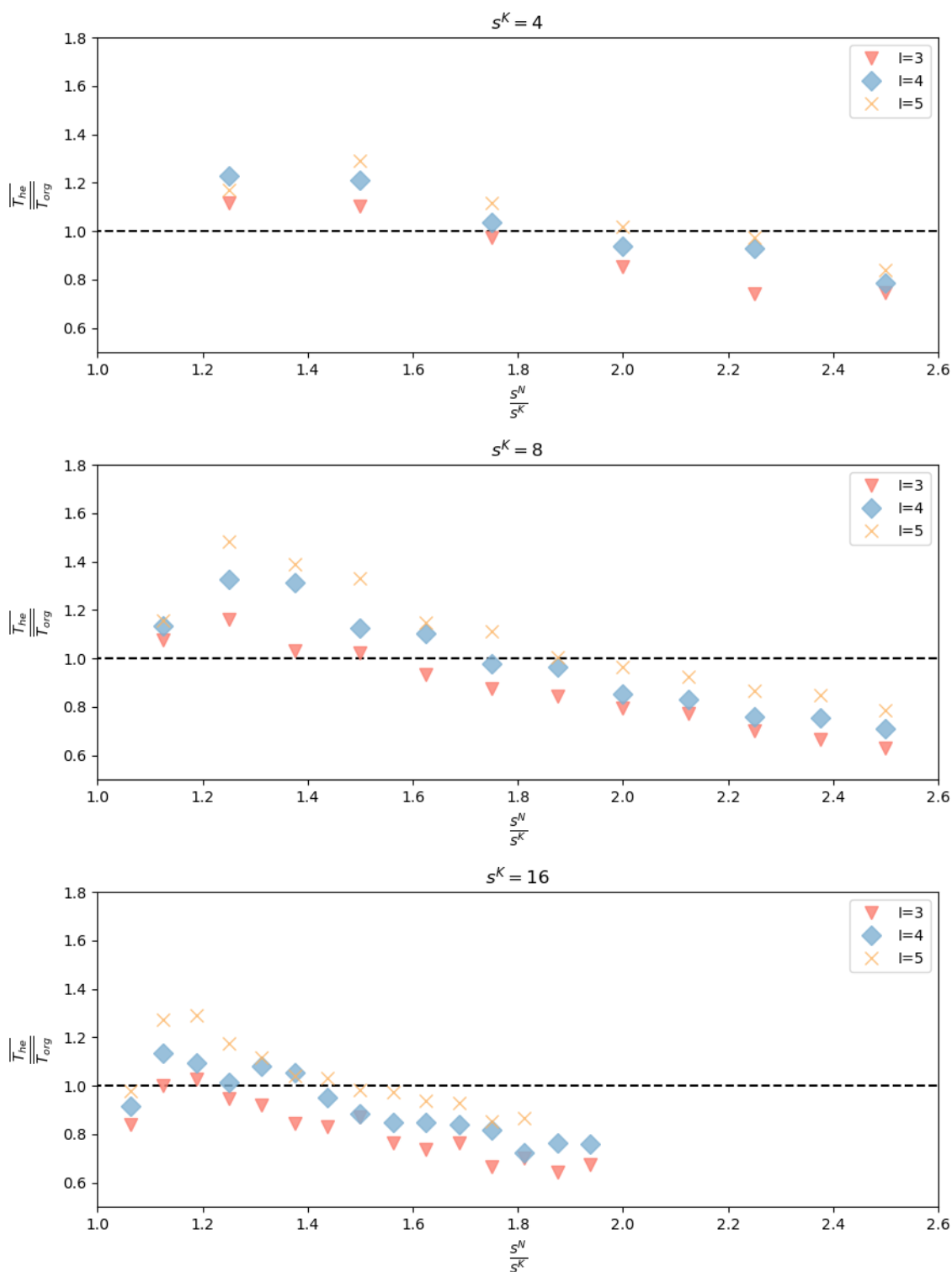
Gdzie  $a$ ,  $b$  i  $c$  są wartościami wyznaczonymi zgodnie z rozkładem równomiernym z przedziałów pomiędzy wartościami odpowiednio:  $\langle 1,9 \rangle$ ,  $\langle -3,3 \rangle$  i  $\langle 15, 1000 \rangle$ . Ponieważ analizie poddawane są wartości w ujęciu ogólnym, bez modelowania konkretnej techniki transmisji, przyjęto szerokie spektrum dostępnych wartości,  $C_i$  oraz  $\lambda_{ei}$ .

Na Rys. 4.14 przedstawiono wyniki analizy pokazującej relację pomiędzy średnią przepływnością połączenia TCP po zastosowaniu kodowania i maksymalną możliwą przepływnością połączenia przy wykorzystaniu jednego, najlepszego z dostępnych łączy.  $T_{he}$  oznacza przepływność wyznaczoną dla połączenia z zastosowaniem zaproponowanej metody kodowania i symbolami rozłokowanymi na podstawie algorytmu heurystycznego.

Zaprezentowane dane obrazują obszary, w których zastosowanie proponowanej metody przynosi korzyści. Obszary te są różne dla różnych wartości  $s^K$ , ale dla każdego z prezentowanych wykresów widoczny jest spadek wartości  $\frac{T_{he}}{T_{org}}$  przy wzroście liczby elementów nadmiarowych  $s^R$ . Wynika to ze wzrostu czasu potrzebnego na kodowanie/dekodowanie pakietu oraz transmisję poszczególnych segmentów przez dostępne łącza.

Analizując otrzymane dane w odniesieniu do stosunku  $s^N/s^K$  można zaobserwować, że dla każdego z badanych scenariuszy, w którym do dyspozycji były minimum trzy interfejsy, średni maksymalny zysk z zastosowanej metody otrzymywany był dla wartości stosunku  $s^N/s^K$  z przedziału  $\langle 1,1; 1,6 \rangle$  dla  $s^K = 4$  i  $s^K = 8$  oraz  $\langle 1,1; 1,4 \rangle$  dla  $s^K = 16$ . Jest to zakres, który na podstawie przeprowadzonej analizy można wskazać jako zalecenie implementacyjne proponowanej metody. Oczywiście, w zależności od przyjętego  $s^K$ , stosunek ten będzie zależał od liczby symboli nadmiarowych i nie każda wartość z tego zakresu jest w praktyce możliwa do uzyskania.

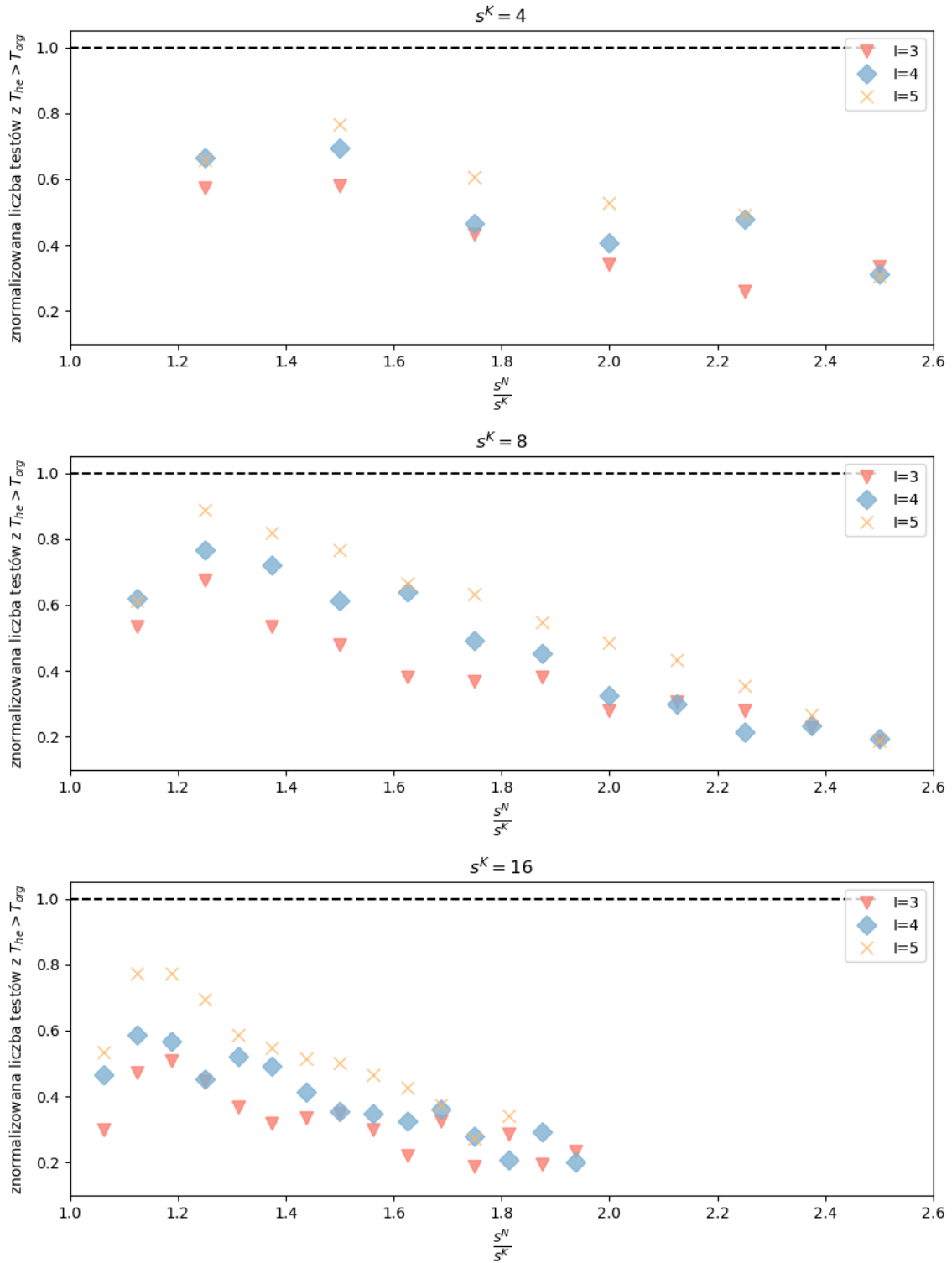
Mając świadomość obserwowania zysku wprowadzanego przez rozwiązania kodowania sieciowego jedynie w pewnych zakres parametrów łącza, co szerzej zostało zaznaczone w opisie wyników uzyskanych dla kodowania ruchu przesyłanego tylko przez jeden interfejs, dokonano oceny porównawczej liczby przypadków, w których zaproponowana metoda przyniosła lepsze rezultaty niż transmisja poprzez najlepsze z dostępnych interfejsów. Na Rys. 4.15 zaprezentowano wyniki analizy znormalizowanej liczby testów, w których uzyskano przepływność połączenia TCP większą niż maksymalna możliwa do uzyskania przy wykorzystaniu pojedynczego łącza. Miara ta pokazuje w ilu przypadkach wprowadzenie zaproponowanego algorytmu przynosi poprawę względem rozwiązania polegającego na wyborze najlepszego, ale pojedynczego interfejsu. Prezentowane wyniki pokazują, że dla każdej z analizowanych wartości  $s^K$  przy odpowiedniej wartości  $s^N/s^K$  otrzymywano korzystny wpływ na przepływność połączenia TCP w ok. 70% analizowanych testów, a najlepsze rezultaty otrzymano dla  $s^K = 8$  i  $s^R = 2$ , dla których wartość ta, w zależności od liczby interfejsów zawierała się w przedziale 67%-88%.



Rys. 4.14 Zysk z zastosowania proponowanego algorytmu dla wybranych wartości  $s^K$

Podsumowując zaprezentowane wyniki, można przyjąć  $s^K = 8$  jako rozwiązanie przynoszące największy zysk z zastosowania zaproponowanej metody kodowania. Przy mniejszej liczbie symboli źródłowych nadmiarowość i możliwość wykorzystania symboli

naprawczych nie jest w pełni wykorzystywana. Dla zwiększającej się liczby symboli ( $s^K = 16$ ) istotne znacznie odgrywa czas potrzebny na kodowanie i dekodowanie oraz narzut nagłówka IPv6 i nagłówków PID, OTI (opisanych w podrozdziale 4.1).



Rys. 4.15 Znormalizowana liczba scenariuszy, w których  $T_{he} > T_{org}$  dla wybranych  $s^N/s^K$

#### 4.4.2 Wpływ błędu pomiarowego na efektywność algorytmu

Przeprowadzona i omówiona w poprzednim punkcie analiza zakłada, że jako dane wejściowe opisanego algorytmu, podawane są dokładne wartości intensywności strat pakietów i przepustowości dostępnych interfejsów. Ponieważ realna implementacja opisywanego rozwiązania będzie zwykle związana z błędem pomiarowym, wynikającym z zastosowanej metody ich pomiaru, przeprowadzono analizę efektywności funkcjonowania proponowanego algorytmu przy założeniu występowania błędów.

Procedura pomiaru intensywności strat pakietów czy przepustowości może być realizowana na różne sposoby [229] [230] [231] [232] [233] [234] [235] [236], a każdy z nich wprowadzać będzie błąd na innym poziomie. Ponieważ sama natura problemu pomiaru tych wartości jest złożona, w analizie nie uwzględnia się konkretnej metody, a jako analizowany parametr przyjęty został błąd względny  $\delta_x$  wyznaczany na podstawie zależności:

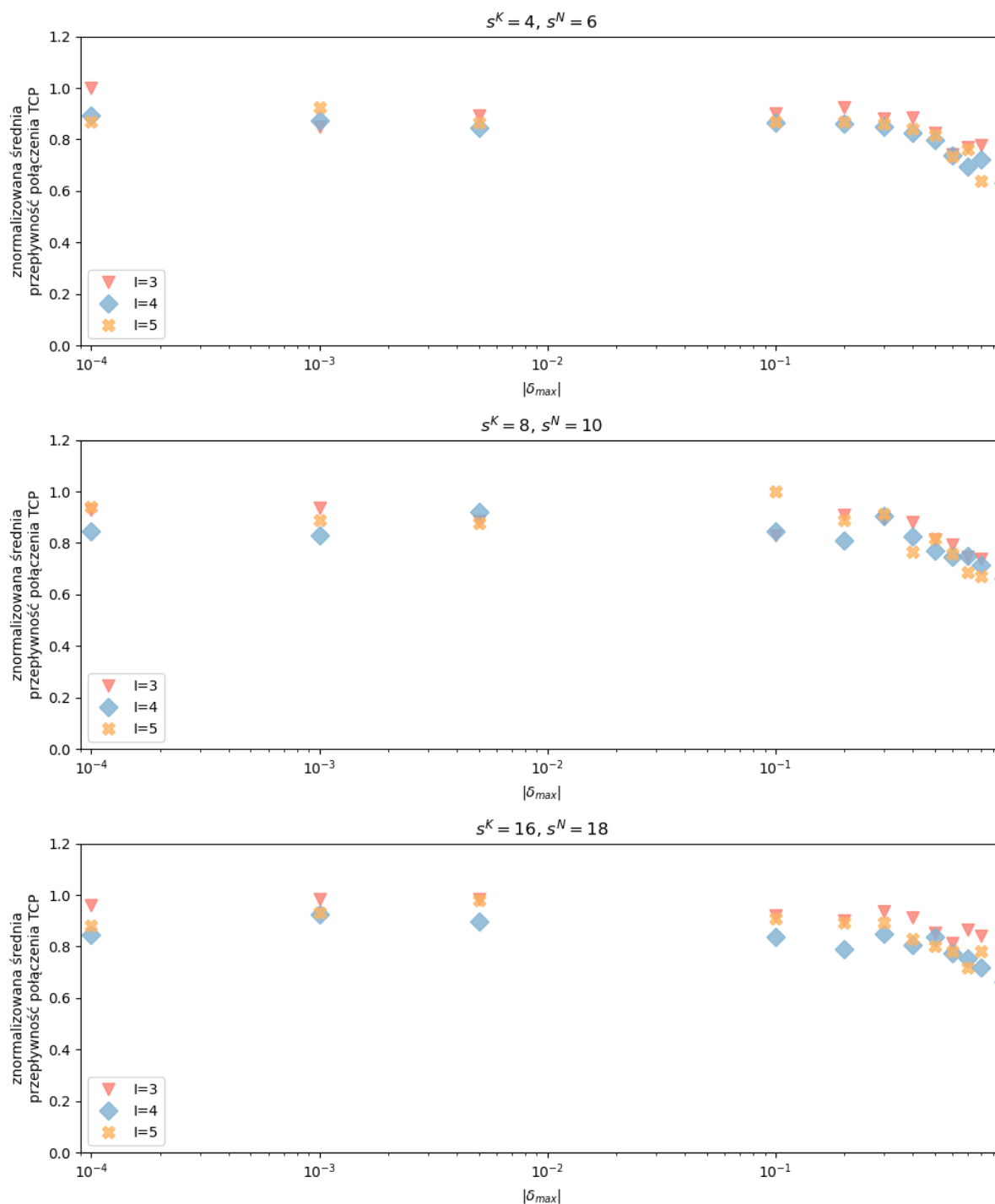
$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{x_0 - x}{x_0} \quad (4.29)$$

gdzie  $x_0$  jest wartością rzeczywistą mierzonego parametru, a  $x$  wartością zmierzoną. W przeprowadzonej analizie uwzględniono błędy pomiaru  $C$  i  $\lambda_e$ .

Wpływ dokładności pomiaru parametrów wejściowych proponowanego algorytmu został zaprezentowany na Rys. 4.16, na którym to zobrazowano znormalizowaną średnią przepływność połączenia TCP w zależności od wartości parametru  $\delta_{max}$  oznaczającego górną granicę błędu pomiaru parametrów wejściowych. W każdym z analizowanych scenariuszy wprowadzono losowy błąd pomiaru z zakresu  $\delta_{max}$ . Prezentowana wartość znormalizowanej średniej przepływności utrzymuje stosunkowo stabilny poziom dla  $|\delta_{max}| \leq 0,1$ , ale wyraźnie spada powyżej tej wartości ( $>0,1$ ). Z przedstawionych wyników widać, że zastosowanie metody pomiarowej, która zapewnia błąd mniejszy niż 0,1, nie zmniejsza efektywności proponowanego algorytmu. Dla  $|\delta_{max}| > 0,1$ , użycie niedokładnych danych wejściowych skutkuje wskazaniem przez algorytm



nieprawidłowego podziału bloków kodujących na poszczególne interfejsy, co w efekcie wpływa na spadek efektywności funkcjonowania algorytmu.



Rys. 4.16 Wpływ błędu pomiaru wartości  $C$  i  $\lambda_e$  na efektywność proponowanego algorytmu heurystycznego

Zaprezentowane wyniki pokazują, że zaproponowany algorytm pozwala na zwiększenie średniej przepływności połączenia TCP względem przepływności połączenia wykorzystującego najlepsze z dostępnych łączy do 50%. Pomimo niewątpliwych zalet,

algorytm ten wymaga jednak z góry określonej liczby symboli nadmiarowych i nie wykorzystuje w pełni możliwości kodu RapotrQ i opisanego schematu kodowania.

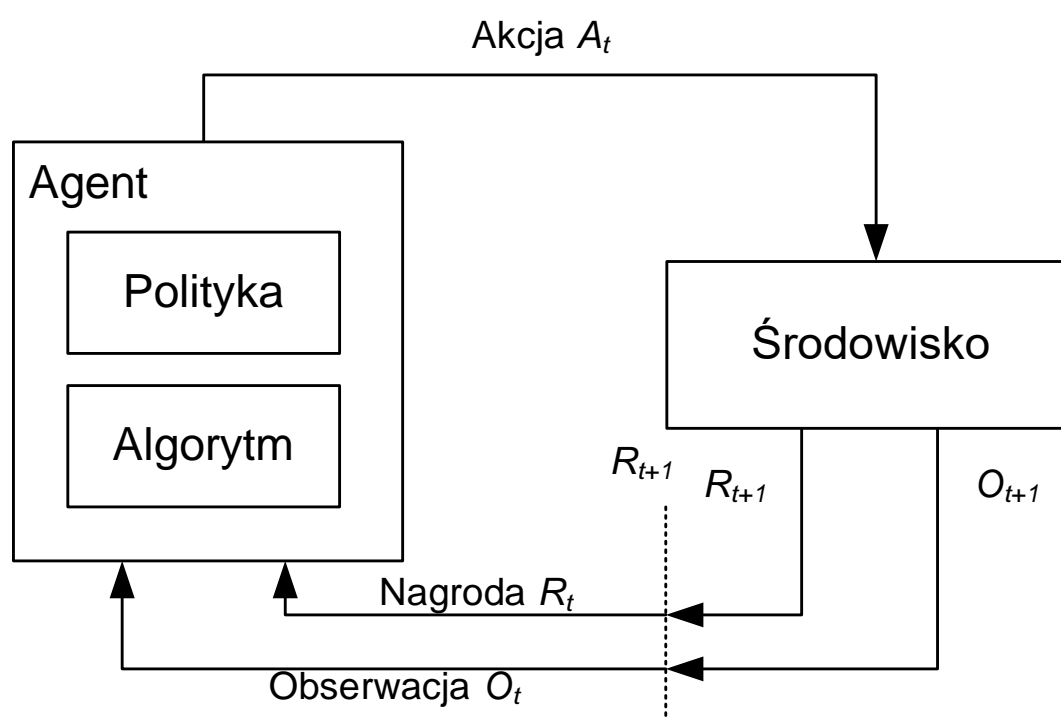
#### 4.4.3 Algorytm uczenia ze wzmocnieniem

Mając na uwadze ograniczenia pierwszego z zaproponowanych rozwiązań, dokonano analizy możliwości wykorzystania algorytmów uczenia ze wzmocnieniem (*Reinforcement Learning*) wspomaganych głębokimi sieciami neuronowymi (*Deep Reinforcement Learning*).

Algorytmy uczenia ze wzmocnieniem [237] zakładają okresowe podejmowanie decyzji realizowane przez agenta, który na podstawie obserwacji środowiska swojej pracy oraz wyników wybranej akcji dostosowuje strategię w celu osiągnięcia optymalnej polityki dalszego działania. Tradycyjne techniki uczenia ze wzmocnieniem z uwagi na konieczność zdobycia w procesie eksploracji wiedzy o całym systemie i na jej podstawie wypracowania najlepszej polityki opisującej sposób działania, w praktyce ograniczają się do rozwiązywania problemów o ograniczonej liczbie stanów i możliwych akcji [238]. Wykorzystanie głębokich sieci neuronowych w procesie rozpoznawania środowiska i modelowania polityki otworzyło nowe możliwości wykorzystania idei uczenia ze wzmocnieniem do rozwiązywania bardziej złożonych problemów [239]. Jednym z najbardziej znanych przykładów wykorzystania uczenia ze wzmocnieniem wspomagane go głębokimi sieciami neuronowymi jest AlphaGo [240], program komputerowy, będący w stanie pokonać człowieka w grze w Go na pełnowymiarowej planszy.

