



Załącznik 2 - Autoreferat wnioskodawcy

Spis treści

1	Imię i Nazwisko	2
2	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe i artystyczne	2
3	Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych	2
4	Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)	3
4.1	Główne osiągnięcie naukowe	5
4.1.1	Wprowadzenie do głównego osiągnięcia badawczego	8
4.1.2	Umotywowanie prac badawczych	9
4.1.3	Cele prac badawczych związane z głównym osiągnięciem	11
4.1.4	Opis uzyskanych wyników – informacje edytorskie	11
4.1.5	Opis uzyskanych wyników oraz ich istotności przy projektowaniu rzeczywistych systemów IoT	12
4.2	Podsumowanie głównego osiągnięcia	29
4.3	Inne osiągnięcia naukowe	32
5	Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej	34
6	Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	36
7	Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.	38
7.1	Szkolenia i staże	38
7.2	Udział w projektach B+R	39
7.3	Działalność organizacyjna	40
7.4	Działalność ekspercka	40
7.5	Członkostwo w komitetach organizacyjnych konferencji	41
7.6	Recenzje	41
7.7	Nagrody i wyróżnienia	42
7.8	Dane naukometryczne	42

1 Imię i Nazwisko

Maciej Nikodem

2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe i artystyczne

1. Uzyskany stopień naukowy: doktor nauk technicznych w dyscyplinie informatyka

Data uzyskania: 7 maja 2008 roku

Miejsce: Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska

Tytuł rozprawy: Metody ochrony przed kryptoanalizą z uszkodzeniami

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Biernat

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Mirosław Kutylowski

prof. dr hab. inż. Roman Rykaczewski

2. Studia podyplomowe: Podpis elektroniczny i infrastruktura klucza publicznego

Data ukończenia: 22 grudnia 2004 roku

Miejsce: Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wroclawska

3. Uzyskany tytuł zawodowy: magister inżynier

Data uzyskania: 21 lipca 2005 rok

Miejsce: Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka, Specjalność: Komputerowe Systemy Sterowania

Tytuł pracy: System sterowania instalacją do pozyskiwania energii słonecznej

Promotor: dr inż. Zbigniew Zajda

4. Uzyskany tytuł zawodowy: magister inżynier

Data uzyskania: 4 lipca 2003 rok

Miejsce: Wydział Elektroniki, Politechnika Wroclawska

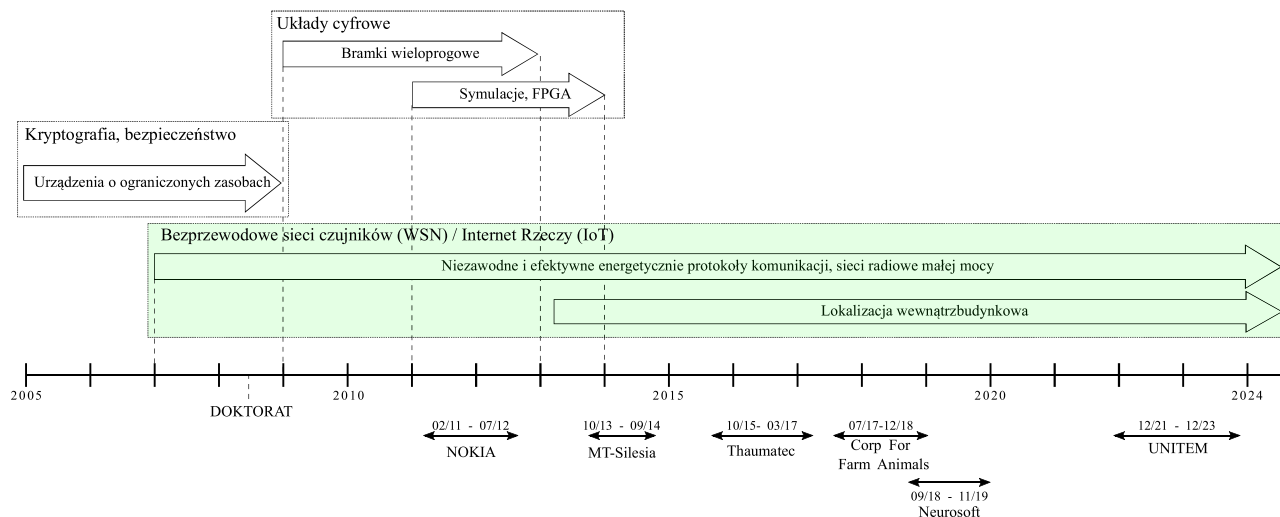
Kierunek studiów: Informatyka, Specjalność: Inżynieria Internetowa