Schemat funkcjonowania algorytmów ze wzmocnieniem został zaprezentowany na Rys. 4.17. Widoczna jest tam interakcja pomiędzy agentem – elementem decyzyjnym a środowiskiem, w którym dany agent funkcjonuje. Na podstawie obserwacji stanu środowiska  $O_t$  w rozważanej chwili podejmowana jest akcja  $A_t$  zgodnie z przyjętą polityką i algorytmem zaimplementowanym po stronie agenta. Odpowiedzią środowiska na wybraną akcję jest nagroda  $R_t$ , która pozwala na ocenę wybranej akcji i w przypadku wysokiej jej wartości wypromowania danej akcji w kolejnych iteracjach. Z formalnego punktu widzenia zaprezentowane środowisko jest odzwierciedleniem Procesu Decyzyjnego Markova (ang. *Markov Decision Process* – MDP), który może być zdefiniowany poprzez zbiór  $(O, A, P, R, O')$ , gdzie  $O$  jest ciągłą przestrzenią stanów –  $O$  to stan aktualnie obserwowany, a  $O'$  stan, do którego nastąpiło przejście,  $A$  oznacza

wielowymiarową przestrzeń akcji,  $P$  jest modelem przejść, a  $R$  jest funkcją nagrody. W przypadku gdy przejście pomiędzy stanami nie zależy od wybranej przez agenta akcji, ogólnie formułowany problem MDP może zostać zredukowany do problemu nazywanego problemem wielorękich bandytów z kontekstem (*Contextual Multi-Armed Bandits* – C-MAB), w którym agent próbuje maksymalizować spodziewaną nagrodę dla obserwowanego stanu bez uwzględniania dalszej ścieżki przejść pomiędzy kolejnymi stanami. Ponieważ zgodnie z opisanym sposobem modelowania parametrów łączy nie uwzględnia on powiązań pomiędzy wartościami określającymi łączy dla kolejnych iteracji, schemat C-MAB będzie miał zastosowanie w przypadku proponowanego rozwiązania.



Rys. 4.17 Schemat funkcjonowania algorytmów ze wzmocnieniem

Na podstawie gromadzonych obserwacji agent musi zbudować model, który pozwoli zoptymalizować politykę wskazującą na akcję pozwalającą na uzyskanie najwyższej spodziewanej nagrody. Model ten bazować będzie na obserwowanych danych ( $O$ ,  $A$ ,  $R$ ) związanych z podjętymi działaniami. W opisywanym podejściu ma więc ona wpływ na proces przeszukiwania i analizowania danych. Pojawia się tutaj znana w dziedzinie uczenia ze wzmocnieniem, kwestia poszukiwania kompromisu pomiędzy eksploracją a eksploatacją. Eksploracją nazywać będziemy fazę poszukiwania najlepszej akcji dla

obserwowanego kontekstu. Jako eksploatację definiuje się wykorzystanie zdobytej wcześniej wiedzy. W poszukiwaniu kompromisu pomiędzy eksploracją a eksploatacją istotne jest określenie polityki poszukiwania akcji. Jeśli agent wcześniej nauczył się kojarzyć wysoką nagrodę z konkretnym działaniem, może nie podejmować działań, które mają wyższą oczekiwaną nagrodę w nowych, nieznanych kontekstach. Analogicznie, nie można również zawsze podejmować działań losowych, ponieważ zrezygnuje się wtedy z oczekiwanej nagrody za znane w określonych kontekstach działania.

Jedną z prostych, ale skutecznych polityk jest polityka  $\epsilon$ -greedy, zgodnie z którą z prawdopodobieństwem  $\epsilon$  realizowana jest eksploracja i akcja dla obserwowanego otoczenia wybierana jest losowo, a z prawdopodobieństwem  $1-\epsilon$  decyzje o wyborze akcji podejmowane są na podstawie zdobytego doświadczenia i oszacowania powiązania obserwowanego kontekstu ze spodziewanej dla każdej z akcji nagrody wybierając tę, która oferuje najwyższą wartość. Jednym z wariantów tej polityki jest zmiana wartości parametru  $\epsilon$  z kolejnymi krokami uczenia się agenta.

Adaptacja rozwiązań *Deep Reinforcement Learning* na potrzeby zwiększenia efektywności komunikacji z wykorzystaniem sieci bezprzewodowych zyskuje w ostatnim czasie na znaczeniu jako istotny komponent, który pozwala na dostosowywanie wartości parametrów różnorodnych mechanizmów sieciowych do aktualnie obserwowanych warunków [241]. Przykładem mogą być rozwiązania optymalizujące warstwę fizyczną – wybór odpowiedniego schematu modulacji pozwalającej na zniwelowanie wpływu interferencji wewnątrzsystemowych [242], czy kształtowania wiązki antenowej [243] albo mechanizmów sterowania mocą nadawczą [244]. Patrząc na rozwiązania wyższych warstw, istotnym czynnikiem optymalizowanym w wielu pracach jest sumaryczna przepustowość oferowana w sieci bezprzewodowej. Optymalizacji może podlegać mechanizm odstępu do medium [245], rozwiązania zarządzania mobilnością węzłów [246] czy parametry samego połączenia TCP [247]. Podobne, jak to zastosowane w niniejszej rozprawie, podejście do modelowania środowiska modelujące je jako problem C-MAB występuje m.in. w publikacjach [248] [249], w których głębokie sieci neuronowe są wykorzystywane do wyboru łącza, przez które realizowana jest transmisja danych z wykorzystaniem protokołu MPTCP.

W proponowanym rozwiązaniu wykorzystano architekturę *Deep Double Q-Learning* (DDQN) [250], będące rozszerzeniem architektury (DQN) [251]f, w której to sieć

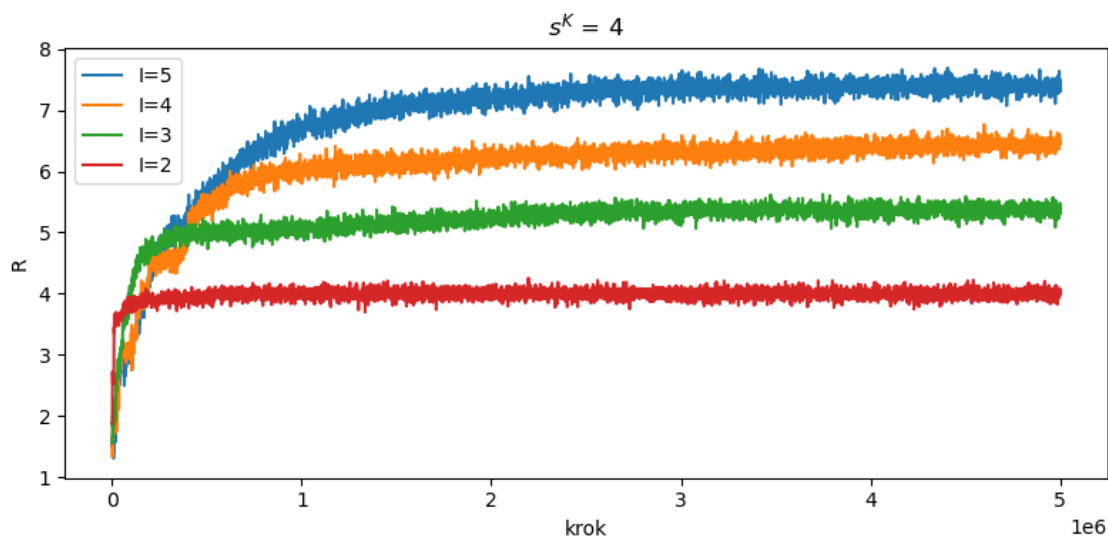
neuronowa wykorzystywana jest do odwzorowania tabeli  $Q(O, A)$ , przechowującej docelowe wartości parametru  $Q$  (*target Q-value*) zgromadzone w trakcie procesu eksploracji. W DDQN, aby uniknąć przeszacowania docelowych wartości  $Q$ , używa się dwóch oddzielnych zestawów parametrów sieci neuronowej: jednego do wyboru akcji (*online network*), a drugiego do prognozowania wartości  $Q$  (*target network*). Korzyści wynikające z zastosowania tego rozdzielenia prowadzą do praktycznego wykorzystania agenta DDQN jako rozwiązania wielu problemów modelowanych jako MDP [252].

W implementacji opisywanego rozwiązania wykorzystano framework Gym opracowany przez OpenAI do modelowania środowiska pracy algorytmów uczenia ze wzmocnieniem [253]. Agent wykorzystujący sieć DDQN został zaimplementowany przy pomocy biblioteki chainer-rl [254]. Jako politykę eksploracji zastosowano  $\epsilon$ -greedy ze zmniejszającą się wartością  $\epsilon$ . Parametry opisujące aktualny stan środowiska to  $C$  i  $\lambda$  dla każdego z dostępnych interfejsów – analogicznie jak w przypadku algorytmu heurystycznego. W każdym kroku działania algorytmu na podstawie wybranej akcji wyznaczana była wartość nagrody  $R$  równa wartości przepływności połączenia TCP realizowanego zgodnie ze schematem kodowania powiązaniem z wybraną akcją. Możliwy do wyboru schemat kodowania obejmował liczbę symboli nadmiarowych oraz rozlokowanie wszystkich symboli pomiędzy dostępnymi interfejsami. Szczegółowe parametry badanego modelu zostały zaprezentowane w Tabeli 4.3.

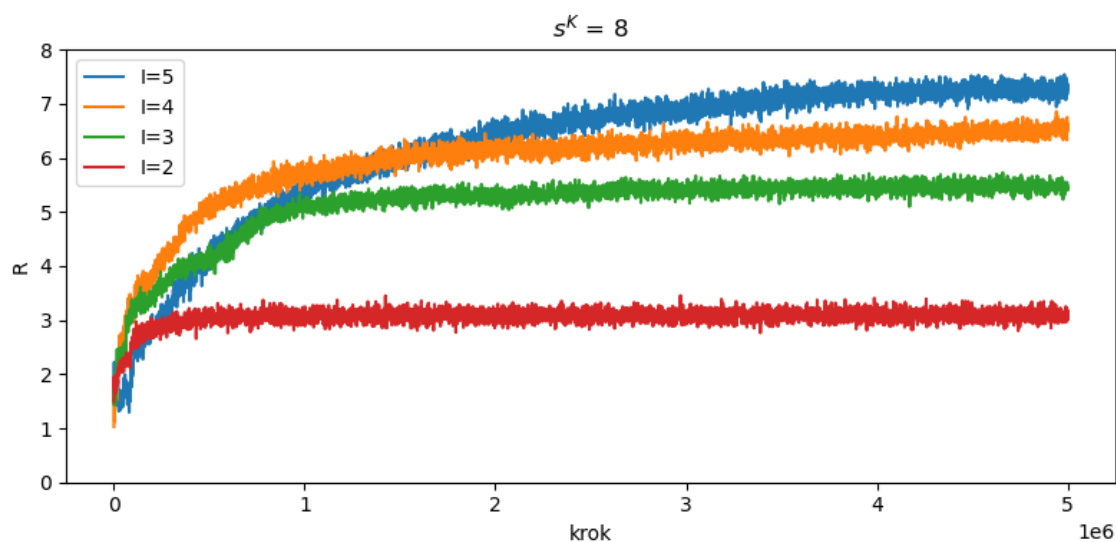
**Tabela 4.3** Parametry wykorzystane w trakcie symulacji

Parametr	Wartość	
$\epsilon$ początkowe	1.0	
$\epsilon$ końcowe	0.1	
Liczba kroków eksploracji	1000000	
Liczba neuronów w warstwie	32	
Liczba warstw ukrytych	8	
RTT	0,15 ms	
Optymalizator	Adam( $\epsilon = 0.01$ )	
Rozmiar danych wejściowych	2 x $I$	
Przestrzeń akcji	130	dla $s^K=4, I=3$
	425	dla $s^K=4, I=4$
	1161	dla $s^K=4, I=5$
	804	dla $s^K=8, I=3$
	4350	dla $s^K=8, I=4$
	19062	dla $s^K=8, I=5$

Wyniki procesu uczenia dla analizowanych scenariuszy zostały zaprezentowane na Rys. 4.18 oraz Rys. 4.19. W celu wygładzenia krzywych i zwiększenia czytelności wykresów zaznaczona została na nich średnia wartość  $R$  uzyskiwana przez agenta na danym etapie procesu uczenia, wyznaczana co 1000 kroków symulacji dla 100 losowo generowanych obserwacji.



Rys. 4.18 Wartość nagrody  $R$  uzyskiwane przez agenta DDQN w trakcie procesu uczenia, dla  $s^K = 4$



Rys. 4.19 Wartość nagrody  $R$  uzyskiwane przez agenta DDQN w trakcie procesu uczenia, dla  $s^K = 8$

Szczegółowa analiza wyników uzyskiwanych przez agenta będącego efektem zobrazowanego procesu uczenia została zaprezentowana w Tabeli 4.4, gdzie porównano wyniki algorytmu uczenia ze wzmocnieniem oraz algorytmu heurystycznego.

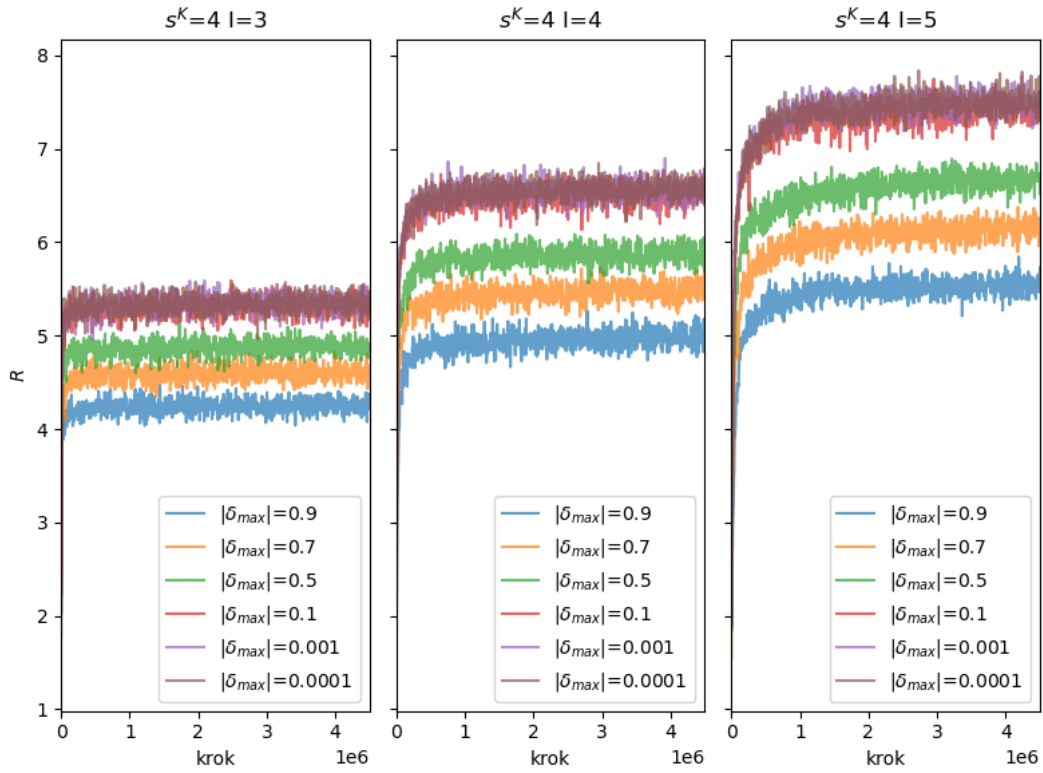
Tabela 4.4 Porównanie wyników zaproponowanych algorytmów

Scenariusz	$\overline{T}_{rl}$ [Mb/s]	$\overline{T}_{org}$ [Mb/s]	$\overline{T}_{he}$ [Mb/s]
$s^K=4, I=3$	<b>5,48</b>	4,36	4,83
$s^K=8, I=3$	<b>5,67</b>		5,15
$s^K=4, I=4$	<b>6,85</b>	5,01	6,02
$s^K=8, I=4$	<b>6,67</b>		6,54
$s^K=4, I=5$	<b>7,78</b>	5,45	6,99
$s^K=8, I=5$	7,72		<b>7,81</b>

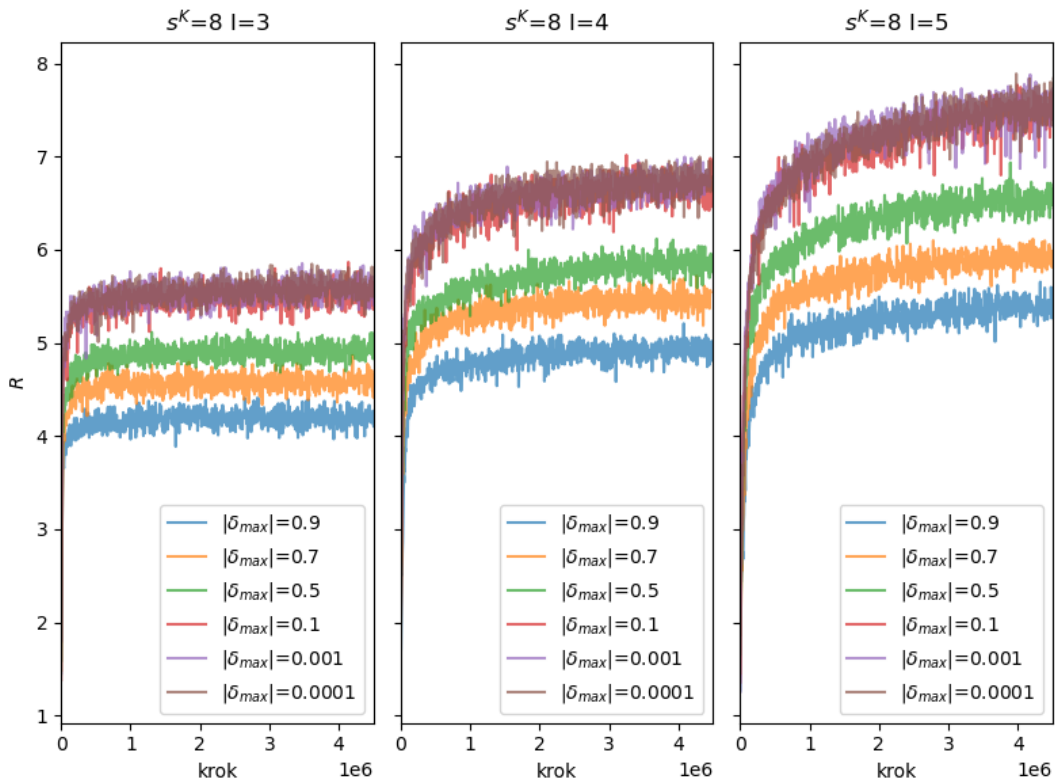
Dla metody heurystycznej przyjęto  $s^N = s^K + 2$

Większe wartości średniej przepływności połączenia TCP uzyskiwano dla praktycznie wszystkich scenariuszy uczenia ze wzmocnieniem. Wyjątkiem jest scenariusz  $s^K=8, I=5$ , w którym nadal algorytm wykorzystujący rozwiązania uczenia ze wzmocnieniem przynosił korzyści względem łączności bez kodowania realizowanej przez jeden interfejs, ale nie były one większe niż dla algorytmu heurystycznego. Widoczne jest, że dla konfiguracji z dużą liczbą akcji proces uczenia przebiegał dużo wolniej i nie osiągał stabilizacji obserwowalnej dla pozostałych scenariuszy. Jednak dla konfiguracji o relatywnie mniejszej złożoności – mniejszej liczbie dostępnych interfejsów oraz symboli źródłowych otrzymane rezultaty pokazują istotny zysk względem zarówno transmisji poprzez pojedynczy interfejs, jak i transmisji przy zastosowaniu wielu interfejsów z kodowaniem zgodnym z algorytmem heurystycznym.

Podobnie jak dla algorytmu heurystycznego, również w przypadku rozwiązania wykorzystującego uczenie ze wzmocnieniem dokonano analizy wpływu ewentualnego błędu pomiarowego na efektywność uczenia algorytmu. Wyniki tej analizy dla różnych wartości  $\delta_{max}$  oraz  $s^K$  i liczby interfejsów zostały zaprezentowane na Rys. 4.20 oraz Rys. 4.21. Widoczna jest podobna zależność jak dla algorytmu heurystycznego – dla  $|\delta_{max}| \geq 0,1$  efektywność znacznie spada i w analizowanym zakresie osiąga znacząco mniejsze wartości  $R$  niż dla  $|\delta_{max}| < 0,1$ . Sytuacja ta jest obserwowalna zarówno dla  $s^K = 4$  jak i  $s^K = 8$ .



Rys. 4.20 Wpływ błędu  $\delta_{max}$  na proces uczenia się agenta DDQN dla  $s^K = 4$



Rys. 4.21 Wpływ błędu  $\delta_{max}$  na proces uczenia się agenta DDQN dla  $s^K = 8$



Obserwowany zysk w postaci zwiększenia możliwej do osiągnięcia przepływności połączenia protokołu TCP oferowany przez zaproponowane rozwiązanie uczenia ze wzmocnieniem wiąże się z istotnym kosztem w postaci czasu potrzebnego na zdobycie odpowiedniego doświadczenia pozwalającego na efektywną pracę agenta. Wynika to głównie z dużego zbioru akcji dostępnych dla agenta [255], co jest widoczne w zmniejszającym się tempie uczenie występującym w scenariuszach z większą liczbą akcji. Jako zakres dalszych prac nad proponowanym rozwiązaniem wskazuje się analizę proponowanych algorytmów rozproszonych [256] i wieloagentowych [257], których zastosowanie daje potencjalne możliwości zwiększenia efektywności procesu uczenia [258].



## 5 OPTIMALIZACJA ZASAD PRACY I PARAMETRÓW PROTOKOŁU TCP W WARUNKACH MORSKICH

---

Niezależnie od sposobu realizacji przełączania wertykalnego przy wykorzystaniu interfejsów bezprzewodowych różnych technik transmisji, czy też zastosowaniu lub nie kodowania sieciowego, przerwy w łączności wynikające z charakterystyki komunikacji na morzu będą zjawiskiem, które nadal może występować. Jedną z prezentowanych wcześniej przyczyn tego zjawiska jest falowanie morza powodujące zmiany kąta pomiędzy anteną nadawczą i odbiorczą, a w konsekwencji zmiany mocy sygnału docierającego do odbiornika obserwowalne zwłaszcza dla systemów łączności pracujących w pasmach gigahercowych. Zjawisko to silnie wpływa na możliwości transmisyjne w łączy i okresowe przerwy w łączności. W niniejszym rozdziale przedstawiono propozycję modyfikacji standardowego zachowania stosu TCP poprzedzoną analizą zaników łączności zarejestrowanych w trakcie badań terenowych. Dane te posłużyły do przygotowania środowiska symulacyjnego, w którym dokonano oceny efektywności autorskiej propozycji modyfikacji funkcjonowania protokołu TCP. Badania przedstawione w rozdziale zostały opisane w publikacji [17].

Zagadnienie występowania zaników łączności jest szczególnie istotne w przypadku szerokopasmowych systemów komunikacyjnych wykorzystujących wyższe częstotliwości i pracujących z antenami oferującymi zawężone wiązki. Problem ten jest bardziej szczegółowo opisany publikacjach [259][55]. Na podstawie przedstawionych tam wyników symulacji można przyjąć, że wahania mocy odbieranej dochodzą nawet do 10 dB dla dwóch anten dipolowych (o maksymalnym zysku 2,1 dBi) umieszczonych na poruszających się statkach. Jednym ze sposobów zmniejszenia wpływu zaników na możliwości transmisji danych jest wykorzystanie specjalnych zestawów antenowych (zastosowanych m.in. w systemie TRITON, dokładniej opisanym w Rozdziale 2). Bardziej uniwersalnym rozwiązaniem będą jednak usprawnienia wprowadzane na poziomie warstw wyższych – jedno z tego typu rozwiązań zostanie opisane w dalszej części tego rozdziału.

Problem wykorzystania protokołu TCP w sieciach bezprzewodowych był badany przez wielu naukowców w ciągu ostatnich kilkunastu lat [260] [261] [262]. Wyniki tych prac przyniosły nam szereg rozszerzeń protokołu TCP, potocznie nazywanych bezprzewodowymi wariantami TCP (Wireless TCP). Niektóre z nich ([263]) implementują



mechanizm, w którym połączenia są rozdzielane w stacji bazowej, gdzie można wykorzystać buforowanie danych, doprowadzając w rezultacie do zestawienia dwóch odrębnych sesji pomiędzy klientem końcowym a stacją bazową oraz pomiędzy stacją bazową i serwerem. W rezultacie rozwiązania te oferują większą przepływność i kontrolę nad retransmisjami, ale jednocześnie łamią architekturę komunikacji od końca do końca występująca w standardowej wersji protokołu TCP. W innej grupie rozwiązań można wyszczególnić podejścia, na potrzeby których zakłada się ścisłą integrację pomiędzy mechanizmami TCP a mechanizmami warstwy łącza danych — są to tzw. mechanizmy międzywarstwe świadome komunikacji z wykorzystaniem protokołu TCP. W przypadku rozwiązania opisanego w [264] mechanizmy warstwy łącza danych są w stanie buforować segmenty TCP, monitorować potwierdzenia ACK (*Acknowledgment*), pomijając zduplikowane potwierdzenia i w razie konieczności retransmitować segment danych. W [265] autorzy proponują sprzężenie zwrotne realizowane pomiędzy warstwą łącza danych a warstwą transportową, pozwalające na klasyfikację przyczyn wpływających na straty segmentów. Jeśli straty są wynikiem przeciążenia, stosowany jest odpowiedni algorytm protokołu TCP, w przeciwnym przypadku przyjmuje się, że są one wynikiem złych warunków pracy sieci bezprzewodowej.

Istnieją również rozwiązania, w których mechanizmy warstwy łącza danych są zaprojektowane tak, aby priorytetyzować ruch TCP [266] lub alokować zasoby radiowe konkretnej techniki transmisji na podstawie parametrów połączenia TCP [267]. Większość z tych mechanizmów jest weryfikowana w lądowym środowisku komunikacyjnym. Zatem nie zbadano w warunkach morskich problemu przerw w łączności i jego wpływu na efektywność transmisji, które dla protokołu warstwy transportowej, jakim jest TCP, mogą mieć szczególnie istotny i negatywny wpływ na mechanizm retransmisji.

Wspomniane wcześniej modyfikacje protokołu TCP rozwiązują problem utraty pakietów, ale nie są odpowiednie dla okresowych przerw w łączności obserwowanych w warunkach morskich. Podczas przerwy w łączności nie ma możliwości odebrania potwierdzenia od węzła korespondującego, w związku z tym, jeżeli obliczony dla tego połączenia czas retransmisji (*Retransmission Timeout* – RTO) jest krótszy niż aktualnie obserwowana przerwa w łączności, realizowana jest retransmisja segmentu danych. Liczba retransmisji w czasie przerwy w łączności zależy od aktualnej wartości parametru RTO. Algorytm obliczania tej wartości jest zdefiniowany w dokumencie RFC 6298 [268].

Wykorzystuje on dwie zmienne:  $sRTT$  (wygładzony czas RTT, czasami nazywany krótkim czasem RTT) oraz  $RTTvar$  odnoszący się do zmienności czasu RTT. Dopóki nie zostanie obliczona aktualna wartość RTT, RTO po stronie odbiorcy przyjmuje wartość 1 sekundy. Dysponując pierwszą pomierzoną wartością RTT, węzeł wyznacza wartości  $sRTT$  oraz  $RTTvar$  korzystając z następujących zależności:

$$sRTT = newRTT \quad (5.1)$$

$$RTTvar = \frac{newRTT}{2} \quad (5.2)$$

Każdy kolejny pomiar nowej wartości RTT ( $newRTT$ ) wykonany zgodnie z algorytmem Karny (jak to jest podane w [268]) skutkuje aktualizacją wartości tych parametrów w następujący sposób:

$$RTTvar = (1 - \beta_{RTT}) RTTvar + \beta_{RTT} |sRTT - newRTT| \quad (5.3)$$

$$sRTT = (1 - \alpha_{RTT}) sRTT + \alpha_{RTT} newRTT \quad (5.4)$$

gdzie, zgodnie z założeniami z [268]  $\alpha_{RTT}=0,125$  i  $\beta_{RTT}=0,25$ . W każdym z tych przypadków wartość RTO wyznaczana jest zgodnie z równaniem:

$$RTO = sRTT + \max(G, K * RTTvar) \quad (5.5)$$

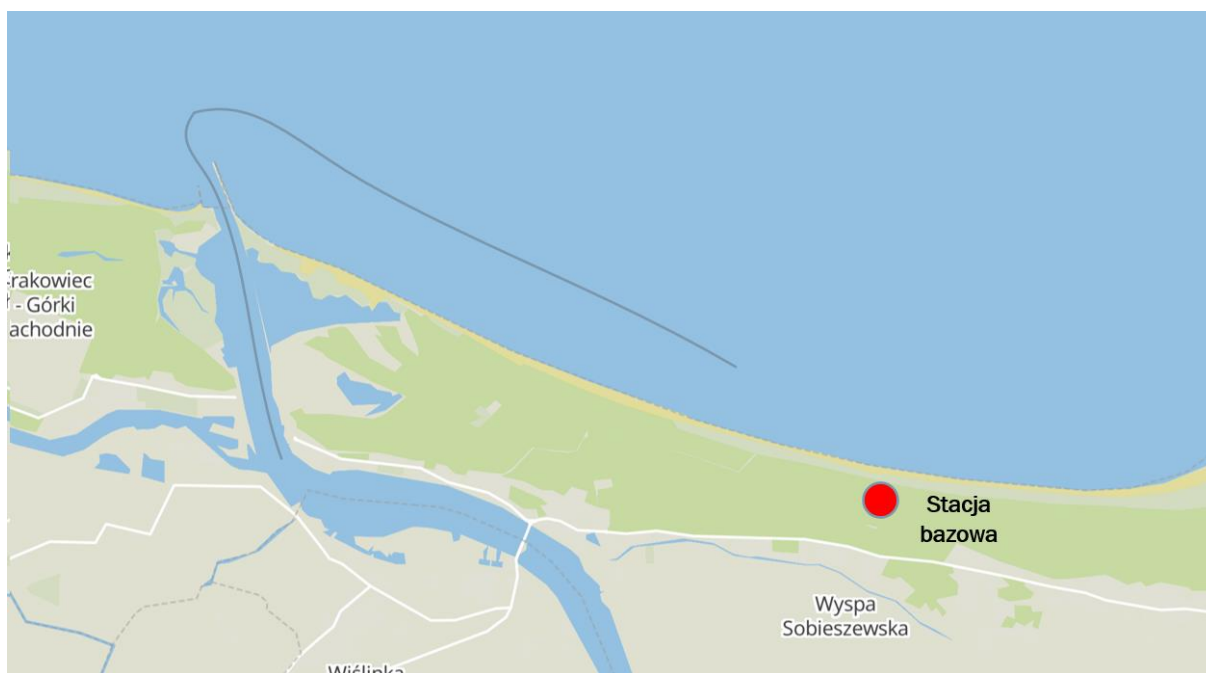
gdzie  $K = 4$ , a  $G$  odnosi się do rozdzielczości zegara (ang. *clock granularity*) i wartość tego parametru wyrażona jest w sekundach.

Ponieważ wartości RTO w dużym stopniu zależą od wartości RTT, nieprawidłowa estymacja RTT spowodowana, np. okresowymi przerwami w łączności prowadzi do błędnych obliczeń RTO. Jako rozwiązanie tego problemu zaproponowano rozszerzenie Forward RTO-Recovery (F-RTO) [269]. Jest to odmiana algorytmu *Limited Transmit* [270] zastosowana do odtworzenia poprawnej wartości RTO. Co ważne, mechanizm ten opiera się na standardowym protokole TCP, wykorzystując standardowy nagłówek i nie wymagając użycia pól opcji, ani dodatkowych flag dostępnych w nagłówku. W artykule [265] jego autorzy badają wydajność komunikacji TCP w kilku różnych scenariuszach powodujących spadek wartości licznika RTO, analizując m.in.: nagłe opóźnienie w sieci,

utracone retransmisje, zgrupowane straty segmentów czy zmianę kolejności odebranych pakietów. Ponieważ konfiguracja rozszerzenia F-RTO jest dostępna we współczesnych systemach operacyjnych opartych na Unixie, a algorytm F-RTO nie został jeszcze zweryfikowany w scenariuszach okresowo przerywanych połączeń, ocena przydatności tego rozwiązania w środowisku morskim została przedstawiona w niniejszym rozdziale.

## 5.1 SYSTEM TESTOWY

W przeprowadzonych pomiarach wpływu ruchów jednostek pływających na wydajność komunikacji bezprzewodowej jako technikę bezprzewodową wybrano system RADWIN Fiber-in-Motion [271] będący częścią Laboratorium Mobilnych Technologii Bezprzewodowych Politechniki Gdańskiej [20]. Instalacje RADWIN Fiber-in-Motion są z powodzeniem wykorzystywane w systemach łączności morskiej na całym świecie, np. przez straż graniczną czy grupy poszukiwawczo-ratownicze.

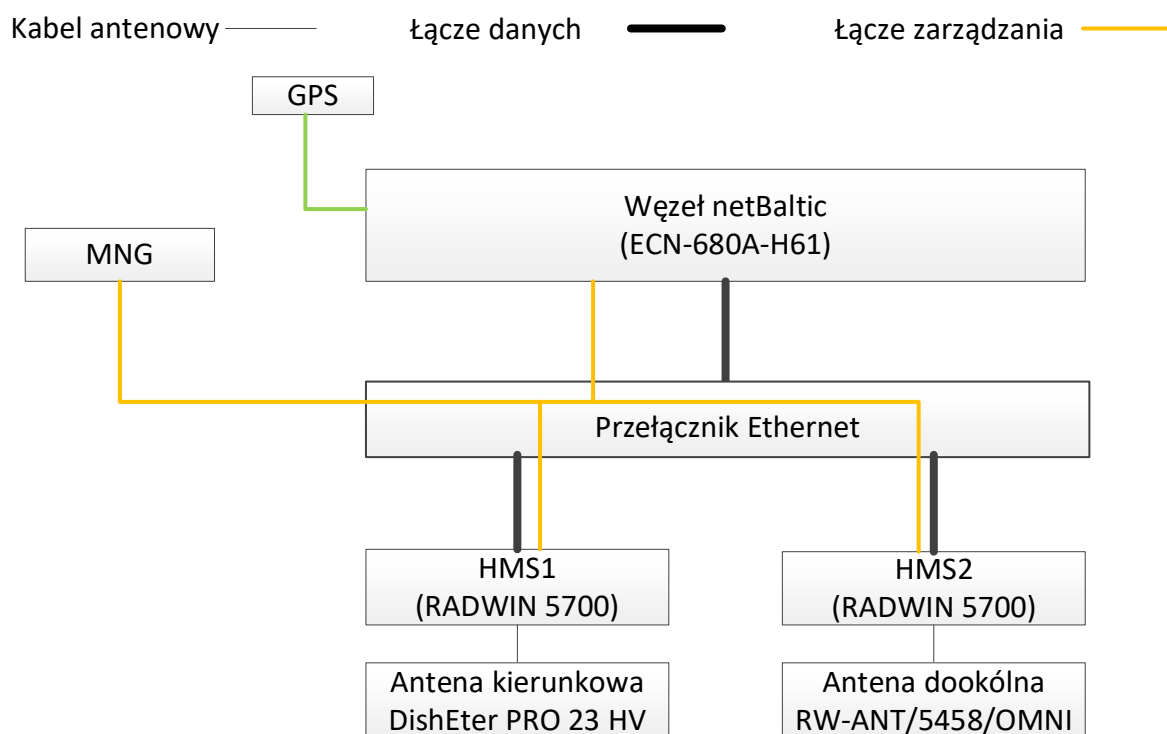


Rys. 5.1 Wizualizacja trasy rejsu

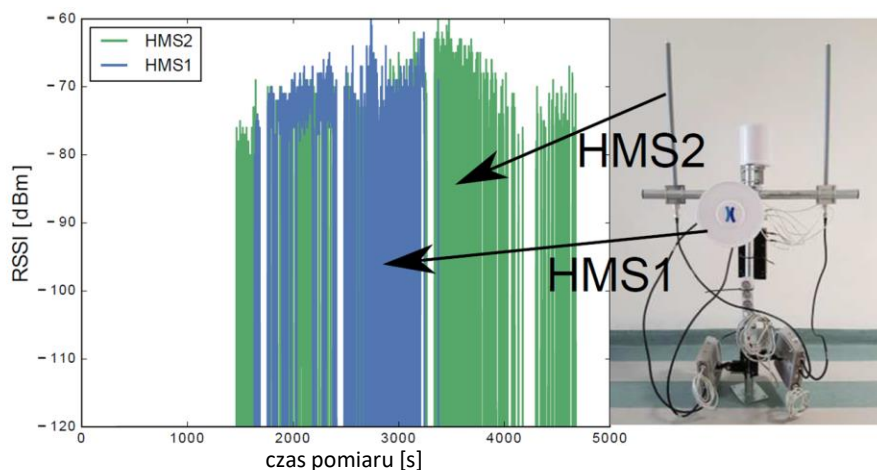
Ze względu na fakt, że małe jednostki pływające są bardziej narażone na wpływ zjawiska falowania, w przeprowadzonej kampanii pomiarowej wykorzystano jacht o długości dziesięciu metrów. Stacja bazowa naszego systemu bezprzewodowego została zlokalizowana w pobliżu brzoza Zatoki Gdańskiej (na Wyspie Sobieszewskiej – Rys. 5.1) na wieży wysokości 45 m. Terminale mobilne zostały zamontowane na dziobie jednostki. Celem eksperymentu była weryfikacja dwóch typów terminali z antenami kierunkowymi

(terminal oznaczony HMS1 – *High capacity Mobile Subscriber #1*) oraz dookólnymi (terminal oznaczony HMS2 – *High capacity Mobile Subscriber #2*). Szczegóły architektury węzła ulokowanego na jednostce pływającej przedstawione zostały na Rys. 5.2. Węzeł zlokalizowany na brzegu jest bardzo podobny, jednak nie ma w nim odbiornika GPS (*Global Positioning System*) podłączonego do węzła głównego, a terminale RADWIN zastąpiono stacją bazową systemu RADWIN.

W celu monitorowania parametrów sygnału w łączach bezprzewodowych (np. RSSI – *Received Signal Strength Indication*), a także łączności w warstwie sieciowej pomiędzy terminalami, zaimplementowano dodatkowe narzędzie, które generowało strumień UDP w obu kierunkach pomiędzy opisanymi węzłami. Cały ruch w obu terminalach został przechwycony i zapisany w plikach *pcap*. Uzyskane w ten sposób zbiory danych umożliwiają analizę okresowych przerw w połączeniach zarówno w warstwie łącza danych, jak i w warstwie sieciowej. Na Rys. 5.3 przedstawiono wyniki przykładowego pomiaru RSSI dla obu anten użytych w kampanii. Wartości w przedziale od -80 dBm do -60 dBm odnoszą się do akceptowalnych warunków połączeń. Wartość -120 dBm zgłaszana była przez terminal w chwilach utraty połączenia.



Rys. 5.2 Architektura systemu testowego

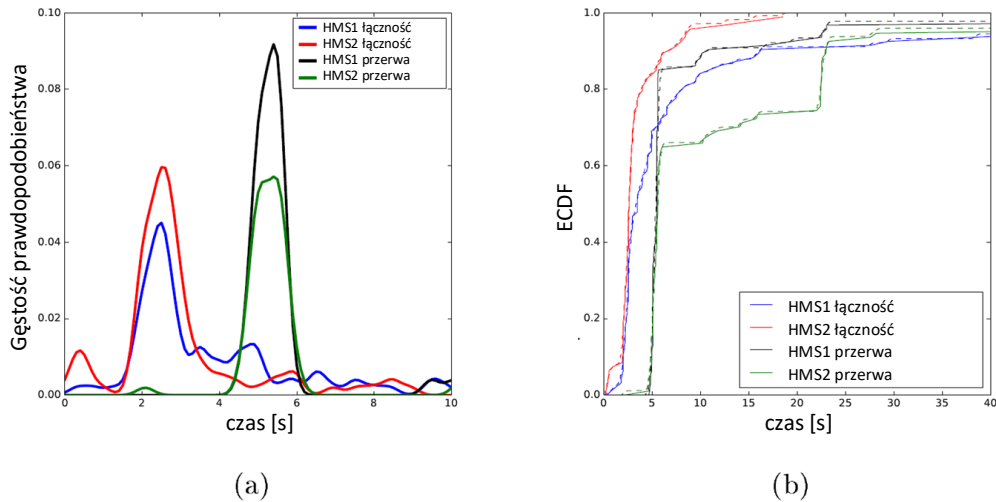


Rys. 5.3 Wyniki pomiarów parametru RSSI i zestaw testowy

Z zebranych danych wynika, że niezależnie od zastosowanego w testach rodzaju anten, przerwy w możliwości komunikacji poprzez łącza bezprzewodowe mają podobny rozkład. W systemie RADWIN Fiber-in-Motion wykorzystuje się przydział szczelin czasowych dla transmisji danych użytkowników końcowych, a jego terminale muszą być zsynchronizowane ze stacją bazową RADWIN. Synchronizacja terminala RADWIN w środowisku morskim trwała około 4,5-5 s. Krótsze przerwy w łączności praktycznie nie były obserwowane. Średnia przerwa w łączności wynosiła 9,3 s oraz 11,3 s, odpowiednio dla HMS1 i HMS2. Natomiast średni czas łączności wynosił 8,9 s dla HMS1 i 3,4 s dla HMS2.

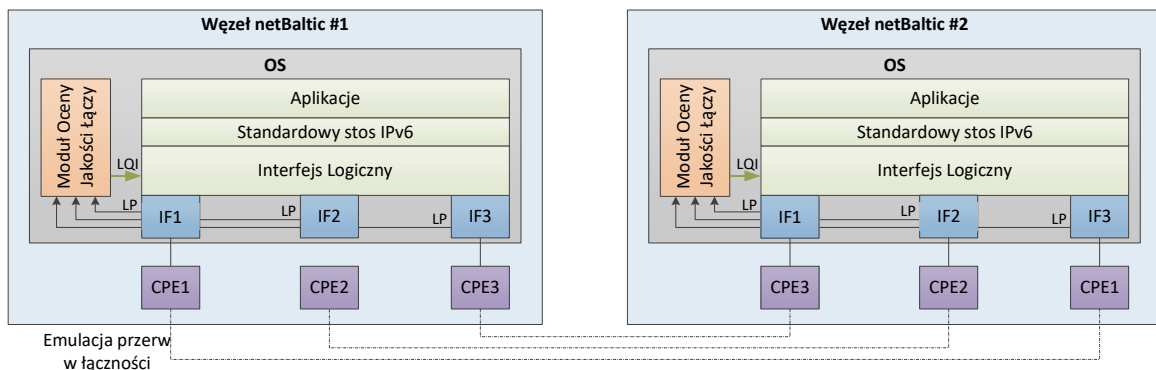
Weryfikacja estymacji funkcji gęstości prawdopodobieństwa przedstawiona jest na Rys. 5.4. Na tym samym wykresie przedstawiono empiryczne dystrybuanty okresów z łącznością i przerw w łączności dla danych pomiarowych (linie ciągłe) oraz wartości wygenerowanych zgodnie z estymowanymi funkcjami gęstości prawdopodobieństwa (linie przerywane). Do estymacji wykorzystano metodę Kernel Density Estimation [272].





Rys. 5.4 Wynik analizy przerw w łączności obserwowanych w trakcie pomiarów: a) Estymacja funkcji gęstości prawdopodobieństwa; b) Dystrybuanta empiryczna dla pomierzonych danych (linie ciągłe) i dane wygenerowane na podstawie oszacowanej gęstości prawdopodobieństwa (linie przerywane)

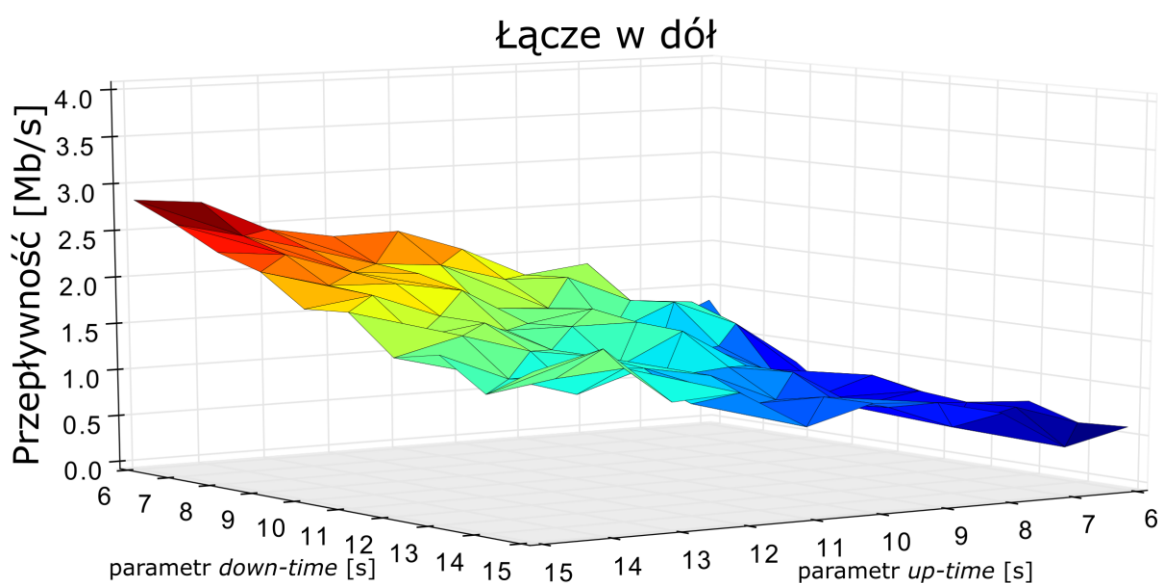
Charakterystykę łącza oszacowaną na podstawie danych zgromadzonych w trakcie eksperymentów przeprowadzonych w rzeczywistym środowisku wykorzystano do modelowania parametrów łączności morskiej w środowisku symulacyjnym. W celu weryfikacji wpływu okresowych przerw w łączności w łączach bezprzewodowych na komunikację realizowaną z wykorzystaniem protokołu TCP przygotowano dedykowane środowisko symulacyjne. Ponieważ przedstawione badania były częścią projektu netBaltic, zaimplementowane modele są zgodne z architekturą węzła netBaltic. Środowisko testowe z dwoma węzłami systemu zostało przedstawione na Rys. 5.5. Węzeł systemu został zamodelowany jako zestaw maszyn wirtualnych, z których jedna odnosi się do głównego węzła netBaltic, a pozostałe pełnią funkcję zewnętrznych urządzeń CPE (*Customer-Premises Equipment*).