Tytuł pracy: Metody ochrony danych w transakcjach internetowych

Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Biernat

3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

01.09.2012 - obecnie	Adiunkt naukowo-dydaktyczny na Wydziale Informatyki i Telekomunikacji (wcześniej Wydział Elektroniki), Politechniki Wroclawskiej
01.09.2008 - 31.08.2012	Asystent naukowo-dydaktyczny na Wydziale Elektroniki, Politechniki Wroclawskiej



Rysunek 1: Główne obszary osiągnięć naukowych w okresie doktoratu i po jego zakończeniu (nad osią czasu), oraz najważniejsze projekty badawczo-rozwojowe i badawczo-wdrożeniowe realizowane we współpracy z otoczeniem biznesowym uczelni (pod osią czasu). Kolorem zielonym oznaczono obszar badawczy, którego dotyczy główne osiągnięcie naukowe.

4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

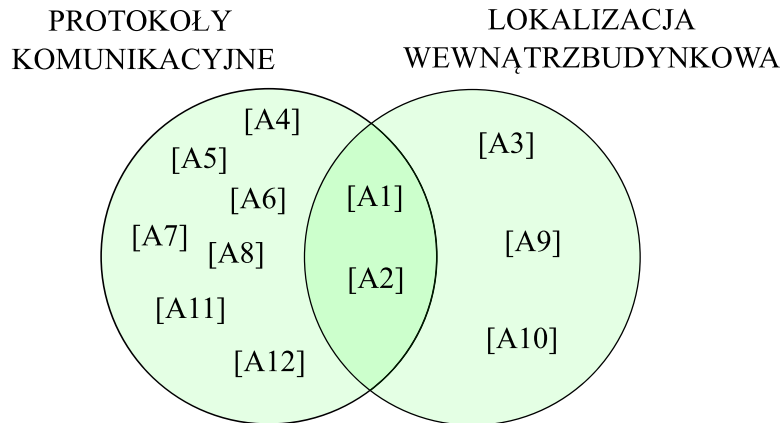
Pod koniec jednolitych studiów magisterskich zainteresowałem się kryptografią zwracając szczególną uwagę na praktyczne aspekty bezpieczeństwa fizycznych urządzeń realizujących operacje kryptograficzne. Doktorat realizowany w zespole Architektury Komputerów (prof. Janusz Biernat, prof. Stanisław Piestrak) dotyczył bezpieczeństwa urządzeń o ograniczonych zasobach, energii, pamięci i mocy obliczeniowej, dla których typowe rozwiązania kryptograficzne były niepraktyczne lub nieosiągalne, a potencjalne zagrożenia wynikały nie tylko z konstrukcji algorytmów, ale również ich implementacji i fizycznej realizacji urządzeń, na których działały. Problemy, które wówczas podejmowałem, dotyczyły dwóch zastosowań: kart mikroprocesorowych oraz czujników używanych w bezprzewodowych sieciach czujników (ang. *Wireless Sensor Network - WSN*) [1].

Kończąc doktorat (maj 2008) postanowiłem skupić swoją główną działalność naukową na gwałtownie rozwijających się wówczas sieciach WSN, a następnie systemach Internetu Rzeczy (ang. *Internet of Things - IoT*), zajmując się opracowaniem niezawodnych i efektywnych energetycznie protokołów komunikacji dla różnych zastosowań tych sieci. Ich efektem były m.in. publikacje: [A4, A5, A6, A7, A8, A11, A12] oraz [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

W ramach stażu w firmie CISCO Systems Inc. (listopad-grudzień 2012) miałem okazję testować wprowadzane wówczas rozwiązanie lokalizacji użytkowników sieci WiFi, które bazowało na pomiarach mocy sygnału radiowego oraz obserwować projektowanie pierwszych rozwiązań, których celem było wykorzystanie informacji o kącie nadejścia sygnału radiowego. Ogromny potencjał aplikacyjny rozwiązań lokalizacyjnych spowodował, że od roku 2013 skupiłem się na praktycznych zastosowaniach sieci radiowych małej mocy z naciskiem na ich wykorzystanie w systemach lokalizacji wewnątrzbudynkowej. Efektem prac były m.in. publikacje: [A1, A2, A3, A9, A10] oraz [10, 11, 12, 13].