Rys. 5.5 Architektura systemu symulacyjnego (LP – parametry łącza, OS – system operacyjny, IF – interfejs fizyczny, CPE – terminal zewnętrzny)

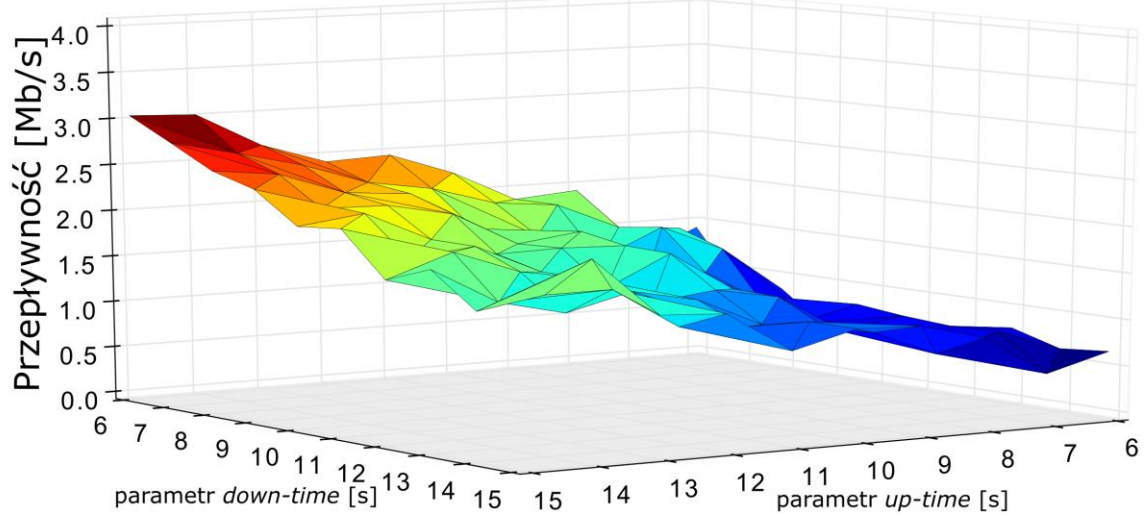
## 5.2 WYNIKI BADAŃ

Chwilowe utraty połączenia pomiędzy dwoma węzłami emulowano za pomocą dedykowanego skryptu zbudowanego na bazie narzędzi *ip* [273] oraz *tc* [274], okresowo blokując i odblokowując możliwość transmisji danych pomiędzy połączonymi CPE. Wartości przepustowości łącza pomiędzy CPE zostały ograniczone do 4 Mb/s na poziomie systemu wirtualizującego. Do oceny przepływności połączeń testowych wykorzystano powszechnie stosowane narzędzie *iperf* [275]. Dla każdej z par opisujących czas łączności (*up-time*) oraz czas przerwy w łączności (*down-time*) analizowanych w zakresie od 6 s do 15 s przeprowadzono dwadzieścia połączeń TCP trwających 60 sekund każde. Wartości średnie przepustowości otrzymanych dla przebadanych scenariuszy wykorzystujących standardową konfigurację stosu sieciowego systemu Linux z algorytmem Reno zaprezentowano na Rys. 5.6 oraz Rys. 5.7 pokazując wyniki odpowiednio dla łącza w dół i dla łącza w górę.



Rys. 5.6 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP – łącze w dół

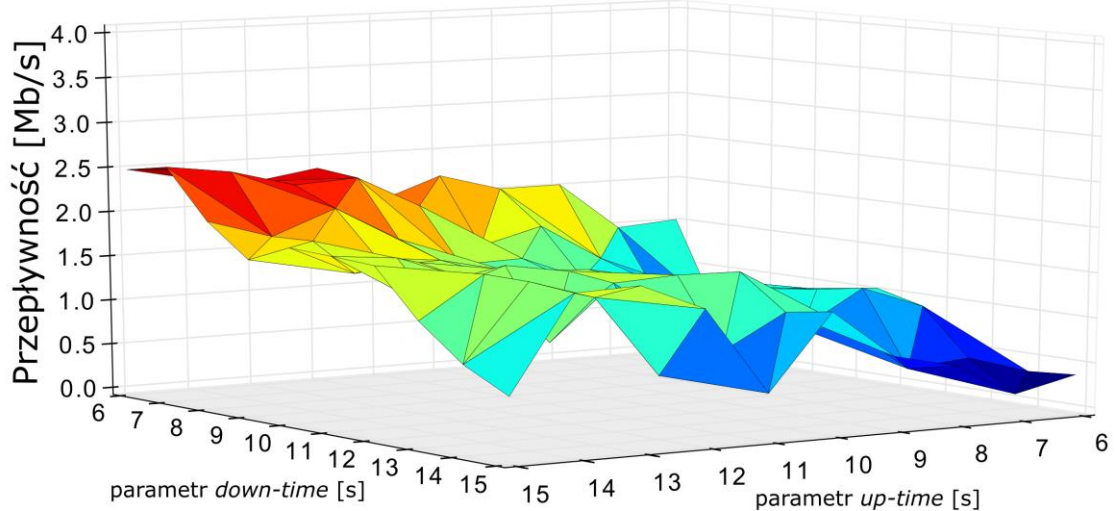
### Łącze w górę



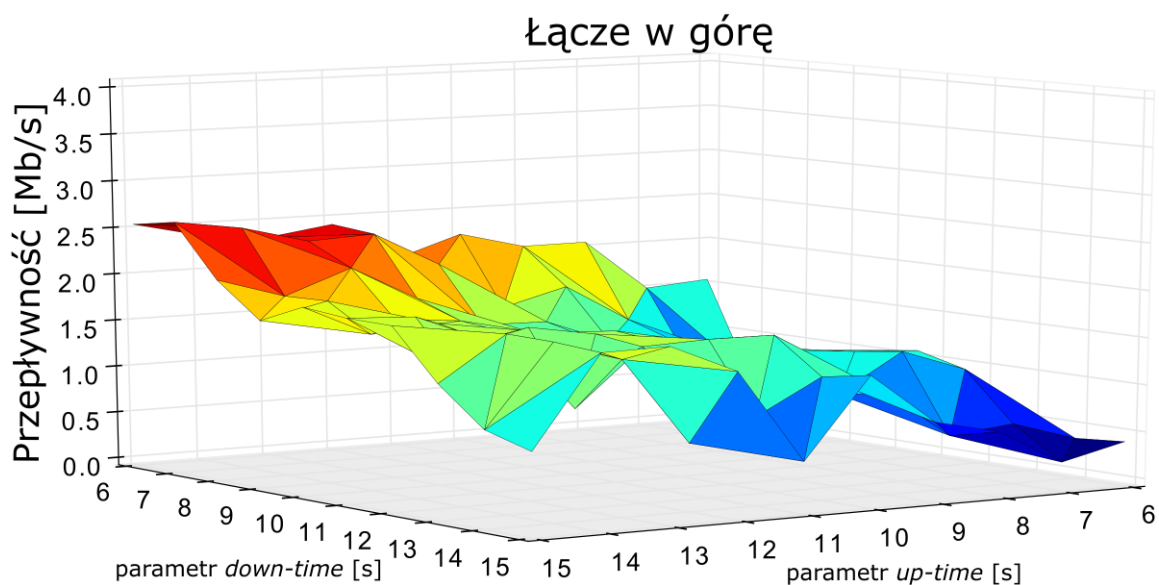
Rys. 5.7 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP – łącze w górę

Analogiczne badania przeprowadzono dla połączeń wykorzystujących wspomniany wcześniej mechanizm F-RTO, a ich wyniki zaprezentowano na Rys. 5.8 oraz Rys. 5.9. Ponieważ rozszerzenie F-RTO w ocenianych scenariuszach oferuje komunikację o niższych wartościach średniej przepływności, w dalszych pracach nie wykorzystano tego rozszerzenia.

### Łącze w dół



Rys. 5.8 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP z rozszerzeniem F-RTO – łącze w dół



Rys. 5.9 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP z rozszerzeniem F-RTO – łącze w górę

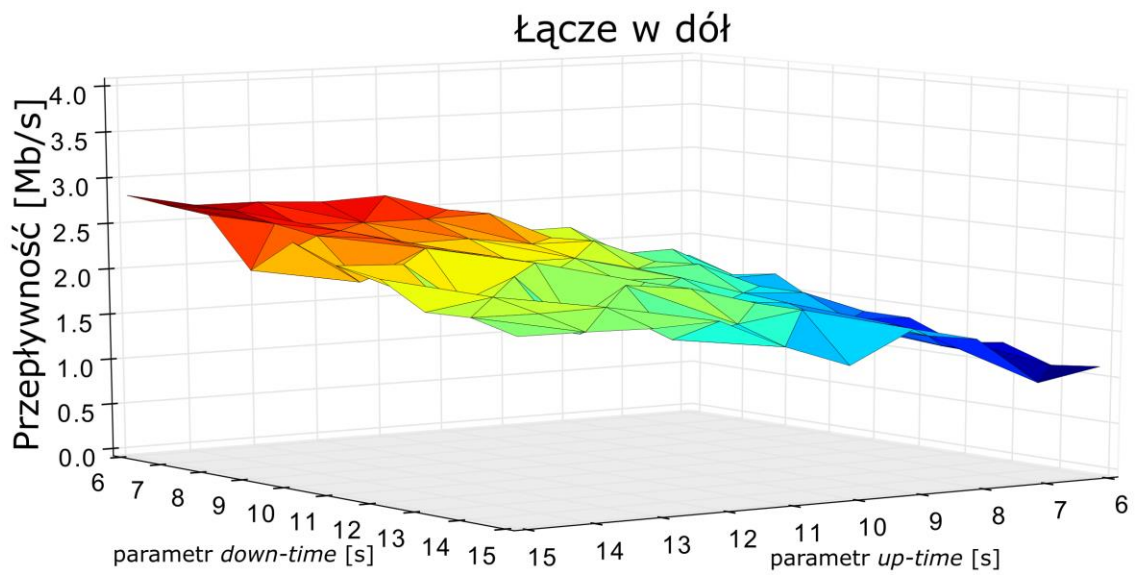
Szczegółowa analiza wpływu obserwowanych przerw w łączności na przepływność połączeń TCP pozwala stwierdzić, że przy standardowej konfiguracji stosu TCP, efektywność takiej komunikacji jest bardzo niska. W związku, z czym postanowiono zmodyfikować standardową implementację TCP oraz dostosować niektóre parametry TCP tak, aby wprowadzić ograniczenie czasu występującego pomiędzy kolejnymi retransmisjami. W tym celu wykorzystano zmodyfikowane jądro systemu CentOS (kernel 4.9 [276]) dające możliwość zmiany domyślnej wartości parametru *TCP\_RTO\_MAX*. Zmienna ta stanowi górną granicę wartości RTO obliczanych zgodnie z procedurą opisaną we wcześniejszej części rozdziału. Domyślna wartość tego parametru w systemie Linux wynosi 120 s.

Skrócenie czasu pomiędzy retransmisjami kolejnych segmentów może wpłynąć na czas, po którym przerwane połączenie zostanie uznane za nieaktywne. Ograniczając od góry wartość RTO, aby zminimalizować wpływ wprowadzanych modyfikacji, należy zwiększyć maksymalną liczbę dozwolonych retransmisji. W systemie Linux parametr ten można regulować za pomocą zmiennej *TCP\_RETRIES2*, której domyślna wartość wynosi 15. Można przyjąć, że czas potrzebny do wykrycia, że aktualne połączenie powinno zostać zerwane jest nie dłuższy niż  $TCP\_RETRIES2 \times TCP\_RTO\_MAX$ , co dla wartości domyślnych wynosi 1800 s. Mając świadomość zaleceń zdefiniowanych w [268], na potrzeby przeprowadzonych eksperymentów wartość parametru *TCP\_RTO\_MAX* została ustawiona na 1 s. Aby utrzymać stały czas potrzebny na rozpoznanie zerwania bieżącego

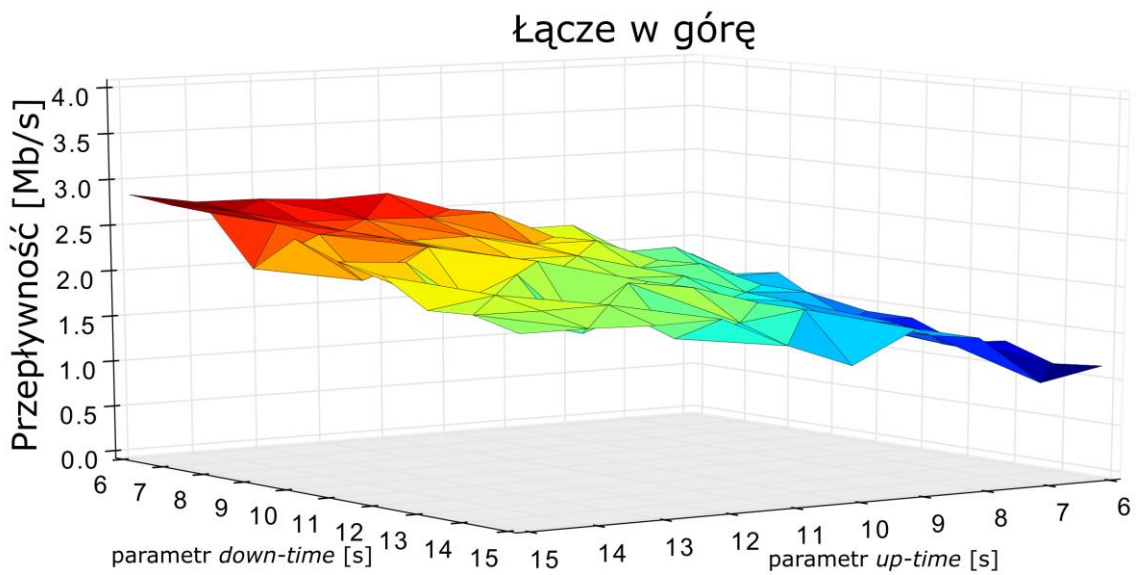
połączenia, wartość parametru *TCP\_RETRIES2* została zmieniona na 1800. Narzędzia wykorzystywane w procedurach ewaluacyjnych nie oferują możliwości ponownego nawiązywania połączenia TCP w trakcie prowadzonego testu, w związku z czym istotne jest odpowiednie ustawienie powyższych parametrów.

Wprowadzona modyfikacja może wpływać na zdolność reagowania na przeciążenia sieci, jednak w systemach bezprzewodowych wykorzystujących ściśle mechanizmy alokacji zasobów (jak RADWIN Fiber-in-Motion), a w szczególności w obszarze C systemu netBaltic, gdzie spodziewana jest mniejsza gęstość jednostek [23], proponowane rozwiązanie będzie korzystne. Co więcej, chociaż wprowadzona modyfikacja jest niezgodna z obowiązującymi zaleceniami konfiguracji stosu TCP, co zostanie pokazane w dalszej części pracy, rozwiązanie to zapewnia kompatybilność i nie powoduje utraty możliwości komunikacji z węzłami implementującymi standardową konfigurację stosu TCP.

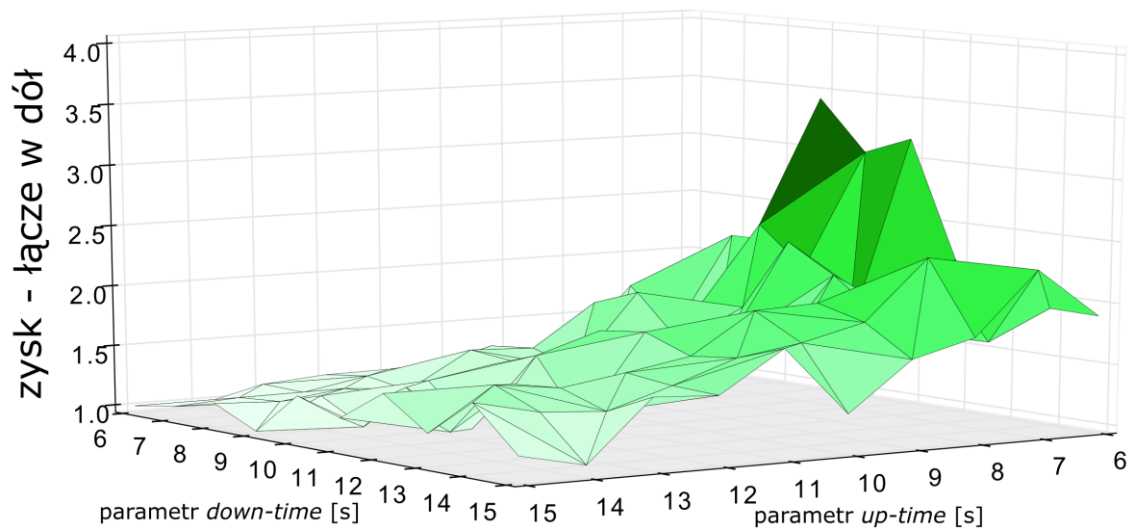
Wyniki odnoszące się do średniej przepływności połączeń TCP realizowanych zgodnie z zaproponowaną modyfikacją przedstawiono na Rys. 5.10 oraz Rys. 5.11 odpowiednio dla łącza w dół i dla łącza w górę. Natomiast zysk określony jako stosunek średniej przepływności połączeń TCP uzyskanych dla zaproponowanego rozwiązania do średnich przepływności połączeń o standardowej konfiguracji zostały zaprezentowane na Rys. 5.12 i Rys. 5.13 odpowiednio dla łącza w górę i łącza w dół. Analizując zaprezentowane wykresy, można zauważyć, że zaproponowany mechanizm przynosi znaczący wzrost przepływności połączeń TCP, szczególnie dla scenariuszy o stosunkowo niskich wartościach czasu łączności (*up-time*) i wysokich wartościach czasu przerwy łączności (*down-time*). Dla *up-time* równego 6 s i *down-time* około 9 s, średnia przepływność oferowana przez proponowane rozwiązanie jest ponad 3 razy większa niż średnia przepływność standardowych połączeń TCP.



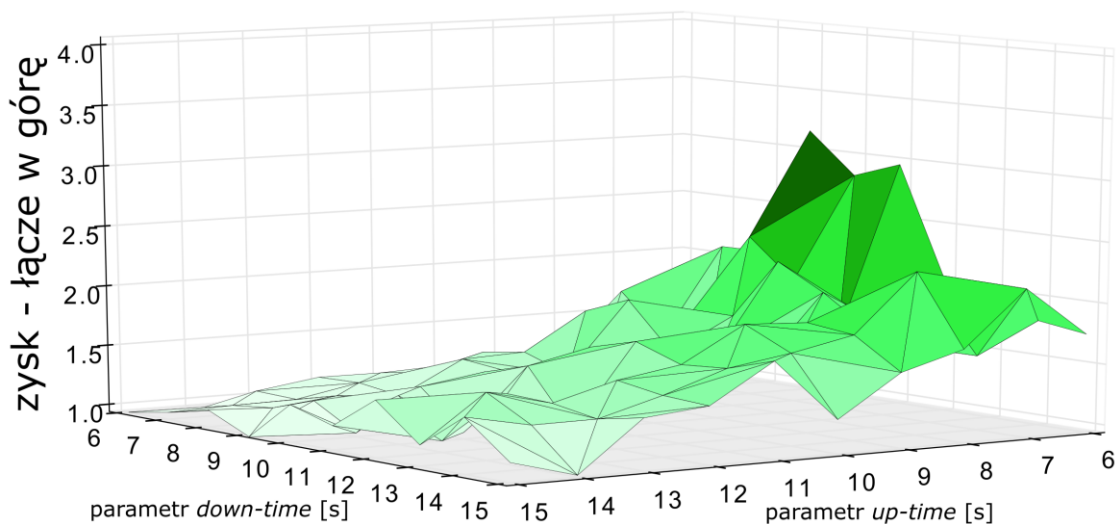
Rys. 5.10 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP dla zaproponowanej modyfikacji – łącze w dół



Rys. 5.11 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP dla zaproponowanej modyfikacji – łącze w górę



Rys. 5.12 Zysk z zastosowanej metody dla łącza w dół



Rys. 5.13 Zysk z zastosowanej metody dla łącza w górę

W celu oceny wzrostu efektywności zaproponowanego rozwiązania również z nowszymi algorytmami unikania przeciążenia i w scenariuszach odpowiadających rzeczywistym przypadkom użycia przeprowadzono dodatkowe testy z wykorzystaniem wariantu TCP Cubic (modyfikacje wprowadzone przez ten wariant zostały opisane w Rozdziale 4.). Wyniki przeprowadzonej analizy zostały przedstawione w Tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Ocena wpływu proponowanych modyfikacji na protokół TCP Cubic

Wartość parametrów <i>up_time/down_time</i>	TCP Cubic [Mb/s]	modyfikacja TCP Cubic [Mb/s]	Zysk
10/15	1,39	2,24	1,61
6/9	0,62	1,66	2,67
6/6	1,18	2,06	1,75
6/15	0,76	1,23	1,63
15/6	3,04	3,37	1,11
15/15	1,74	2,32	1,33

Aby zweryfikować wzrost wydajności połączeń TCP w praktycznym scenariuszu użycia, przeprowadzono drugi zestaw testów, w którym zmierzono czasy potrzebne do pobrania plików o rozmiarach 2 MB oraz 10 MB zawierających aktualizacje map e-nawigacyjnych. Wymiana plików została przeprowadzona za pomocą polecenia *scp* (które kopiuje pliki pomiędzy węzłami za pomocą zabezpieczonego połączenia SSH (Secure Shell)). Czas trwania przerw w łączności oraz okresów łączności został wygenerowany losowo zgodnie z rozkładem estymowanym na podstawie próbek zgromadzonych w pomiarach środowiska rzeczywistego (por. Rys. 5.4). Wyniki tych testów zostały przedstawione w Tabeli 5.2 prezentującej wartości średnie z 95-procentowymi przedziałami ufności obliczonymi na podstawie 40 różnych połączeń. Standardową i zaproponowaną wersję konfiguracji stosu TCP oznaczono odpowiednio: TCP i mTCP.

Tabela 5.2 Czas potrzebny na pobranie plików w zależności od ich rozmiaru

Rozmiar pliku	TCP – TCP [s]	mTCP – mTCP [s]	mTCP – TCP [s]	TCP – mTCP [s]
10 MB	62,79 ± 25,75	44,83 ± 6,84	46,74 ± 9,98	48,58 ± 9,35
2MB	19,47 ± 7,63	9,03 ± 2,59	10,89 ± 4,17	10,82 ± 2,97

Jak pokazują zaprezentowane wyniki, proponowane rozszerzenie konfiguracji protokołu TCP skutkuje skróceniem średniego czasu pobierania plików w każdym z analizowanych scenariuszy. Średnia wartość czasu potrzebnego na pobranie pliku zmniejsza się do 53% dla małych plików (2 MB) oraz do 28% dla plików o wielkości 10 MB. Widoczny jest również, wspomniany wcześniej, brak wymogu implementacji proponowanego rozwiązania w obu komunikujących się węzłach. Możliwość współpracy pomiędzy standardową a opisaną w niniejszej pracy konfiguracją TCP została zachowana i również pozwalała na uzyskiwanie czasów mniejszych niż dla standardowego połączenia TCP.



## 6 WNIOSKI KOŃCOWE

---

Istniejące rozwiązania systemów łączności dedykowanych komunikacji jednostek pływających, będące w dużej mierze adaptacją obecnych już w tym środowisku od dłuższego czasu technik transmisji, cechują się istotnymi ograniczeniami, głównie w postaci niewielkiej przepustowości, co przyczynia się do trudności we wdrażaniu nowych usług dedykowanych środowisku morskemu, w szczególności szeregu nowych usług e-nawigacji. Obserwacja kierunków rozwoju innowacyjnych rozwiązań z zakresu szerokopasmowej komunikacji na morzu pozwala zauważyć istotny trend związany z integracją heterogenicznych sieci bezprzewodowych, umożliwiającą wykorzystanie różnych składowych takich systemów.

Mając na uwadze istotne korzyści wynikające z potencjalnego wdrożenia sieci heterogenicznych, przy uwzględnieniu nowych wyzwań pojawiających się przy projektowaniu i implementacji tego typu systemów, w niniejszej rozprawie przedstawiono szereg rozwiązań ukierunkowanych na poprawę efektywności komunikacji realizowanej w środowisku morskim. W szczególności skupiono się na:

- rozwiązaniach pozwalających na dynamiczne przełączanie pomiędzy dostępnymi łączami poprzez dedykowane rozwiązania miękkiego przełączania, pozwalające na znaczną redukcję czasu przerwy w łączności wynikającej z tego przełączania;
- metodach wyboru łącza korzystających z sieci neuronowych pozwalających na znaczną redukcję ilości danych potrzebnych do realizacji oceny łącza;
- wprowadzeniu rozwiązań kodowania sieciowego niwelującego skutki niekorzystnych warunków propagacyjnych panujących w środowisku morskim;
- dostosowaniu konfiguracji stosu TCP poprawiającej efektywność transmisji danych przy występowaniu przerw w łączności obserwowanych w środowisku morskim.

Na potrzeby badań, realizowanych w każdym z powyższych obszarów, przygotowane zostały niezbędne narzędzia (modele symulacyjne, modele analityczne, stanowiska badawcze) dostosowane do poziomu gotowości technologicznej proponowanych rozwiązań, pozwalające na analizę korzyści wynikających z ich

zastosowania. W każdym z opisanych obszarów zaproponowano autorskie rozwiązania, które pozwalają na usprawnienie komunikacji w heterogenicznych sieciach łączności na morzu i prowadzą do zwiększenia jej efektywności.

Do najważniejszych osiągnięć autora, przedstawionych w niniejszej rozprawie, zaliczyć można:

1. Ocenę aktualnych kierunków rozwoju systemów komunikacji dedykowanych łączności między jednostkami pływającymi;
2. Ocenę wymagań stawianych systemom łączności, a wynikających z wdrażania usług e-nawigacji w docelowym środowisku ich pracy;
3. Opracowanie architektury węzła pozwalającej na rozdzielenie mechanizmów zarządzania mobilnością – mechanizmów wyboru łącza oraz mechanizmów realizacji przełączenia;
4. Opracowanie schematu przełączania LISH stanowiącego wdrożenie idei miękkiego przełączania w systemie PMIPv6;
5. Weryfikację zaproponowanej metody w postaci:
  - a. oceny porównawczej z wykorzystaniem modelu analitycznego,
  - b. oceny w rzeczywistym środowisku w trakcie kampanii pomiarowych realizowanych w projekcie netBaltic;
6. Przygotowanie środowiska symulacyjnego pozwalającego na modelowanie zjawisk istotnych z punktu widzenia propagacji sygnałów radiowych w środowisku morskim;
7. Opracowanie dwóch wariantów metody wyboru łącza pozwalających na zmniejszenie narzutu danych potrzebnych do przeprowadzenia oceny:
  - a. DLR-LEM,
  - b. SDL-LEM;
8. Integrację opracowanych rozwiązań i ich weryfikację w środowisku laboratoryjnym;
9. Opracowanie modelu analitycznego pozwalającego na ocenę efektywności zastosowania kodowania sieciowego realizowanego w zaproponowanym systemie zarządzania mobilnością;
10. Ocenę efektywności zastosowania kodowania sieciowego realizowanego dla jednego interfejsu;

11. Opracowanie i weryfikację heurystycznego algorytmu alokowania segmentów kodowania sieciowego na dostępnych interfejsach węzła wielointerfejsowego;
12. Opracowanie i weryfikację algorytmu uczenia ze wzmocnieniem określającego sposób lokowania segmentów kodowania sieciowego na dostępnych interfejsach węzła wielointerfejsowego;
13. Weryfikację wrażliwości opracowanych algorytmów na błąd pomiaru wartości stanowiących ich dane wejściowe;
14. Opracowanie i weryfikację rozszerzenia protokołu TCP zwiększającego średnią przepływność połączenia w środowisku z zanikami łączności.

Mając na uwadze zaprezentowane wyniki pokazujące korzyści wynikające z zastosowania mechanizmów integracji heterogenicznych systemów transmisji danych z wykorzystaniem miękkiego przełączania oraz kodowania sieciowego i stanowiące potwierdzenie poprawy efektywności transmisji danych w bezprzewodowych sieciach na morzu należy uznać, że teza rozprawy została w pełni udowodniona.

## **6.1 KIERUNKI DALESZYCH PRAC**

Szerokie spojrzenie na temat niniejszej rozprawy, uwzględniające szereg zagadnień związanych m.in. z mechanizmami zarządzania mobilnością węzłów, algorytmami wyboru łącza, kodowaniem sieciowym, w tym również w środowisku wielointerfejsowym, powodują, że tematyka badań przedstawionych w rozprawie może być kontynuowana. Istotność otrzymanych rezultatów, potencjalne korzyści wynikające z zastosowania proponowanych rozwiązań oraz ich wysoka aktualność motywują do przygotowania planów przyszłych prac i wskazania kierunków dalszych badań.

Autor rozprawy, jako jeden z głównych wykonawców projektu „PL-5G: Krajowe laboratorium sieci i usług 5G wraz z otoczeniem”, w ramach, którego przewidziane jest Laboratorium wykorzystania rozwiązań systemów 5G na potrzeby komunikacji na morzu, planuje kontynuację opisanych prac zwłaszcza w zakresie weryfikacji zintegrowanych rozwiązań w docelowym środowisku ich pracy. Wyniki te mogą być szczególnie interesujące w kontekście pojawiających się coraz częściej autonomicznych jednostek pływających, dla których zastosowanie sieci IP może być szczególnie istotne. Rezultaty pierwszych badań w tym zakresie zostały opublikowane w pracy [28], której autor rozprawy jest współautorem.

Korzyści wynikające z zastosowania heterogenicznych systemów łączności mogą znaleźć zastosowanie nie tylko na potrzeby obsługi jednostek pływających, ale również dedykowanych systemów pomiarowych. Przykładem takiego systemu jest rozwiązanie planowane do wdrożenia w projekcie *HealthyRiver*, którego głównym celem jest weryfikacja potencjalnych przyczyn chorób obserwowanych u ryb łososiowych. Projekt jest obecnie na etapie oceny merytorycznej w programie OPUS24, a autor rozprawy jest przewidziany jako jedna z osób odpowiedzialnych za opracowanie i wdrożenie heterogenicznego systemu łączności pozwalającego na zbieranie danych pomiarowych oraz sterowanie aparaturą badawczą ulokowaną na bojach pomiarowych.

Obserwowany rozwój istniejących oraz pojawiające się propozycje nowych rozwiązań w zakresie algorytmów i metod uczenia maszynowego wskazuje na potencjalne korzyści dalszych badań dotyczących ich zastosowania na potrzeby poprawy efektywności systemów łączności na morzu. W kontekście zaprezentowanych w rozprawie rozwiązań szczególnie interesujące wydają się rozwiązania uczenia rozproszonego, czy rozwiązania uczenia ze wzmocnieniem realizowanego w federacjach, które mogą być zastosowane do skrócenia czasu uczenia zaproponowanego algorytmu.

## SPIS ILUSTRACJI

---

Rys. 1.1 Międzynarodowy handel morski według rodzajów ładunków (wyrażonych w milionach ton ładunków) [2].....	13
Rys. 1.2 Schemat powiązań pomiędzy poszczególnymi rozdziałami pracy.....	17
Rys. 2.1 Komponenty sieci wewnętrznej jednostki pływającej.....	25
Rys. 2.2 Ilustracja modeli propagacyjnych charakterystycznych dla środowiska morskiego .....	33
Rys. 2.3 Porównanie tłumienia fali elektromagnetycznej dla wybranych modeli propagacyjnych.....	34
Rys. 2.4 Porównanie przepływności połączeń TCP dla wybranych modeli propagacyjnych – a) model propagacji w wolnej przestrzeni, b) model dwusieczkowy, c) model trójściżkowy, d) model trójściżkowy + ITU-R P.526 .....	37
Rys. 2.5 Wizualizacja sześciu punktów swobody jednostek pływających i nazw ruchów [63].....	37
Rys. 2.6 Wpływ falowania na połączenie TCP: a) model nieuwzględniający falowania , b) model z falowaniem $\theta_{max} = 4^{\circ}$ c) model z falowaniem $\theta_{max} = 8^{\circ}$ .....	40
Rys. 2.7 Modele komunikacji i pasma częstotliwościowe wykorzystywane w systemie VDES [5] .....	43
Rys. 2.8 Spadek efektywności transmisji w systemie VDES wraz ze zwiększającą się liczbą terminali (na podstawie [83]).....	45
Rys. 2.9 Średnia liczba jednostek pływających występujących w zasięgu wybranych portów morskich na przestrzeni 02.2018 – 01.2019 .....	46
Rys. 2.10 Dzienna liczba jednostek pływających występujących w zasięgu wybranych portów morskich na przestrzeni 02.2018 – 01.2019 .....	47
Rys. 2.11 Podział obszaru działania systemu netBaltic na trzy strefy zróżnicowane sposobem komunikacji.....	52
Rys. 2.12 Odniesienie architektury węzła systemu netBaltic od modelu ISO-OSI.....	54
Rys. 3.1 Fazy przełączania w środowisku sieci heterogenicznych.....	61
Rys. 3.2 Porównanie struktur sieci neuronowych — płytkiej a) oraz głębokiej b) .....	70
Rys. 3.3 Przykładowa struktura sieci splotowej [157].....	71
Rys. 3.4 Struktura sieci rekurencyjnej .....	72
Rys. 3.5 Architektura sieci LSTM .....	73

Rys. 3.6 Porównanie wartości <i>pitch</i> dla dwóch przebiegów z tą samą wartością <i>random seed</i> .....	76
Rys. 3.7 Charakterystyka anteny stacji bazowej.....	78
Rys. 3.8 Charakterystyka anteny jednostki pływającej .....	78
Rys. 3.9 Wartości parametru $\eta_A$ i $\eta_T$ dla różnej liczby dostępnych interfejsów <i>I</i> - wybór łącza na podstawie aktywnego testu TCP .....	82
Rys. 3.10 Analiza efektywności wyboru łącza na podstawie RTT – miary $\eta_A$ i $\eta_T$ dla różnej liczby interfejsów.....	85
Rys. 3.11 Analiza efektywności wyboru łącza na podstawie PER – miary $\eta_A$ i $\eta_T$ dla różnej liczby interfejsów.....	85
Rys. 3.12 Schemat wyboru łącza z wykorzystaniem metody DLR-LEM .....	87
Rys. 3.13 Schemat wyboru łącza z wykorzystaniem metody SDL-LEM.....	88
Rys. 3.14 Ilustracja fazy zbierania danych opisujących łącza .....	89
Rys. 3.15 Przykład procedury segmentacji ilustrujący wpływ parametrów ( $t_o$ , $t_s$ ) na uzyskanie trzech segmentów ( $M=3$ ) .....	90
Rys. 3.16 Struktura sieci DLR-LEM .....	91
Rys. 3.17 Struktura sieci SDL-LEM.....	91
Rys. 3.18 Schemat przetwarzania danych wejściowych.....	93
Rys. 3.19 Ocena efektywności wyboru łącza realizowanego zgodnie z metodą DLR-LEM .....	93
Rys. 3.20 Ocena efektywności wyboru łącza realizowanego zgodnie z metodą SDL-LEM .....	94
Rys. 3.21 Porównanie efektywności proponowanych metod z wyborem łącza na podstawie aktywnego testu TCP .....	94
Rys. 3.22 Porównanie efektywności proponowanych metod dla różnych zbiorów testowych – metoda DLR-LEM .....	95
Rys. 3.23 Porównanie efektywności proponowanych metod dla różnych zbiorów testowych – metoda SDL-LEM .....	95
Rys. 3.24 Porównanie efektywności i narzutu wprowadzonego przez analizowane metody dla zbioru testowego B (* - RTT; • - PER, ■ - aktywny test TCP; † - RDL-LEM M4; ◇ - RDL-LEM M8; ◆ - RDL-LEM M12; ▲ - SDL-LEM M4; ◀ - SDL-LEM M8; ▶ - SDL-LEM M12) .....	96
Rys. 3.25 Scenariusze obsługi mobilności w komunikacji przybrzeżnej .....	98



Rys. 3.26 Architektura systemu PMIPv6.....	102
Rys. 3.27 Wymiana wiadomości zgodnie z wariantem proaktywnym FH-PMIP .....	104
Rys. 3.28 Wymiana wiadomości zgodnie z wariantem reaktywnym FH-PMIP .....	105
Rys. 3.29 Umieszczenie interfejsu logicznego w stosie sieciowym węzła .....	106
Rys. 3.30 Wymiana wiadomości zgodnie z procedurą LISH [13] .....	107
Rys. 3.31 Wizualizacja scenariuszy uwzględnionych w analizie – a) FH-PMIPv6 tryb proaktywny , b) FH-PMIPv6 tryb reaktywny, c) PMIPv6, d) LISH .....	108
Rys. 3.32 Ocena wpływu wybranych parametrów na efektywność realizacji przełączania z wykorzystaniem analizowanych metod przełączania .....	112
Rys. 3.33 Ocena wpływu czasu raportowania na efektywność analizowanych metod przełączania.....	113
Rys. 3.34 Analiza wpływu czasu przełączania w warstwie L2 na efektywność wybranych metod.....	114
Rys. 3.35 Konfiguracje systemu testowego wykorzystywanego do analizy efektywności przełączania.....	115
Rys. 3.36 Przykładowe miejsca instalacji: a) punktu dostępowego, b) anten na jednostce pływającej .....	116
Rys. 3.37 Wizualizacja punktów dostępowych ulokowanych na brzegu (a) oraz trasa rejsu testowego (b).....	116
Rys. 3.38 Dystrybuanta empiryczna przerwy w łączności dla analizowanych przełączeń .....	118
Rys. 3.39 Histogram przerw w transmisji danych dla łączności ład - R/V Oceania (odległość 14 km, TDMA 5.8 GHz, spokojne morze).....	119
Rys. 3.40 Architektura stosu sieciowego węzła systemu dla mechanizmów obsługi mobilności zaproponowanych w systemie netBaltic .....	120
Rys. 3.41 Scenariusz obsługi mobilności przy zmianie techniki transmisji .....	122
Rys. 3.42 Scenariusz obsługi mobilności przy zmianie ścieżki w sieci typu mesh.....	123
Rys. 3.43 Przepływność połączenia TCP w trakcie wychodzenia z zasięgu sieci bezprzewodowe przy a) braku mechanizmów zarządzania mobilnością; b) standardowej implementacji PMIPv6 .....	125
Rys. 3.44 Analiza parametrów połączenia TCP dla algorytmu New Reno w trakcie przełączania pomiędzy różnymi technikami transmisji.....	126
Rys. 3.45 Analiza parametrów połączenia TCP dla algorytmu Cubic w trakcie przełączania pomiędzy różnymi technikami transmisji.....	127

Rys. 3.46 Architektura węzła klienckiego wykorzystanego w ramach testów integracyjnych .....	128
Rys. 3.47 Ilustracyjne wyniki działania zintegrowanych mechanizmów wyboru łącza i realizacji przełączania .....	129
Rys. 4.1 Model rozważanej sieci i ulokowanie mechanizmów kodowania/dekodowania .....	133
Rys. 4.2 Schemat dostarczania danych z wykorzystaniem kodu RaptorQ .....	135
Rys. 4.3 Wizualizacja wykorzystywanego modelu dla parametrów $\beta=0,75$ , $N_M=7$ .....	138
Rys. 4.4 Wyniki analizy przepływności połączenia TCP - model bez modyfikacji .....	143
Rys. 4.5 Wyniki analizy przepływności połączenia TCP - model z modyfikacjami .....	144
Rys. 4.6 Przepływność połączenia TCP po zastosowaniu kodowania dla $r=1.5$ .....	147
Rys. 4.7 Przepływność połączenia TCP po zastosowaniu kodowania dla $r=2$ .....	147
Rys. 4.8 Stosunek przepływności połączenia TCP po zastosowaniu kodowania do przepływności połączenia realizowanego przez łącze bez kodowania $r=1.5$ .....	148
Rys. 4.9 Stosunek przepływności połączenia TCP po zastosowaniu kodowania do przepływności połączenia realizowanego przez łącze bez kodowania $r=2$ .....	149
Rys. 4.10 Różnica przepływności połączenia TCP względem połączenia realizowanego przez łącze bez kodowania $r=1.5$ .....	150
Rys. 4.11 Różnica przepływności połączenia TCP względem połączenia realizowanego przez łącze bez kodowania $r=2$ .....	151
Rys. 4.12 Różnica w uzyskiwanej przepływności połączeń TCP po zastosowaniu najlepszych wartości $r$ dla różnych intensywności strat pakietów .....	152
Rys. 4.13 Pseudokod zaproponowanego algorytmu konfiguracji mechanizmu kodowania sieciowego z użyciem wielu interfejsów .....	155
Rys. 4.14 Zysk z zastosowania proponowanego algorytmu dla wybranych wartości $s^K$ .....	158
Rys. 4.15 Znormalizowana liczba scenariuszy, w których $T_{he} > T_{org}$ dla wybranych $s^N/s^K$ .....	159
Rys. 4.16 Wpływ błędu pomiaru wartości $C$ i $\lambda_e$ na efektywność proponowanego algorytmu heurystycznego .....	161
Rys. 4.17 Schemat funkcjonowania algorytmów ze wzmocnieniem .....	163
Rys. 4.18 Wartość nagrody $R$ uzyskiwane przez agenta DDQN w trakcie procesu uczenia, dla $s^K = 4$ .....	166





Rys. 4.19 Wartość nagrody $R$ uzyskiwane przez agenta DDQN w trakcie procesu uczenia, dla $s^K = 8$ .....	166
Rys. 4.20 Wpływ błędu $\delta_{max}$ na proces uczenia się agenta DDQN dla $s^K = 4$ .....	168
Rys. 4.21 Wpływ błędu $\delta_{max}$ na proces uczenia się agenta DDQN dla $s^K = 8$ .....	168
Rys. 5.1 Wizualizacja trasy rejsu .....	174
Rys. 5.2 Architektura systemu testowego .....	175
Rys. 5.3 Wyniki pomiarów parametru RSSI i zestaw testowy .....	176
Rys. 5.4 Wynik analizy przerw w łączności obserwowanych w trakcie pomiarów: a) Estymacja funkcji gęstości prawdopodobieństwa; b) Dystrybuanta empiryczna dla pomierzonych danych (linie ciągłe) i dane wygenerowane na podstawie oszacowanej gęstości prawdopodobieństwa (linie przerywane) .....	177
Rys. 5.5 Architektura systemu symulacyjnego (LP – parametry łącza, OS – system operacyjny, IF – interfejs fizyczny, CPE – terminal zewnętrzny) .....	177
Rys. 5.6 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP – łącze w dół .....	178
Rys. 5.7 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP – łącze w górę .....	179
Rys. 5.8 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP z rozszerzeniem F-RTO – łącze w dół .....	179
Rys. 5.9 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP z rozszerzeniem F-RTO – łącze w górę .....	180
Rys. 5.10 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP dla zaproponowanej modyfikacji – łącze w dół .....	182
Rys. 5.11 Wizualizacja wpływu przerw w łączności na przepływności połączeń TCP dla zaproponowanej modyfikacji – łącze w górę .....	182
Rys. 5.12 Zysk z zastosowanej metody dla łącza w dół .....	183
Rys. 5.13 Zysk z zastosowanej metody dla łącza w górę .....	183



## SPIS TABEL

---

Tabela 1.1 Oferowane parametry łączności do wybranych systemów radiowych stosowanych na morzu [6] .....	15
Tabela 3.1 Przykładowe parametry zbierane w trakcie fazy gromadzenia informacji .....	62
Tabela 3.2 Wybrane parametry środowiska symulacyjnego .....	77
Tabela 3.3 Efektywność bitowa analizowanych metod .....	86
Tabela 3.4 Hiperparametry i szczegóły procesu uczenia .....	92
Tabela 3.5 Parametry analizy efektywności rozważanych metod przełączania .....	109
Tabela 3.6 Liczba zrealizowanych przełączeń pomiędzy testowanymi technikami transmisji .....	117
Tabela 4.1 Scenariusze uwzględnione w analizie opisanego modelu przepływności TCP-Cubic .....	142
Tabela 4.2 Czas kodowania/dekodowania dla kodu RaptorQ (na podstawie [208]) .....	145
Tabela 4.3 Parametry wykorzystane w trakcie symulacji .....	165
Tabela 4.4 Porównanie wyników zaproponowanych algorytmów .....	167
Tabela 5.1 Ocena wpływu proponowanych modyfikacji na protokół TCP Cubic .....	184
Tabela 5.2 Czas potrzebny na pobranie plików w zależności od ich rozmiaru .....	184



## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] R. E. J. Schnurr i T. R. Walker, „Marine Transportation and Energy Use”, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 2019.
- [2] Raport UNCTAD: Maritime transport services and infrastructure supply. United Nations Publications, 2019.
- [3] Raport UNCTAD: Review of Maritime Transport 2021. United Nations Publications, 2021.
- [4] IMO Raport MSC.1/Circ.1595 - E-Navigation Strategy Implementation Plan, 2018.
- [5] ITU-R Recommendation M.2092: "Technical characteristics for a VHF data exchange system in the VHF maritime mobile band. M Series: Mobile radiodetermination amateur and related satellite services", 2015.
- [6] M. Hoeft, K. Gierłowski, J. Woźniak: Heterogeniczny system bezprzewodowej łączności na Morzu Bałtyckim; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9 (2016), s.1196-1200.
- [7] Inmarsat ORCHESTRA: <https://www.inmarsat.com/en/about/technology/orchestra.html> [Dostępny: 16.03.2023].
- [8] J. Wozniak, P. Machan, K. Gierlowski, M. Hoeft, M. Lewczuk: Comparative Analysis of IP-Based Mobility Protocols and Fast Handover Algorithms in IEEE 802.11 Based WLANs, Computer Networks. Springer Berlin Heidelberg, s. 87–101, 2011.
- [9] M. Hoeft, K. Gierłowski, T. Gierszewski, J. Konorski, K. Nowicki, J. Woźniak: Measurements of QoS/QoE parameters for media streaming in a PMIPv6 testbed with 802.11 b/g/n WLANs. Metrology and Measurement Systems, nr 2, 283-294. 2012.
- [10] J. Woźniak, K. Gierłowski, T. Gierszewski, M. Hoeft: Zarządzanie mobilnością w nowoczesnych sieciach IP Część I: Potrzeby, wymagania i podstawowe rozwiązania//Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9, (2012), s. 626-63.
- [11] J. Woźniak, K. Gierłowski, T. Gierszewski, M. Hoeft: Zarządzanie mobilnością w nowoczesnych sieciach IP. Część II - Modyfikacje i optymalizacje mechanizmów mobilności// Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne. -, nr. 1 (2013), s.3-12.
- [12] M. Hoeft, J. Woźniak: A Test-Bed Analysis of Simultaneous PMIPv6 Handover in 802.11 WLANs Environment// Ad-hoc, Mobile, and Wireless Network/ ed. eds. J. Cichoń; M. Gębala; M. Klonowski Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, s.221-232.
- [13] M. Hoeft, P. Kaminski, J. Wozniak: Logical Interface for Soft Handover – An Effective Scheme of Handovers in Proxy Mobile IPv6; 8th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2015, vol., nr, s.72-79, 5-7 Oct. 2015.
- [14] M. Hoeft, i in.: netBaltic – a heterogeneous wireless communications system over the Baltic Sea; 1st Baltic Earth Conference, Silke Köppen Geesthacht, Germany: International Baltic Earth Secretariat Publications, 2016, s.74-75.