W ramach prac nad protokołami komunikacyjnymi i systemami lokalizacji wewnątrzbudynkowej zrealizowałem 5 projektów aplikacyjnych we współpracy z przedsiębiorstwami, tworząc dedykowane rozwiązania wykorzystujące komunikację radiową małej mocy. Efektem tych projektów były zarówno publikacje naukowe jak i praktyczne zastosowania opracowanych rozwiązań:

- UGPS (MT-Silesia Sp. z o.o., 10.2013–09.2014) – w pełni funkcjonalny prototyp systemu dla kopalni podziemnych wykorzystujący technologię UWB (Ultra WideBand) do równoczesnej komunikacji i lokalizacji urządzeń [10].
- LoRaNet (Thaumatec Sp. z o.o., 10.2015–03.2017) – pierwsza publiczna sieć radiowa LoRaWAN we Wrocławiu, rozwiązania wykorzystujące technologię LoRaWAN (Mobile LoRa Gateway) oraz system określania położenia na podstawie pomiaru parametrów sygnału radiowego.



Rysunek 2: Główne osiągnięcie naukowe należy rozpatrywać w kontekście dwóch, powiązanych ze sobą, obszarów badawczych

- MAFiA (Corp For Farm Animals, 07.2017–12.2018) – system monitorowania dobrostanu krów mlecznych (Cow-Monitor) z użyciem komunikacji Bluetooth Low Energy [A1, A2, A4, A5, A6].
- NeuroFlow (Neurosoft Sp. z o.o., 09.2018–11.2019) – system i protokół komunikacji radiowej dla śledzenia ruchu pojazdów i pomiaru ruchu drogowego w obrębie skrzyżowania (VTRACK), działający z wykorzystaniem standardu IEEE 802.15.4 [A7, A8].
- U-Pick (UNITEM Sp. z o.o., 12.2021–12.2023) – system wsparcia lokalizacji pracowników i zasobów na terenie fabryk i magazynów wykorzystujący komunikację Bluetooth Low Energy [A3].

Większość publikacji z cyklu zgłaszanego jako główne osiągnięcie naukowe powstało jako efekt współpracy z przemysłem, realizowanej w ramach grantów i projektów przyznawanych na drodze konkursów, i realizacji zadań o charakterze aplikacyjnym z ich bezpośrednimi odbiorcami. Pozostałe publikacje z cyklu są efektem zaangażowania w projekty badawcze realizowane na Politechnice Wrocławskiej:

- MNiSW POIG.01.03.01-02-002/08, "Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku - modelowanie i monitoring zagrożeń", 01.2008–12.2011, [A12],
- NCN N 51,483740, "Bezprzewodowe sieci czujników w zastosowaniach monitorowania środowiska i alarmowania o zagrożeniach, zapewniające długi czas działania i dużą niezawodność", 05.2011–12.2013, [A11],
- FNP, "Narzędzia wspomagające projektowanie systemów lokalizacji osób i sprzętu w obiektach zamkniętych przy użyciu komunikacji bezprzewodowej małej mocy", 01.2015–12.2015, [A9, A10].

Głównym osiągnięciem naukowym, prezentowanym w ramach niniejszego wniosku, jest cykl publikacji naukowych zatytułowany

Dedykowane protokoły i lokalizacja wewnątrzbudynkowa w systemach Internetu Rzeczy.