- [15] M. Hoeft, K. Gierłowski, J. Woźniak: Mechanizmy zarządzania mobilnością węzłów w systemie netBaltic; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 12 (2016), s.1312-1315.
- [16] J. Woźniak, M. Hoeft: Cel i główne zadania badawcze projektu netBaltic; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 12 (2016), s.1301-1303.
- [17] M. Hoeft, J. Woźniak: Evaluation of Connectivity Gaps Impact on TCP Transmissions in Maritime Communications// Computer Networks/ ed. Gaj P., Kwiecień A., Sawicki M. Gliwice: Springer International Publishing, 2017, s.91-105.
- [18] M. Hoeft, K. Gierłowski, K. Bronk, A. Lipka, R. Niski, K. Żurek: A heterogenous wireless system for maritime communication - the netBaltic system architecture; 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Warszawa, 29-31 maja, 2017.
- [19] J. Wozniak, K. Gierlowski, M. Hoeft: Broadband communication solutions for maritime ITSS: Wider and faster deployment of new e-navigation services, 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Warszawa, 29-31 maja, 2017.
- [20] M. Hoeft, K. Gierłowski: Heterogeniczne środowisko testowe na potrzeby weryfikacji mechanizmów systemu netBaltic; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3 (2018), s. 64-67.
- [21] J. Woźniak, K. Gierłowski, M. Hoeft, M. Lewczuk: Szerokopasmowe systemy komunikacyjne na morzu : scenariusze użycia i przykładowe instalacje// Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne. -, nr. 8-9 (2018), s.545-567.
- [22] M. Hoeft, J. Woźniak: Mechanizmy obsługi mobilności węzłów systemu netBaltic wykorzystujące heterogeniczne systemy transmisji bezprzewodowej; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3 (2018), s. 40-46.
- [23] M. Hoeft, K. Gierłowski, J. Rak, J. Woźniak:netBaltic System-Heterogenous Wireless Network for Maritime Communications// Polish Maritime Research. -Vol. 25, iss. 2 (2018), s.14-26.
- [24] J. Woźniak, M. Hoeft, K. Gierłowski, K. Nowicki: Projekt netBaltic - cele i zaproponowane rozwiązania; Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3 (2018), s. 31-34.
- [25] D. Perwejnjs, M. Hoeft, J. Woźniak: Propozycja optymalizacji wyboru interfejsu bezprzewodowego w heterogenicznej sieci dostępowej// Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne. -, iss. 4 (2019), s.83-91.
- [26] K. Gierłowski, M. Hoeft, M. Wichorowski: A wireless network for off-shore marine research// Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata -Vol. 62, (2021), s.261-263.
- [27] M. Hoeft, K. Gierłowski, M. Wichorowski: Remote command and control capabilities for data acquisition systems provided by delay-tolerant network mechanisms// Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata -Vol. 62, (2021), s.266-268.
- [28] A. Stateczny, K. Gierlowski, and M. Hoeft, "Wireless Local Area Network Technologies as Communication Solutions for Unmanned Surface Vehicles," Sensors, vol. 22, nr 2, p. 655, 2022.

- [29] M. Hoeft, K. Gierłowski, and J. Wozniak, "Wireless Link Selection Methods for Maritime Communication Access Networks—A Deep Learning Approach," *Sensors*, vol. 23, nr 1, s. 400, 2022.
- [30] M. Hoeft, K. Gierłowski, J. Rak, J. Woźniak, K. Nowicki: Non-Satellite Broadband Maritime Communications for e-Navigation Services// *IEEE Access* -Vol. 9, (2021), s.62697-62718.
- [31] M. Hoeft, K. Gierłowski, J. Rak, J. Wozniak and K. Nowicki, "Non-Satellite Broadband Maritime Communications for e-Navigation Services," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 62697-62718, 2021.
- [32] K. Bronk, A. Lipka, R. Niski, i in. (2012), „Analiza pomiarów jakości i dostępności sieci komórkowych na morzu” (Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne) *SIGMA NOT* nr 4 s.412-415.
- [33] R. G. Garroppo, S. Giordano i in. "Experimental analysis of a WiMAX-satellite network for emergency management in sea areas," *WoWMoM, IEEE International Symposium on a*, s.1-6, 2009.
- [34] H. Kdouh, C. Brousseau, G. Zaharia, G. Grunfelder and G. E. Zein, "Measurements and path loss models for shipboard environments at 2.4 GHz," 2011 41st European Microwave Conference, 2011, s. 408-411.
- [35] K. Yang, T. Roste, F. Bekkadal, K. Husby and O. Trandem, "Long-Distance Propagation Measurements of Mobile Radio Channel over Sea at 2 GHz," 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011, s. 1-5.
- [36] J. Kang, D. Moon, i J. Kim, „Building communication interface in ship area network for merchant marine: A practical approach”, 2013 13th ICCAS 2013. IEEE, 2013.
- [37] N. Wakabayashi, T. Watanabe, M. Urakami and Y. Yano, "Motor Vessel LAN - Design, Implementation, and Operation," 2018 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom), 2018.
- [38] K. Blašković and D. Milovan, "Remote Control System Concept in Electric and Hybrid Marine Propulsion Objects," 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2019, s. 955-959.
- [39] Y. Tang and N. Shao, "Design and research of integrated information platform for smart ship," 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2017, s. 37-41.
- [40] T. Yang i X. (Sherman) Shen, *Mission-Critical Application Driven Intelligent Maritime Networks*. Springer Singapore, 2020.
- [41] Raport MSC 95/19/15: Initial descriptions of maritime services in the context of e-navigation, IMO, 2019, <https://iho.int/en/imo-e-navigation-documents>.
- [42] Raport MSC 95/19/15: Annex 7 draft E-navigation strategy implementation plan, IMO, London, 2014. <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Navigation/Documents/enavigation/SIP.pdf>.

- [43] A. Habib and S. Moh, "Wireless Channel Models for Over-the-Sea Communication: A Comparative Study," *Applied Sciences*, vol. 9, nr 3, p. 443, Jan. 2019, doi: 10.3390/app9030443.
- [44] C. Li, J. Yu, J. Xue, W. Chen, S. Wang, K. Yang, "Maritime Broadband Communication: Wireless Channel Measurement and Characteristic Analysis for Offshore Waters," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, nr 7, p. 783, Jul. 2021.
- [45] J.-H. Lee, J. Choi, W.-H. Lee, J.-W. Choi, and S.-C. Kim, "Measurement and analysis on land-to-ship offshore wireless channel in 2.4 GHz," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, nr 2, s. 222–225, Apr. 2017.
- [46] W. Wang, T. Jost, and R. Raulefs, "Large scale characteristics of ship-to-land propagation at 5.2 GHz in harbor environment," in *Proc. IEEE 82nd Veh. Tech. Conf. (VTC-Fall)*, Boston, MA, USA, Sep. 2015, s. 1–5.
- [47] J. C. Reyes-Guerrero, M. Bruno, L. A. Mariscal, and A. Medouri, "Buoy-to-ship experimental measurements over sea at 5.8 GHz near urban environments," in *Proc. 11th Medit. Microw. Symp. (MMS)*, Hammamet, Tunisia, Sep. 2011, s. 320–324.
- [48] J. C. Reyes-Guerrero and L. A. Mariscal, "5.8 GHz propagation of low-height wireless links in sea port scenario," *Electron. Lett.*, vol. 50, nr 9, s. 710–712, Apr. 2014.
- [49] J. Joe et al., "Path loss measurements in sea port for WiMAX," in *Proc. Wireless Commun. Netw. Conf.*, Kowloon, China, Jun. 2007, s. 1871–1876.
- [50] J. Wang et al., "Wireless Channel Models for Maritime Communications," in *IEEE Access*, vol. 6, s. 68070–68088, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2879902.
- [51] Lee, Y.H.; Dong, F.; Meng, Y.S. Near Sea-Surface Mobile Radiowave Propagation at 5 GHz: Measurements and Modeling. *Radioengineering* 2014, 24, 824–830.
- [52] Y.H. Lee, Y.S. Meng, Key Considerations in the Modeling of Tropical Maritime Microwave Attenuations. *International Journal of Antennas and Propagation* 2015, 2015, s. 1–7..
- [53] Ang, C.W.; Wen, S. Signal strength sensitivity and its effects on routing in maritime wireless networks. 2008 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN). IEEE, 2008.
- [54] F. Hong and Q. Zhang, "Time Series Analysis of Evaporation Duct Height over South China Sea: A Stochastic Modeling Approach," *Atmosphere*, vol. 12, nr 12, p. 1663, Dec. 2021, doi: 10.3390/atmos12121663.
- [55] K. S. Zaidi, V. Jeoti, M. Driberg, A. Awang and A. Iqbal, "Fading Characteristics in Evaporation Duct: Fade Margin for a Wireless Link in the South China Sea," in *IEEE Access*, vol. 6, s. 11038–11045, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2810299.
- [56] A. Coker, L. Straatemeier, T. Rogers, P. Valdez, D. Cooksey, K. Griendling, "Maritime channel modeling and simulation for efficient wideband communications between autonomous Unmanned Surface Vehicles," 2013 OCEANS - San Diego, 2013, s. 1–9,.
- [57] E. Dinc and O. B. Akan, "Beyond-line-of-sight communications with ducting layer," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, nr 10, s. 37–43, October 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6917399.



- [58] V.S. Cruz, F. Assis, L. Schnitman: Simulation of the effects of evaporation ducts on maritime wireless communication. *Wireless Netw* 27, 4677–4691, 2021.
- [59] A. Abdelmoaty, G. Dahman, G. Poitau, F. Gagnon, "Assessing the Range of Radio Maritime Links in Different Waterbodies: Effect of Antenna height and Band Diversities," 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), 2021, s. 1-7.
- [60] X. Zhao, S. Huang and H. Fan, "Influence of sea surface roughness on the electromagnetic wave propagation in the duct environment," 2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing, 2010, s. 467-470, doi: 10.1109/IITA-GRS.2010.5.
- [61] A. F. Makarim, O. Puspitorini, H. Mahmudah, N. A. Siswandari, A. Wijayanti, "Measurement and Modeling: Characteristic Propagation on 5.8 GHz at Surabaya Coastal for Maritime Communication," *EECCIS*, 2018, s. 181-186.
- [62] ITU-R Recommendation P.526: Propagation by diffraction, 2019.
- [63] FOSSEN T.I.: Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 1st Edition, Wiley 2011.
- [64] S. Tavakoli i A. Dashtimanesh, „A six-DOF theoretical model for steady turning maneuver of a planing hull”, *Ocean Engineering*, t. 189. Elsevier BV, s. 106328, paź. 2019. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106328.
- [65] G. Taimuri, J. Matusiak, T. Mikkola, P. Kujala, i S. Hirdaris, „A 6-DoF maneuvering model for the rapid estimation of hydrodynamic actions in deep and shallow waters”, *Ocean Engineering*, t. 218. Elsevier BV, s. 108103, grudz. 2020. doi: 10.1016/j.oceaneng.
- [66] A. L. Zheleznyakova, „Physically-based method for real-time modelling of ship motion in irregular waves”, *Ocean Engineering*, t. 195. Elsevier BV, s. 106686, sty. 2020. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106686.
- [67] Z. Li., Survival strategies for unmanned surface vehicles in harsh ocean environments. Doctoral (PhD) thesis, Memorial University of Newfoundland (2018).
- [68] H. Sun, O. Faltinsen., The influence of gravity on the performance of planing vessels in calm water. *Journal of Engineering Mathematics*. 58. (2007). s. 91-107. 10.1007/s10665-006-9107-5.
- [69] E. Kreuzer; W. Sichertmann, Slender Body Theory Approach to Nonlinear Ship Motions. In: *Proc 20th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (Longyearbyen, 29. Mai - 1. Juni 2005)*. (2005).
- [70] A. Fitriadhy, N. A. Aldin, N. A. Mansor, N. A. H. Zalizan, “Heave and Pitch Motion Performances of a Ship Towing System Incorporated with Symmetrical Bridle Towline Model”, *EPI International Journal of Engineering*, vol. 2, nr 1, s. 28-33, 2019..
- [71] Z. Teng, R. Jun-sheng, B. Wei-wei, S. Wei and H. Jing-yu, "Modeling for ship heave and pitch motions in waves based on conformal mapping method," 2017 4th International Conference on Information, Cybernetics and Computational Social Systems (ICCSS), 2017.,
- [72] J.-H. Park, J.-H. Bae, i M.-H. Baeg, „Estimation of Fluctuation Characterizations by USV-Operation Simulations in Sea State 3”, *Modelling and Simulation in Engineering*, t. 2017. Hindawi Limited, s. 1–8, 2017. doi: 10.1155/2017/1305752.

- [73] IALA, Report on the IALA Workshop on Development of VHF Data Exchange System (VDES), 15-19 Lutego 2016, Tokyo, Japan, 2016.
- [74] VDES: VHF Data Exchange System Overview. VDES Workshop Tokyo, 2014.
- [75] ITU-R Recommendation M.1842: Characteristics of VHF radio systems and equipment for the exchange of data and electronic mail in the maritime mobile service RR Appendix 18 channels, 2009.
- [76] ITU-R Recommendation M.585 : Assignment and use of identities in the maritime mobile service, 2022.
- [77] L. M. Bradbury i in., „NorSat-2: Enabling advanced maritime communication with VDES”, *Acta Astronautica*, t. 156. Elsevier BV, s. 44–50, mar. 2019.
- [78] VDES promises a new era for maritime communications: [https://www.rina.org.uk/VDES\\_promises\\_a\\_new\\_era\\_for\\_maritime\\_communications.html](https://www.rina.org.uk/VDES_promises_a_new_era_for_maritime_communications.html).
- [79] F. Lázaro, R. Raulefs, W. Wang, F. Clazzer, S. Plass, VHF data exchange system (VDES): An enabling technology for maritime communications, *CEAS Space J.*, vol. 11, nr 1, s. 55–63, Mar. 2019.
- [80] Ø. J. Rødseth, i in., „The need for a public key infrastructure for automated and autonomous ships”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, t. 929, nr 1. IOP Publishing, s. 012017, lis..
- [81] Ø. Rødseth, L.A. Wenersberg, H. Nordahl Improving safety of interactions between conventional and autonomous ships, 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles (STAB&S 2021), 2021.
- [82] T. Gierszewski.: Mechanizmy bezpieczeństwa transmisji w systemie netBaltic. *Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*, 8-9, s. 813-816, 2017.
- [83] K. M. Kim, i. in. Performance evaluation of maritime VDES networks with OPNET simulator in *Proc. 11th Int. Symp. CSNDSP*, Jul. 2018, s. 1–6.
- [84] L. Zhang, B. Lin, S. Zhang, T. Zhao, and Y. Zhang, “An Improved MAC Protocol Design in VHF Data Exchange System (VDES) For Internet of Vessels,” *Procedia Computer Science*, vol. 129. Elsevier BV, s. 45–51, 2018.
- [85] Y. Jiang, Y. Zheng, and J. Wang, “A novel random access algorithm for very high frequency data exchange (VDE),” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, nr 2, p. 83, Jan. 2020.
- [86] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," in *IEEE Std 802.16-2004 (Revision of IEEE Std 802.16-2001)*, vol., nr, s. 1-857, 2004.
- [87] M. Zhou i in., „TRITON: high-speed maritime wireless mesh network”, *IEEE Wireless Communications*, t. 20, nr 5. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), s. 134–142, 2013.
- [88] P.-Y. Kong i in., „A Routing Protocol for WiMAX Based Maritime Wireless Mesh Networks”, *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference. IEEE*, 2009.

- [89] Hua Zhu, Yatkwan Tang, i I. Chlamtac, „Unified collision-free coordinated distributed scheduling (CF-CDS) in IEEE 802.16 mesh networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, t. 7, nr 10. s. 3889–3903, 2008.
- [90] M.-T. Zhou, H. Harada, P.-Y. Kong, C.-W. Ang, Y. Ge, i J. S. Pathmasuntharam, „Multi-channel transmission with efficient delivery of routing information in maritime WiMAX mesh networks”, *Proceedings of the IWCMC '09*. ACM Press, 2009.
- [91] Singapore launches Wiseport project <https://en.portnews.ru/news/9330/>.
- [92] K. Gierłowski: Zwiększanie zasięgu szerokopasmowej komunikacji morskiej z wykorzystaniem heterogenicznego systemu transmisji wieloskokowej. *Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*, 2-3, 2018, 47-54.
- [93] W. Gumiński: Koncepcja realizacji usług w sieci o nieciągłej i sporadycznej łączności, *Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*. -, nr. 12 (2016), s.1339-1342.
- [94] W. Gumiński: Integracja mechanizmów transportowych dla sieci o nieciągłej i sporadycznej łączności w systemie netBaltic, *Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*, nr 2-3 (2018), s. 57-59.
- [95] H. Ferreira et al., "Autonomous systems in remote areas of the ocean using BLUECOM+ communication network," *OCEANS 2017 - Anchorage*, 2017, s. 1-6..
- [96] F. B. Teixeira, R. Campos and M. Ricardo, "Height Optimization in Aerial Networks for Enhanced Broadband Communications at Sea," in *IEEE Access*, vol. 8, s. 28311-28323, 2020.
- [97] R. Campos, T. Oliveira, N. Cruz, A. Matos and J. M. Almeida, "BLUECOM+: Cost-effective broadband communications at remote ocean areas," *OCEANS 2016 - Shanghai*, 2016, s. 1-6.
- [98] S. Jo, W. Shim, "LTE-Maritime: High-Speed Maritime Wireless Communication Based on LTE Technology," in *IEEE Access*, vol. 7, s. 53172-53181, 2019.
- [99] S.-W. Jo, J. H. Jang, S. Yu, i W. Shim, „A Validation of Field Test Results for LTE-Maritime”, *IFAC-PapersOnLine*, t. 51, nr 29. Elsevier BV, s. 153–158, 2018.
- [100] S. Guan, J. Wang, C. Jiang, R. Duan, Y. Ren and T. Q. S. Quek, "MagicNet: The Maritime Giant Cellular Network," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, nr 3, s. 117-123, March 2021.
- [101] J. V. Sudarev and L. B. White, "802.11 wireless network extended service set model," *International Workshop on Wireless Ad-Hoc Networks*, 2004., 2004, s. 156-160.
- [102] S. Goudarzi, W. H. Hassan, M. H. Anisi, A. Soleymani: A Comparative Review of Vertical Handover Decision-Making Mechanisms in Heterogeneous Wireless Networks, *Indian Journal of Science and Technology*, t. 8, nr 23., 2015.
- [103] A. Ahmed, L. M. Boulahia, D. Gaïti, "Enabling Vertical Handover Decisions in Heterogeneous Wireless Networks: A State-of-the-Art and A Classification," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, nr 2, s. 776-811, 2014.