Publikacje tego cyklu dotyczą dwóch obszarów, które mają część wspólną (Rysunek 2). Pierwszym z obszarów jest lokalizacja wewnątrzbudynkowa, która wykorzystuje technologie radiowe małej mocy, pracujące w ogólnodostępnych pasmach radiowych. Użycie tych technologii do określenia położenia urządzeń wymaga przeprowadzenia komunikacji pomiędzy nimi, która pozwala im dokonać pomiaru niezbędnych parametrów. Komunikacja ta wymaga istnienia protokołów komunikacyjnych, które powinny jednocześnie zapewnić efektywną i niezawodną transmisję danych użytkowników oraz możliwość dokonania niezbędnych pomiarów lokalizacyjnych. Ponadto, powinny zapewnić wydajne i oszczędne energetyczne działanie poszczególnych elementów systemu i całej sieci. Drugi obszar głównego osiągnięcia naukowego dotyczy wydajnych, niezawodnych i efektywnych protokołów komunikacji. Główne osiągnięcie naukowe zostało szerzej omówione w rozdziale 4.1 i podsumowane w rozdziale 4.2.

Inne osiągnięcia naukowe wynikają z prac badawczych prowadzonych wspólnie z zespołem Architektury Komputerów w tym, w ramach współpracy międzynarodowej z uniwersytetem Virginia Tech (Blacksburg, USA). Inne osiągnięcia prezentowane w ramach wniosku obejmują:

- prace badawcze i wynikające z nich publikacje w obszarze projektowania układów logicznych w oparciu o urządzenia o ujemnej rezystancji dynamicznej [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23],
- prace badawcze i wynikające z nich publikacje w obszarze wykorzystania układów rekonfigurowalnych do przyspieszania symulacji oraz modelowania zachowania temperaturowego układów cyfrowych [24, 25, 26, 27, 28, 29].

Osiągnięcia te zostały szerzej opisane w rozdziale 4.3.

4.1 Główne osiągnięcie naukowe

W skład cyklu **Dedykowane protokoły i lokalizacja wewnątrzbudynkowa w systemach Internetu Rzeczy**, wchodzi 12 publikacji opublikowanych w międzynarodowych czasopismach naukowych (zawartych w wykazie Ministerstwa Edukacji i Nauki, w tym 5 posiadających Impact Factor) oraz w recenzowanych materiałach konferencyjnych, w tym 5 ujętych w wykazie CORE. Lista prac została uszeregowana chronologicznie i zawiera informacje o liczbie punktów MEiN, wartości wskaźnika Impact Factor, liczbie cytowań na podstawie bazy Web of Science (WoS), Scopus (Sco) oraz Google Scholar (GS), a także określeniu mojego wkładu. Liczby cytowań i wartości wskaźników zostały podane na dzień 10 września 2024. Do określenia wkładu wykorzystałem taksonomię CRediT¹ opracowaną przez wydawnictwo Elsevier. Wszystkie prace wchodzące w skład cyklu zostały opublikowane po uzyskaniu tytułu doktora nauk technicznych.

- A1 Kamil Szyc, **Maciej Nikodem**, Michał Zdunek, *Bluetooth low energy indoor localization for large industrial areas and limited infrastructure*, Ad Hoc Networks, Elsevier 2023, 20, 6371, <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103024>
- | | | |
|------------|-----|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Sco | GS |
| 13 | 20 | 26 |
- CRediT: Konceptualizacja, Metodologia, Tworzenie, Walidacja, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór.
- Mój wkład: Zaplanowanie i przeprowadzenie testów lokalizacyjnych na obszarze testowym, opracowanie koncepcji wykorzystania pomiarów całkowitej mocy sygnału odebranego (ang. *Total Signal Strength - TSS*) do określania położenia, jako elementu uzupełniającego lub zastępującego pomiar mocy sygnału odebranego (ang. *Received Signal Strength Indicator - RSSI*). Zebranie, opracowanie i analiza danych pomiarowych. Opracowanie i implementacja jednej z trzech zaproponowanych metod lokalizacji, zdefiniowanie miar oceny jakości lokalizacji. Redakcja pierwszego i ostatecznego tekstu pracy, wizualizacja uzyskanych wyników. Nadzór nad realizacją całości badań.
- Impact factor: 4.4
Punkty MEiN: 100
Udział: 70%
- A2 **Maciej Nikodem**, *Bluetooth Low Energy livestock positioning for smart farming applications*, 21st International Conference Computational Science - ICCS 2021, Krakow, Poland, June 16-18, 2021, s. 55-67 https://doi.org/10.1007/978-3-030-77970-2_5
- | | | |
|------------|-----|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Sco | GS |
| 0 | 7 | 8 |
- CRediT: Konceptualizacja, Metodologia, Tworzenie, Walidacja, Analiza formalna, Dochodzenie, Zasoby, Ochrona danych, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór.
- Mój wkład: Opracowanie koncepcji lokalizacji zwierząt hodowlanych na terenie obory z wykorzystaniem pomiarów sygnału radiowego BLE z użyciem ograniczonej infrastruktury, pomiarów mocy sygnału odebranego (RSSI). Zebranie, opracowanie i analiza pomiarów. Redakcja pracy, wizualizacja wyników.
- Impact factor: –
Punkty MEiN: 140
Udział: 100%

¹<https://info.orcid.org/pl/credit-for-research-contribution/>

- A3 **Maciej Nikodem**, Przemysław Szeliński, *Channel Diversity for Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy and Extended Advertisements*, IEEE Access, vol. 9, pp. 169261-169269, 2021
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137849>
CReditT: Konceptualizacja, Metodologia, Walidacja, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór.
Mój wkład: Opracowanie koncepcji wykorzystania wielu kanałów radiowych do lokalizacji wewnętrzzbudynkowej z pomiarem siły sygnału radiowego. Opracowanie dwóch architektur systemu lokalizacji wykorzystujących informacje pomiarowe z wielu kanałów. Opracowanie koncepcji eksperymentów, przygotowanie i analiza wyników. Redakcja pierwszego i ostatecznego tekstu pracy, wizualizacja wyników.
- Cytowania:

WoS	Scopus	GS
9	11	16

Impact factor: **3.476**
Punkty MEiN: 100
Udział: 70%
- A4 **Maciej Nikodem**, Mariusz Ślabicki, Marek Bawiec, *Efficient Communication Scheme for Bluetooth Low Energy in Large Scale Applications*, Sensors 2020, 20, 6371
<https://doi.org/10.3390/s20216371>
CReditT: Konceptualizacja, Metodologia, Tworzenie, Walidacja, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór.
Mój wkład: Opracowanie koncepcji działania bezpołączeniowej komunikacji BLE z dodatkowym mechanizmem potwierdzania odbioru pakietów rozgłoszeniowych i wstrzymywania dalszych transmisji. Implementacja rozwiązania w rzeczywistym urządzeniu, przeprowadzenie testów, analiza danych pomiarowych, opracowanie wyników eksperymentów. Redakcja pierwszego i ostatecznego tekstu pracy, wizualizacja uzyskanych wyników.
- Cytowania:

WoS	Scopus	GS
12	11	16

Impact factor: **3.576**
Punkty MEiN: 100
Udział: 60%
- A5 **Maciej Nikodem**, Marek Bawiec, *Experimental Evaluation of Advertisement-Based Bluetooth Low Energy Communication*, Sensors 2020, 20, 107
<https://doi.org/10.3390/s20010107>
CReditT: Konceptualizacja, Metodologia, Tworzenie, Walidacja, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór.
Mój wkład: Opracowanie koncepcji wykorzystania wiadomości rozgłoszeniowych (ang. *advertisement*) standardu BLE do niezawodnej transmisji danych pomiarowych w systemach monitorowania. Opracowanie koncepcji, implementacja oprogramowania i przeprowadzenie eksperymentów weryfikujących skuteczność transmisji dla wielu urządzeń pracujących na małym obszarze. Zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów, analiza i opracowanie zebranych danych. Redakcja pierwszego i ostatecznego tekstu pracy, wizualizacja uzyskanych wyników.
- Cytowania:

WoS	Scopus	GS
16	29	37

Impact factor: **3.576**
Punkty MEiN: 100
Udział: 70%
- A6 Olgierd Unold, **Maciej Nikodem**, Marek Piasecki, Kamil A. Szyc, Henryk Maciejewski, Marek Bawiec, Paweł Dobrowolski, Michał Zdunek, *IoT-based cow health monitoring system*, 20th International Conference Computational Science - ICCS 2020, Amsterdam, the Netherlands, June 