- [104] C. Perkins, D. Johnson, J. Arkko, "Mobility Support in IPv6", RFC 6275, DOI 10.17487/RFC6275, July 2011.
- [105] S. Gundavelli, K. Leung, V. Devarapalli, K. Chowdhury, B. Patil, "Proxy Mobile IPv6", RFC 5213, DOI 10.17487/RFC5213, August 2008.
- [106] R. Koodli "Mobile IPv6 Fast Handovers", RFC 5568, DOI 10.17487/RFC5568, July 2009.
- [107] H. Yokota, K. Chowdhury, R. Koodli, B. Patil, F. Xia, "Fast Handovers for Proxy Mobile IPv6", RFC 5949, DOI 10.17487/RFC5949, September 2010.
- [108] P. A. Kumari and I. S. Prabha, Optimum network selection in heterogeneous wireless environment using gravitational search algorithm, 2015 International Conference on Signal Processing and Communication Engineering Systems, 2015, str. 464-467.
- [109] K. Radhika and A. V. G. Reddy, Network selection in heterogeneous wireless networks based on Fuzzy Multiple criteria Decision Making, 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Kanyakumari, 2011, str. 136-139.
- [110] I. Iancu, C.-I. Popirlan: Mamdani: Fuzzy Logic Controller with Mobile Agents for Matching. Recent Advances in Neural Networks and, Fuzzy systems and Evolutionary Computing, str. 117-122, 2010.
- [111] T. L. Saaty: Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, Nr 1, 2008.
- [112] A. Sgora, D. D. Vergados, P. Chatzimisios: An access network selection algorithm for heterogeneous wireless environments, The IEEE symposium on Computers and Communications, str. 890-892, 2010.
- [113] Y. Yeryomin and J. Seitz, "Application-aware optimization approaches for multiple-criteria network selection in mobile heterogeneous networks," 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech), 2017, s. 1-8.
- [114] E. Obayiuwana i O. E. Falowo, „Network selection in heterogeneous wireless networks using multi-criteria decision-making algorithms: a review”, Wireless Networks, t. 23, nr 8. Springer Science and Business Media LLC, s. 2617–2649, cze. 07, 2016.
- [115] S. Maaloul, M. Afif and S. Tabbane, "Vertical Handover Decision Policy Based on the End User's Perceived Quality of Service," 2013 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2013, s. 493-498.
- [116] A. Bazrafkan, M. R. Pakravan, "An MADM network selection approach for next generation heterogeneous networks," 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2017, s. 1884-1890.
- [117] M. Q. Khan and S. H. Andresen, "A semi and fully distributed handover algorithm for heterogeneous networks using MIIS," 2012 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), 2012, s. 145-150.
- [118] N. P. Singh i B. Singh, „Vertical handoff decision in 4G wireless networks using multi attribute decision making approach”, Wireless Networks, t. 20, nr 5. Springer Science and Business Media LLC, s. 1203–1211, lis. 17, 2013.

- [119] S. Goutam, S. Unnikrishnan and A. Karandikar, "Algorithm for Vertical Handover using Multi Attribute Decision Making Techniques," 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), 2020, s. 306-313.
- [120] S. Goutam, S. Unnikrishnan, S. S. Prabavathy, A. Karandikar and A. Goutam, "Algorithm for Network Selection based on SAW and MEW techniques," 2021 International Conference on Control, Automation, Power and Signal Processing (CAPS), 2021, s. 1-6.
- [121] L. Wang and D. Binet, "MADM-based network selection in heterogeneous wireless networks: A simulation study," VITAE'09, 2009, s. 559-564.
- [122] E. Stevens-Navarro and V. W. S. Wong, "Comparison between Vertical Handoff Decision Algorithms for Heterogeneous Wireless Networks," 2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, 2006, s. 947-951.
- [123] F. W. Karam and T. Jensen, "Performance Analysis of Ranking for QoS Handover Algorithm for Selection of Access Network in Heterogeneous Wireless Networks," 21st ICCCN, 2012, s. 1-6.
- [124] T. L. Saaty, „How to make a decision: The analytic hierarchy process”, European Journal of Operational Research, t. 48, nr 1. Elsevier BV, s. 9–26, wrz. 1990.
- [125] E. Skondras, i.in. „An analytic network process and trapezoidal interval-valued fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution network access selection method”, Int. Journal of Comm. Systems, 29.2. Wiley, s. 307–329, wrz. 12, 2014.
- [126] R. K. Goyal, S. Kaushal, i A. K. Sangaiah, „The utility based non-linear fuzzy AHP optimization model for network selection in heterogeneous wireless networks”, Applied Soft Computing, t. 67. Elsevier BV, s. 800–811, cze. 2018.
- [127] F. Ouyang and X. Li, "An vertical handover introduced by adaptive mechanism based on fuzzy analytic hierarchy process for heterogeneous networks," 10th International CISP-BMEI, 2017, s. 1-6.
- [128] R. Kaur and S. Mittal, "Multi Criteria based Handoff using FAHP and Fuzzy Inference System," 2019 International Conference on Data Science and Communication (IconDSC), 2019, s. 1-5.
- [129] F. Bari and V. Leung, "Multi-Attribute Network Selection by Iterative TOPSIS for Heterogeneous Wireless Access," 2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2007, s. 808-812.
- [130] T. Thumthawatworn, P. Satitsuksano, K. Nongpong and S. Charoenvikrom, "Fuzzy tuning for network selection mechanism in wireless handover decision," 2017 7th IEEE ICEIEC, 2017, s. 576-579.
- [131] F. Hantera, F. Digham and H. Tawfik, "LTE-WIFI Offloading With Realistic Attributes," 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2019, s. 1-6.
- [132] G. Singla, S. Gupta and L. Kaur, "QTM: Quality aware improved TOPSIS method for routing in MANETs," 2020 2nd ICACCCN, 2020, s. 399-404.
- [133] X. Yan, P. Dong, T. Zheng, H. Zhang and S. Yu, "Fuzzy Multi-Attribute Utility Based Network Selection Approach for High-Speed Railway Scenario," GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference, 2017, s. 1-6.

- [134] L. Lijuan, L. Tingjie and C. Xia, "Network selection based on context-awareness services," in *China Communications*, vol. 10, nr 12, s. 50-56, Dec. 2013.
- [135] X. Guo, i. in „Access-Selection Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks Based on Uncertain Network Attribute Values”, *Computational Intelligence and Neuroscience*, t. 2022. Hindawi Limited, s. 1–15, luty 24, 2022.
- [136] M. Bhatia i K. Kumar, „Network selection in cognitive radio enabled Wireless Body Area Networks”, *Digital Communications and Networks*, t. 6, nr 1. Elsevier BV, s. 75–85, luty 2020.
- [137] H. Yu, Y. Ma and J. Yu, "Network Selection Algorithm for Multiservice Multimode Terminals in Heterogeneous Wireless Networks," in *IEEE Access*, vol. 7, s. 46240-46260, 2019.
- [138] M. Alhabo and L. Zhang, "Multi-Criteria Handover Using Modified Weighted TOPSIS Methods for Heterogeneous Networks," in *IEEE Access*, vol. 6, s. 40547-40558, 2018.
- [139] L. Wang and G.-S. G. S. Kuo, "Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks—A tutorial", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, nr 1, s. 271-292, 2013.
- [140] Y.-M. Wang and Y. Luo, "Integration of correlations with standard deviations for determining attribute weights in multiple attribute decision making", *Math. Comput. Model.*, vol. 51, nr 1, s. 1-12, 2010.
- [141] G. Cerar, H. Yetgin, M. Mohorčič and C. Fortuna, "Machine Learning for Wireless Link Quality Estimation: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, nr 2, s. 696-728, 2021.
- [142] M. A. Ridwan, N. A. M. Radzi, F. Abdullah and Y. E. Jalil, "Applications of Machine Learning in Networking: A Survey of Current Issues and Future Challenges," in *IEEE Access*, vol. 9, s. 52523-52556, 2021.
- [143] G. E. Hinton, S. Osindero, i Y.-W. Teh, „A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets”, *Neural Computation*, t. 18, nr 7. MIT Press - Journals, s. 1527–1554, lip. 2006.
- [144] Karol Piczak: *Klasyfikacja dźwięku za pomocą splotowych sieci neuronowych*, Praca doktorska, 2019.
- [145] A. Krizhevsky, I. Sutskever, i G. E. Hinton, „ImageNet classification with deep convolutional neural networks”, *Communications of the ACM*, t. 60, nr 6. Association for Computing Machinery (ACM), s. 84–90, maj 24, 2017.
- [146] S. Ioffe, „Batch Renormalization: Towards Reducing Minibatch Dependence in Batch-Normalized Models”. *arXiv*, 2017.
- [147] J. Kukačka, V. Golkov, i D. Cremers, „Regularization for Deep Learning: A Taxonomy”. *arXiv*, 2017.
- [148] P. Baldi and P. J. Sadowski, “Understanding Dropout,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2013, vol. 26.

- [149] J. Duchi, E. Hazan, and Y. Singer, "Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, nr 61, s. 2121–2159, 2011.
- [150] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, *Deep learning*. MIT Press, 2016..
- [151] Y. LeCun and Y. Bengio. Convolutional networks for images, speech, and time series. In M. Arbib, editor, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, pages 255-258. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1995.
- [152] S. Hochreiter i J. Schmidhuber, „Long Short-Term Memory”, *Neural Computation*, t. 9, nr 8. MIT Press - Journals, s. 1735–1780, lis. 01, 1997.
- [153] Z. Hu, J. Zhang, Y. Ge, "Handling Vanishing Gradient Problem Using Artificial Derivative," in *IEEE Access*, vol. 9, s. 22371-22377, 2021.
- [154] Z. M. Fadlullah et al., "State-of-the-Art Deep Learning: Evolving Machine Intelligence Toward Tomorrow's Intelligent Network Traffic Control Systems," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, nr 4, s. 2432-2455, 2017.
- [155] C. Zhang, P. Patras and H. Haddadi, "Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, nr 3, s. 2224-2287, 2019.
- [156] OMNeT++ User Manual, Version 4.1. Andras Varga: <http://www.omnets.org/>, Dostępny [Dostępny: 16.03.2023].
- [157] INET Framework - INET-4.2.0, online: <https://inet.omnets.org/2020-01-08-INET-4.2.0-released.html> [Dostępny: 16.03.2023].
- [158] J. M. Batalla, i in.: *Adaptive Positioning Systems Based on Multiple Wireless Interfaces for Industrial IoT in Harsh Manufacturing Environments*, *IEEE J. Sel. Areas Commun*, vol. 38, nr 5, s. 899-914, May 2020.
- [159] WiMax + Mobile IPv6 handovers in Omnet++ simulation environment, online: <https://klub.com.pl/numbat/> [Dostępny: 16.03.2023].
- [160] LTE User Plane Simulation Model for INET & OMNeT++, online: <https://simulte.com/>, [Dostępny: 16.03.2023].
- [161] IEEE 802.15.4-2006 Simulation Model for OMNeT++ / INET, online: <https://github.com/michaelkirsche/IEEE802154INET-Standalone>, [Dostępny: 16.03.2023].
- [162] D. Hayes, D. Ros, L. L. H. Andrew, S. Floyd.: "Common TCP Evaluation Suite" Internet-Draft draft-irtf-iccr-g-tcpeval-01, IETF 2015.
- [163] T. G. Dietterich, „Machine Learning for Sequential Data: A Review”, *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, s. 15–30, 2002.
- [164] D. Lee, B. E. Carpenter, i N. Brownlee, „Observations of UDP to TCP Ratio and Port Numbers”, 2010 Fifth International Conference on Internet Monitoring and Protection. IEEE, 2010.
- [165] A. Feldmann i in., „The Lockdown Effect”, *Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference*. ACM, paź. 27, 2020.
- [166] T. Henderson, S. Floyd, A. Gurtov i Y. Nishida, "The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm", RFC 6582, DOI 10.17487/RFC6582, April 2012.

- [167] M. Mathis, J. Semke, J. Mahdavi, i T. Ott, „The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, t. 27, nr 3. Association for Computing Machinery (ACM), s. 67–82, lip. 1997.
- [168] S. M. A. Zaidi, M. Manalastas, H. Farooq and A. Imran, "Mobility Management in Emerging Ultra-Dense Cellular Networks: A Survey, Outlook, and Future Research Directions," in *IEEE Access*, vol. 8, s. 183505-183533, 2020.
- [169] D. Ohmann, A. Awada, I. Viering, M. Simsek and G. P. Fettweis, "Impact of Mobility on the Reliability Performance of 5G Multi-Connectivity Architectures," 2017 *IEEE WCNC*, 2017, s. 1-6.
- [170] S. Adnan, Y. Fu, N. U. R. Junejo, Z. Chen, i H. Esmail, „Sparse detection with orthogonal matching pursuit in multiuser uplink quadrature spatial modulation MIMO system”, *IET Communications*, t. 13, nr 20. (IET), s. 3472–3478, 2019.
- [171] H. Cheng, Z. Xie, L. Wu, Z. Yu, i R. Li, „Data prediction model in wireless sensor networks based on bidirectional LSTM”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, t. 2019, nr 1, 2019.
- [172] M. Abdel-Nasser, K. Mahmoud, O. A. Omer, M. Lehtonen, i D. Puig, „Link quality prediction in wireless community networks using deep recurrent neural networks”, *Alexandria Engineering Journal*, t. 59, nr 5. Elsevier BV, s. 3531–3543, 2020.
- [173] Z. Li, C.-X. Wang, J. Huang, W. Zhou, i C. Huang, „A GAN-LSTM based AI Framework for 6G Wireless Channel Prediction”, 2022 *IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*. 2022.
- [174] Q. Liu, Z. Yin, M. Wu, Z. Wu, i Z. Xu, „LSTM Network-based SNR Estimator for DS-UWB Wireless Sensor Network”, 2022 *9th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*. IEEE, 2022.
- [175] „IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2: Fast Basic Service Set (BSS) Transition”.
- [176] K. Alexandris, N. Nikaein, R. Knopp, i C. Bonnet, „Analyzing X2 handover in LTE/LTE-A”, 2016 *14th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*. IEEE, maj 2016.
- [177] T. Gierszewski: Architektura bezpieczeństwa Systemu NetBaltic. *Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*, nr 12, 12, 2016, s. 1330-4.
- [178] Y. Hong, K. Pawlikowski and H. Sirisena, "DAD-Less MIPv6 for Reduced Handover Latency," 2011 *Fifth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, 2011, s. 353-360.
- [179] S. Thomson, T. Narten, T. Jinmei, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", RFC 4862, 2007.
- [180] T. Mrugalski, M. Siodelski, B. Volz, A. Yourtchenko, M. Richardson, S. Jiang, T. Lemon, T. Winters, "Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6)", RFC 8415, 2018.



- [181] K. Mun-Suk, L. SuKyoung, D. Cypher, N. Golmie: "Fast Handover Latency Analysis in Proxy Mobile IPv6," GLOBECOM 2010, IEEE, s.1,5, 6-10 Dec. 2010.
- [182] M. Tao, H. Yuan, i W. Wei, „Effective Performance Compensation for the Premature Handoff Trigger in FMIPv6 Networks”, International Journal of Wireless Information Networks, t. 20, nr 4. Springer Science and Business Media LLC, s. 392–400, sie. 01, 2013.
- [183] A. J. Jabir, S. Shamala, Z. Zuriati and N. Hamid, "A Comprehensive Survey of the Current Trends and Extensions for the Proxy Mobile IPv6 Protocol," in IEEE Systems Journal, vol. 12, nr 1, s. 1065-1081, March 2018.
- [184] M. Balfaqih, Z. Balfaqih, V. Shepelev, S. A. Alharbi, i W. A. Jabbar, „An analytical framework for distributed and centralized mobility management protocols”, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, t. 13, nr 7. s. 3393–3405, 2020.
- [185] M. Hoeft, T. Gierszewski, K. Gierłowski i.in: Realizacja przełączeń terminali ruchomych przez elementy infrastruktury systemu mobilności// Inżynieria Internetu Przyszłości. - Cz.1/ Warszawa: Oficyna Wydaw. PW, 2012, s.202-212.
- [186] A. Wymysłowski, M. Hoeft: Serwer Diameter w architekturze Proxy Mobile IPv6// Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne. -, nr. 8-9 (2013), s.1097-1105.
- [187] K. Gierłowski, M. Hoeft, W. Gumiński.: LABORATORIUM MOBILNYCH TECHNIK BEZPRZEWODOWYCH. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9 (2015): s. 1141-50.
- [188] A. Binczewski, B. Belter, Ł. Łopatowski i in.: Infrastruktura PL-LAB2020, Przegląd Telekomunikacyjny+Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 12, 2015, s. 1399-1404.
- [189] TK Chopin - Dostawca internetu stacjonarnego i mobilnego, <https://tkchopin.pl/o-firmie.html> (dostępne 06.06.2022).
- [190] Open vSwitch: <https://www.openvswitch.org/> [Dostępny: 16.03.2023].
- [191] M. Bagnulo, A. Garcia-Martinez and A. Azcorra, "IPv6 multihoming support in the mobile internet," in IEEE Wireless Communications, vol. 14, nr 5, s. 92-98, October 2007, doi: 10.1109/MWC.2007.4396948.
- [192] X. Liu i L. Xiao, „A Survey of Multihoming Technology in Stub Networks: Current Research and Open Issues”, IEEE Network, t. 21, nr 3. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), s. 32–40, maj 2007. doi: 10.1109/mnet.2007.364256.
- [193] Lee, HB., Min, SG., Han, YH. et al. IP flow mobility scheme in scalable network-based mobility management architecture. Telecommun Syst 60, 315–325 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11235-015-0032-7>.
- [194] K. Sun and Y. Kim, "Policy-based flow mobility management in PMIPv6 networks," 2012 International Conference on ICT Convergence (ICTC), 2012, s. 724-725, doi: 10.1109/ICTC.2012.6387157.
- [195] „T. M. Trung, Y. -H. Han, H. -Y. Choi and Hong Yong Geun, "A design of network-based flow mobility based on proxy mobile IPv6," 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs), 2011, s. 373-378, doi: 10.1109/INFCOMW.2011.5928841”.

- [196] C. Xu, E. Fallon, Y. Qiao, L. Zhong, G. Muntean, "Performance Evaluation of Multimedia Content Distribution Over Multi-Homed Wireless Networks," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 57, nr 2, s. 204-215, June 2011, doi: 10.1109/TBC.2011.2119050.
- [197] T. D. Wallace and A. Shami, "A Review of Multihoming Issues Using the Stream Control Transmission Protocol," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, nr 2, s. 565-578, Second Quarter 2012, doi: 10.1109/SURV.2011.051111.00096.
- [198] H. Han, S. Shakkottai, C. V. Hollot, R. Srikant and D. Towsley, "Multi-Path TCP: A Joint Congestion Control and Routing Scheme to Exploit Path Diversity in the Internet," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, nr 6, s. 1260-1271, Dec. 2006, do.
- [199] M. Becke, H. Adhari, E. P. Rathgeb, Fu Fa, Xiong Yang and Xing Zhou, "Comparison of Multipath TCP and CMT-SCTP based on intercontinental measurements," 2013 *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2013, s. 1360-1366, doi: 10.1109/GLOCOM.2013.68.
- [200] T. Schmidt, J. Deutschmann, K. -S. Hielscher and R. German, "POSTER: Revisiting Multipath QUIC Experiments and Comparing them with more recent Multipath TCP Implementations," 2021 *IEEE LANMAN Symposium*, 2021, s. 1-2..
- [201] M. Morawski and P. Ignaciuk, "MPTCP or MPQUIC - Which One is Better for General-Purpose Networking," 2021 *25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2021, s. 600-605, doi: 10.1109/ICSTCC52150.2021.9607104.
- [202] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li, and R.W. Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 46, nr 4, July 2000.
- [203] T. Ho and D. Lun, "Network Coding." Cambridge University Press, 2008. doi: 10.1017/cbo9780511754623.
- [204] M. Luby, A. Shokrollahi, M. Watson, T. Stockhammer, i L. Minder, „RaptorQ Forward Error Correction Scheme for Object Delivery”, RFC Editor, sie. 2011. doi: 10.17487/rfc6330.
- [205] C. Bouras, N. Kanakis, V. Kokkinos and A. Papazois, "Enhancing reliable mobile multicasting with RaptorQ FEC," 2012 *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2012, s. 000082-000087, doi: 10.1109/ISCC.2012.6249272.
- [206] S. Joo, "Linear time complexity GF(256) RaptorQ implementation on GPU," 2017 *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2017, s. 282-284, doi: 10.1109/ICTC.2017.8190987.
- [207] L. Hu, S. Nooshabadi and T. Mladenov, "Forward error correction with RaptorQ code on GPU," 2013 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2013, s. 281-284, doi: 10.1109/ISCAS.2013.6571837.
- [208] D. Ko, K. Koo, i D. Y. Kim, „Reducing the decoding complexity of RaptorQ codes for delay sensitive applications using a simplified and scaled-down matrix”, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, t. 70, nr 9. Elsevier BV, s. 1356–13.
- [209] N. Vicente, V. Silva, J. Andrade and G. Falcao, "Mobile 4K / 2K / HD video streaming supported by real-time FEC raptorQ codes," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 62, nr 4, s. 405-411, November 2016, doi: 10.1109/TCE.2016.7838093..

- [210] M. Medard, F. Fitzek, M.-J. Montpetit, i C. Rosenberg, „Network coding mythbusting: why it is not about butterflies anymore”, IEEE Communications Magazine, t. 52, nr 7. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), s. 177–183, lip. 2014.
- [211] Y. Li, B. Tang, J. Wang and Z. Bao, "On Multi-Hop Short-Packet Communications: Recoding or End-to-End Fountain Coding?," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, nr 8, s. 9229-9233, Aug. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3005409.
- [212] D. E. Lucani et al., "Fulcrum: Flexible Network Coding for Heterogeneous Devices," in IEEE Access, vol. 6, s. 77890-77910, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2884408.
- [213] R. J. Yair Enrique, G. Ismael and M. Jose, "Fulcrum Coding Performance on Fog Computing Architecture," in IEEE Latin America Transactions, vol. 18, nr 11, s. 1966-1974, November 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9398638.
- [214] V. Nguyen, J. A. Cabrera, D. You, H. Salah, G. T. Nguyen and F. H. P. Fitzek, "Advanced Adaptive Decoder Using Fulcrum Network Codes," in IEEE Access, vol. 7, s. 141648-141661, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2944232.
- [215] A. Shokrollahi, „Raptor Codes”, Foundations and Trends in Communications and Information Theory, t. 6, nr 3–4. Now Publishers, s. 213–322, 2010. doi: 10.1561/01000000060.
- [216] M. Allman, V. Paxson and E. Blanton, "TCP Congestion Control", RFC 5681, DOI 10.17487/RFC5681, September 2009, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc5681>>.
- [217] Henderson, T., Floyd, S., Gurtov, A., and Y. Nishida, "The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm", RFC 6582, DOI 10.17487/RFC6582, April 2012, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc6582>>..
- [218] Blanton, E., Allman, M., Wang, L., Jarvinen, I., Kojo, M., and Y. Nishida, "A Conservative Loss Recovery Algorithm Based on Selective Acknowledgment (SACK) for TCP", RFC 6675, DOI 10.17487/RFC6675, August 2012, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc6675>>.
- [219] Floyd, S., "HighSpeed TCP for Large Congestion Windows", RFC 3649, DOI 10.17487/RFC3649, December 2003, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc3649>>.
- [220] Rhee, I., Xu, L., Ha, S., Zimmermann, A., Eggert, L., and R. Scheffenegger, "CUBIC for Fast Long-Distance Networks", RFC 8312, DOI 10.17487/RFC8312, February 2018, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc8312>>.
- [221] D. W. Ngwenya, B. T. Maharaj and A. S. Alfa, "Markov Based Computational Model for Performance Evaluation of Congestion Control Variants," 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2019, s. 355-359.
- [222] M. A. Alrshah, M. Othman, B. M. Ali and Z. B. M. Hanapi, "Modeling the Throughput of the Linux-Based Agile-SD Transmission Control Protocol," in IEEE Access, vol. 4, s. 9724-9732, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2647237.
- [223] S. Poojary and V. Sharma, "Analytical Model for Congestion Control and Throughput with TCP CUBIC Connections," 2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011, 2011, s. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6134001.

- [224] W. Bao, V. W. S. Wong and V. C. M. Leung, "A Model for Steady State Throughput of TCP CUBIC," 2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010, 2010, s. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5684172.
- [225] H. D. Le, C. T. Nguyen, V. V. Mai, N. T. Dang, i A. T. Pham, „On the performance of TCP cubic over fading channels with AMC schemes”, 2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). IEEE, paź. 2017. doi: 10.1109/atc.2017.8.
- [226] H. D. Le et al., "Throughput Analysis for TCP Over the FSO-Based Satellite-Assisted Internet of Vehicles," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, nr 2, s. 1875-1890, Feb. 2022, doi: 10.1109/TVT.2021.3131746.
- [227] J. Mata-Díaz, J. Alins, J. L. Muñoz and O. Esparza, "A Simple Closed-Form Approximation for the Packet Loss Rate of a TCP Connection Over Wireless Links," in IEEE Communications Letters, vol. 18, nr 9, s. 1595-1598, Sept. 2014, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2.
- [228] T. K. Nguyen, C. T. Nguyen, H. D. Le and A. T. Pham, "TCP Performance Over Satellite-Based Hybrid FSO/RF Vehicular Networks: Modeling and Analysis," in IEEE Access, vol. 9, s. 108426-108440, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3101903.
- [229] A. Kashyap, S. Ganguly, i S. R. Das, „A measurement-based approach to modeling link capacity in 802.11-based wireless networks”, Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '07. ACM Press, 2007.
- [230] D. Gosain, A. Jaiswal, H. B. Acharya and S. Chakravarty, "Telemetron: Measuring Network Capacity Between Off-Path Remote Hosts," 2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN), 2021, s. 351-354, doi: 10.1109/LCN52139.2021.9524946.
- [231] A., Fatih: "FACEST: feedback-assisted estimation of end-to-end capacity in IP-based communication networks," Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences: Vol. 28: Nr 4, Article 1. (2020).
- [232] U. Devi, H. Viswanathan, R. Kokku, V. Pichapati and S. Kalyanaraman, "On the estimation of available bandwidth in broadband cellular networks," 2014 Eleventh Annual IEEE International Conference SECON, 2014, s. 19-27.
- [233] G. Nikolov, M. Kuhn, A. McGibney and B. -L. Wenning, "ASR - Adaptive Similarity-Based Regressor for Uplink Data Rate Estimation in Mobile Networks," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, nr 10, s. 2284-2294, Oct. 2020.
- [234] L. Song, E. Halepovic, A. Mohammed and A. Striegel, "CUP: Cellular Ultra-light Probe-based Available Bandwidth Estimation," 2021 IEEE/ACM 29th International Symposium on Quality of Service (IWQOS), 2021, s. 1-11.
- [235] B. Han, S. Lee, "Efficient Packet Error Rate Estimation in Wireless Networks," 2007 3rd International Conference on Testbeds and Research Infrastructure for the Development of Networks and Communities, 2007, s. 1-9.
- [236] C. A. G. D. Silva, C. M. Pedroso, "MAC-Layer Packet Loss Models for Wi-Fi Networks: A Survey," in IEEE Access, vol. 7, s. 180512-180531, 2019.

- [237] R. S. Sutton, A. G. Barto. Reinforcement Learning: An Introduction. 2018. A Bradford Book, Cambridge, MA, USA..
- [238] N. C. Luong et al., "Applications of Deep Reinforcement Learning in Communications and Networking: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, nr 4, s. 3133-3174, Fourthquarter 2019.
- [239] V. Mnih i in., „Human-level control through deep reinforcement learning”, *Nature*, t. 518, nr 7540. Springer Science and Business Media LLC, s. 529–533, luty 25, 2015. doi: 10.1038/nature14236.
- [240] Google Achieves Ai “Breakthrough” by Beating Go Champion, BBC, London, U.K., Jan. 2016. [Online]. Dostępne: <https://www.bbc.com/news/technology-35420579>.
- [241] Y. Chen et al., "Reinforcement Learning Meets Wireless Networks: A Layering Perspective," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, nr 1, s. 85-111, 1 Jan.1, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3025365.
- [242] L. Zhang, J. Tan, Y. -C. Liang, G. Feng and D. Niyato, "Deep Reinforcement Learning for Modulation and Coding Scheme Selection in Cognitive HetNets," *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019, s. 1-6,.
- [243] H. Vaezy, M. Salehi Heydar Abad, O. Ercetin, H. Yanikomeroğlu, M. J. Omid and M. M. Naghsh, "Beamforming for Maximal Coverage in mmWave Drones: A Reinforcement Learning Approach," in *IEEE Communications Letters*, vol. 24, nr 5, s. 1033-1037, May 2020.
- [244] X. Meng, H. Inaltekin and B. Krongold, "Deep Reinforcement Learning-Based Power Control in Full-Duplex Cognitive Radio Networks," *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2018, s. 1-7.
- [245] Y. Yu, S. C. Liew and T. Wang, "Carrier-Sense Multiple Access for Heterogeneous Wireless Networks Using Deep Reinforcement Learning," *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshop (WCNCW)*, 2019, s. 1-7.
- [246] G. Cao, Z. Lu, X. Wen, T. Lei and Z. Hu, "AIF: An Artificial Intelligence Framework for Smart Wireless Network Management," in *IEEE Communications Letters*, vol. 22, nr 2, s. 400-403, Feb. 2018.
- [247] W. Li, F. Zhou, K. R. Chowdhury and W. Meleis, "QTCP: Adaptive Congestion Control with Reinforcement Learning," in *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 6, nr 3, s. 445-458, 1 July-Sept. 2019.
- [248] A. Alzadjali, F. Esposito, J. Deogun, "A Contextual Bi-armed Bandit Approach for MPTCP Path Management in Heterogeneous LTE and WiFi Edge Networks," *2020 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC)*, 2020, s. 307-316.
- [249] A. Alzadjali, M. Mushtaq, F. Esposito, C. Fiandrino, J. Deogun, "OctoMap: Supporting Service Function Chaining via Supervised Learning and Online Contextual Bandit," *2021 IEEE 7th International Conference NetSoft*, 2021, s. 133-141.
- [250] H. van Hasselt, A. Guez, i D. Silver, „Deep Reinforcement Learning with Double Q-learning”. *arXiv*, 2015. doi: 10.48550/ARXIV.1509.06461.

- [251] F. Tan, P. Yan, i X. Guan, „Deep Reinforcement Learning: From Q-Learning to Deep Q-Learning”, Neural Information Processing. Springer International Publishing, s. 475–483, 2017.
- [252] A. Iqbal, M. -L. Tham, Y. C. Chang, "Double Deep Q-Network-Based Energy-Efficient Resource Allocation in Cloud Radio Access Network," IEEE Access, nr 9, s. 20440-20449, 2021.
- [253] GitHub - openai/gym: <https://github.com/openai/gym> [Dostępny: 16.03.2023].
- [254] GitHub - chainer/chainerml: <https://github.com/chainer/chainerml> [Dostępny: 16.03.2023].
- [255] A. Kanervisto, C. Scheller, i V. Hautamäki, „Action Space Shaping in Deep Reinforcement Learning”. arXiv, 2020. doi: 10.48550/ARXIV.2004.00980.
- [256] S. Hu, X. Chen, W. Ni, E. Hossain and X. Wang, "Distributed Machine Learning for Wireless Communication Networks: Techniques, Architectures, and Applications," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, nr 3, s. 1458-1493, thirdquarter 2021.
- [257] K. Zhang, Z. Yang, i T. Başar, „Multi-Agent Reinforcement Learning: A Selective Overview of Theories and Algorithms”, Handbook of Reinforcement Learning and Control. Springer International Publishing, s. 321–384, 2021.
- [258] T. Li et al., "Applications of Multi-Agent Reinforcement Learning in Future Internet: A Comprehensive Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, nr 2, s. 1240-1279, Secondquarter 2022.
- [259] Hubert, W., Le Roux, Y.-M., Ney, M., & Flamand, A. (2012). Impact of Ship Motions on Maritime Radio Links. W International Journal of Antennas and Propagation (T. 2012, s. 1–6). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2012/507094>.
- [260] K. Liu, J. Y. B. Lee, On Improving TCP Performance over Mobile Data Networks. W IEEE Transactions on Mobile Computing (T. 15, Issue 10, s. 2522–2536). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016.
- [261] B. H. Kim, D. Calin and I. Lee, "Advanced Split-TCP with End-to-End Protocol Semantics over Wireless Networks," 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2016, s. 1-7, doi: 10.1109/GLOCOM.2016.7841573.
- [262] A. Pathak i in., „Measuring and Evaluating TCP Splitting for Cloud Services”, Passive and Active Measurement. Springer Berlin Heidelberg, s. 41–50, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-12334-4\_5.
- [263] R. Jain and T. J. Ott, "NXG03-6: Design and Implementation of Split TCP in the Linux Kernel," IEEE Globecom 2006, 2006, s. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2006.334.
- [264] Yizhou Li i L. Jacob, „Proactive-wtcp:an end-to-end mechanism to improve tcp performance over wireless links”, 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, 2003. LCN '03. Proceedings. IEEE. doi: 10.1109/lcn.2003.1243171.
- [265] H. K. Molia i R. Agrawal, „A comprehensive study of cross - layer approaches for improving TCP performance in wireless networks”, 2015 International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT). IEEE, luty 2015. doi: 10.1109/iccct2.2015.

- [266] S. Kim and I. Yeom, "TCP-Aware Uplink Scheduling for IEEE 802.16," in *IEEE Communications Letters*, vol. 11, nr 2, s. 146-148, Feb. 2007, doi: 10.1109/LCOMM.2007.061509.
- [267] N. Shojaedin, M. Ghaderi and A. Sridharan, "TCP-aware scheduling in LTE networks," *Proceeding of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2014*, 2014, s. 1-9, doi: 10.1109/WoWMoM.2014.6918946.
- [268] Paxson, V., Allman, M., Chu, J., and M. Sargent, "Computing TCP's Retransmission Timer", RFC 6298, DOI 10.17487/RFC6298, June 2011, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc6298>>.
- [269] Sarolahti, P., Kojo, M., Yamamoto, K., and M. Hata, "Forward RTO-Recovery (F-RTO): An Algorithm for Detecting Spurious Retransmission Timeouts with TCP", RFC 5682, DOI 10.17487/RFC5682, September 2009, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc5682>>.
- [270] P. Sarolahti, M. Kojo, i K. Raatikainen, „F-RTO: an enhanced recovery algorithm for TCP retransmission ti”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, t. 33, nr 2. Association for Computing Machinery (ACM), s. 51–63, kwi. 2003. doi: 10.1145/956981.956987.
- [271] RADWIN Fiber in Motion. [Online] <https://www.rad.com/products/Broadband-Wireless/Point-to-Multipoint-Wireless-Radio-Mobility>. Dostępne [Dostępny: 16.03.2023].
- [272] P. Kulczycki, Estymatory jądrowe w zagadnieniach badań systemowych (rozdział w: P. Kulczycki, O. Hryniewicz, J. Kacprzyk (red.), *Techniki informacyjne w badaniach systemowych*, WNT, Warszawa 2007.
- [273] IP(8) - linux man page. [Online]. <https://linux.die.net/man/8/ip>. [Dostępny: 16.03.2023].
- [274] TC(8) - linux man page. [Online]. <https://man7.org/linux/man-pages/man8/tc.8.html>. [Dostępny: 16.03.2023].
- [275] IPERF (1) - linux man page. [Online]. <https://linux.die.net/man/1/iperf>. [Dostępny: 16-May-2022].
- [276] Make TCP-RTO-MAX a variable. [Online] <http://lists.openwall.net/netdev/2007/06/25/34>. [Dostępny: 16.03.2023].





## WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SYMBOLI

---

$PL_{FS}$	Tłumienie sygnału radiowego w wolnej przestrzeni
$\lambda$	Długość fali rozważanego sygnału
$f$	Częstotliwość rozważanego sygnału
$d$	Odległość pomiędzy anteną nadawczą i odbiorczą
$PL_{2R}$	Tłumienie sygnału radiowego dla modelu dwusieczkowego
$h_r$	Wysokość ulokowania anteny odbiorczej
$h_t$	Wysokość ulokowania anteny nadawczej
$PL_{3R}$	Tłumienie sygnału radiowego dla modelu trójściżkowego
$d_{br}$	Wartość graniczna modelu trójściżkowego
$E$	Natężenie pola elektromagnetycznego
$a_e$	Ekwiwalent długości promienia Ziemi
$m_v$	Masa jednostki pływającej
$I_{Gxx}, I_{Gyy}, I_{Gzz}$	Momenty bezwładności w kierunkach $xx, yy, zz$
$\psi, \theta, \varphi$	Miary kątowe odpowiednio dla ruchów <i>roll, pitch, yaw</i>
$X, Y, Z$	Składowe siły działające odpowiednio wzdłuż osi $x, y, z$
$K, P, R$	Momenty sił w kierunkach $xx, yy, zz$
$\theta_{max}$	współczynnik skalowania określający maksymalną wartość kąta $\theta$
$t_w$	Okres fali
$\zeta_\theta$	Współczynnik szybkości zmiany wartości kąta <i>pitch</i>
$\varphi_{\theta_1}$ i $\varphi_{\theta_2}$	Wartości fazy początkowej składowych funkcji trygonometrycznych
$n_t$	Liczba powtórzeń testu
$t_o$	Czas obserwacji łącza
$t_p$	Okres na który realizowana jest predykcja



$t_s$	Odstęp pomiędzy kolejnymi oknami uwzględnianymi w procesie segmentacji
$I$	Liczba interfejsów dostępna w węźle
$\eta_A$	Precyzja metody wyboru łącza
$\eta_T$	Średnia wartość stosunku przepływności testowego połączenia TCP wyznaczona w czasie $t_p$ dla wybranego łącza do maksymalnej możliwej do uzyskania w danym teście przepływności testowego połączenia TCP
$T_i(t_p)$	Średnia przepływności testowego połączenia TCP w czasie $t_p$ dla $i$ -tego łącza
$i_s$	Łącze wybrane przy użyciu analizowanej metody
$\eta_B$	Efektywność bitowa analizowanej metody
$D_i$	Liczba bitów przesłanych przez $i$ -te łącze w trakcie procedury oceny łącza
$M$	Liczba segmentów danych wykorzystana jako dane wejściowe sieci neuronowej
$T_{L2}$	Czas potrzebny na realizację przełączenia w niższej warstwie
$T_{MAG-LMA}$	Opóźnienie pomiędzy elementami MAG i LMA
$T_{MAG-MAG}$	Opóźnienie pomiędzy pMAG-nMAG
$T_{IN}$	Czas potrzebny na realizację wewnętrznych procedur węzła
$T_{MN-MAG}$	Opóźnienie na łączu MN-MAG
$T_R$	Czas pomiędzy przesłaniem raportu o konieczności realizacji przełączenia a rzeczywistym wystąpieniem zerwania połączenia.
$T_{LI}$	Czas potrzebny na rekonfigurację interfejsu logicznego.
$\tau$	Współczynnik narzutu buforowania.
$T^{METH/}$	Przerwa w łączności wynikająca z przełączenia dla analizowanych metod - PMIP, FREA, FPRO, LISH odnoszących się do PMIPv6, reaktywnego PFMIP, proaktywnego PFMIP i rozwiązania proponowanego w rozprawie.
$p_{bd}$	Prawdopodobieństwo błędy dekodowania dla kodu RaptorQ
$s^K$	Liczba symboli źródłowych

$s^R$	Liczba symboli naprawczych
$s^N$	Suma liczby symboli źródłowych i naprawczych
$s_i^W$	Liczba symboli wysłanych na $i$ -tym interfejsie
$s_i^O$	Liczba symboli odebranych na $i$ -tym interfejsie
$\mathbf{s}^W$	Wektor z liczbą symboli wysłanych na poszczególnych interfejsach
$\mathbf{s}^O$	Wektor z liczbą symboli odebranych na poszczególnych interfejsach
$s^W$	Liczba symboli wysłanych dla scenariuszy wykorzystujących jeden interfejs
$s^O$	Liczba symboli odebranych dla scenariuszy wykorzystujących jeden interfejs
$l_{pkt}$	Rozmiar pakietu
$l_{IPv6}$	Długość nagłówka IPv6
$l_s$	Długość segmentu danych
$t_c$	Czas potrzeby do kodowanie/dekodowanie
$\lambda_e$	Intensywność strat pakietów
$\lambda_e^1$	Efektywna intensywność strat pakietów przy zastosowanym kodowaniu dla jednego łącza
$t'_{pkt}$	Czas transmisji pakietu po zastosowaniu kodowani przez jeden interfejs
$t''_{pkt}$	Czas transmisji pakietu po zastosowaniu kodowani przez wiele interfejsów
$C_i$	Przepustowością $i$ -tego łącza
$C_{eff}$	Efektywną przepustowością łącza
$\mathcal{T}$	Średnia przepływność połączenia TCP
$N_M$	Liczba stanów w analizowanym modelu
$\beta$	Współczynnik zmniejszenia rozmiaru okna nadawczego
$\alpha$	Współczynnik wzrostu rozmiaru okna nadawczego
$w_{max}$	Maksymalny rozmiar okna nadawczego

$w_{cwnd}$	Rozmiar okna nadawczego
$w_i$	Uśredniony rozmiar okna nadawczego dla $i$ -tego stanu
$T_K$	Czas potrzeby do zwiększenia aktualnej wartości okna nadawczego tak aby osiągnęło wartość $w_{max}$
$x_k$	Długość okna nadawczego w chwili $k$
$\tilde{x}_k$	Skwantowana długość okna nadawczego w chwili $k$
$X_k$	Stan, w którym znajduje się model w chwili $k$
$p_p$	Prawdopodobieństwo straty pakietu z powodu przeciążenia
$p_t$	Prawdopodobieństwo utraty pakietu z powodu błędu w transmisji
$p'_t$	Prawdopodobieństwo utraty pakietu z powodu błędu w transmisji przy zastosowaniu kodowania na jednym interfejsie
$p''_t$	Prawdopodobieństwo utraty pakietu z powodu błędu w transmisji przy zastosowaniu kodowania przez wiele interfejsów
$p_s$	Prawdopodobieństwo straty segmentu z powodu błędu w transmisji
$p_{si}$	Prawdopodobieństwo błędu przy przesyłaniu pojedynczego segmentu przez $i$ -ty interfejs
$t_{w_{cwnd}}$	Czas potrzebny na zwiększenie rozmiaru okna nadawczego
$\tau_{i,j}$	Średni czas potrzeby na przejście ze stanu $i$ do stanu $j$
$w_r$	Współczynnika redukcji zaproponowanego algorytmu heurystycznego
$T_{org}$	Przepływność połączenia TCP realizowanego przez najlepszy z dostępnych interfejsów
$T_c$	Przepływność połączenia TCP realizowanego przy zastosowaniu kodowania przy jednym dostępnym łączu
$T_{he}$	Przepływność połączenia TCP realizowanego przy zastosowaniu kodowania sieciowego poprzez wiele interfejsów dla algorytmu heurystycznego
$T_{rl}$	Przepływność połączenia TCP realizowanego przy zastosowaniu kodowania sieciowego poprzez wiele interfejsów dla algorytmu uczenia ze wzmocnieniem
$\delta_x$	Maksymalny błąd względny występujący przy pomiarach parametrów wejściowych analizowanych algorytmów

<i>newRTT</i>	Pierwsza zmierzona wartość TRR
<i>sRTT</i>	wygładzony czas RTT
<i>varRTT</i>	Współczynnik zmienności RTT
<i>RTO</i>	Okres pomiędzy kolejnymi retransmisjami



## WYKAZ SKRÓTÓW

---

AAA	Authentication Authorization, Accounting
ACK	Acknowledgment
AHP	Analytic Hierarchy Process
API	Application Programming Interface
ASC	Announcement of Signaling Channels
ASM	Application Specific Messages
BDP	Bandwidth-Delay Product
BLOS	Beyond Line Of Sight
C-MAB	Contextual Multi-Armed Bandits
CCS	Coordinated Centralized Scheduling
CCTV	Closed-Circuit TeleVision
CDS	Coordinated Distributed Scheduling
CPE	Customer-Premises Equipment
DATSA	Distributed Adaptive Time Slot Allocation
DLR-LEM	Deep Learning Regression Link Evaluation Method
DTN	Delay-Tolerant Network
DQN	Deep Q-Network
DDQN	Double Deep Q Networks
EPIRB	Emergency Position-Indicating Radio Beacon
ESS	Extended Service Set
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process

FEC	Forward Error Correction
FH-PMIPv6	Fast Handover for Proxy Mobile IPv6
FWR	Flying Wireless Routers
GMDSS	Global Maritime Distress and Safety System
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HB	Heart Beat
HF	High Frequency
HI	Handover Initiation
HMS	High capacity Mobile Subscriber
HNP	Home Network Prefix
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
ICT	Information and Communications Technology
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	Internet Engineering Task Force
IMO	International Maritime Organization
IP	Internet Protocol
IPX	Internetwork Packet Exchange
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
LAN	<i>Local Area Network</i>



LEO	Low Earth Orbit
LISH	Logical Interface Soft Handover
LMA	Local Mobility Anchor
LQI	Link Quality Indicator
LSTM	Long-Short-Term Memory
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	Medium Access Control
MAG	Mobile Access Gateway
MCDM	Multiple-Criteria Decision Making
MDP	Markov Decision Process
MEW	Multiplicative Exponent Weighting
MIH	<i>Media Independent Handover</i>
MMJŁ	Moduł Monitorowania Jakości Łączy
MMSI	Maritime Mobile Service Identity
MN	Mobile Node
MNI	Mobile Node Identifier
MOB	Man Over-Board
MPTCP	MultiPath TCP
MS	Maritime Service
MZM	Moduł Zarządzania Mobilnością
OTI	Object Transmission Information

PAN	Polska Akademia Nauk
PBA	Proxy Binding <i>Acknowledgement</i>
PBU	Proxy Binding Update
PIB	Państwowy Instytut Badawczy
PID	Payload ID
PMIPv6	Proxy Mobile IPv6
PPU	Portable Pilot Unit
RA	Router Advertisement
RACH	Random-Access Channel
RFC	Request For Comments
RLNC	Random Linear Network Codes
RNN	Recurrent Neural Networks
RS	Router Solicitation
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTO	Retransmission Timeout
RTT	Round Trip Time
SAW	Simple Additive Weighting
SBB	Satellite Bulletin Board
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDL-LEM	Simultaneous Deep Learning Link Evaluation Method
SLAAC	Stateless Address Autoconfiguration

SNIR	Signal to Noise plus Interference Ratio
SNMP	Simple Network Management Protocol
SOLAS	Safety of Life at Sea
SSH	Secure Shell
TBB	Terrestrial Bulletin Board
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
TRITON	TRI-Media Telematic Oceanographic Network
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VDES	VHF Data Exchange System
VDL	VHF Data Link
VDR	Voyage Data Recorder
VHF	Very High Frequency
VTs	Vessel Traffic Service
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks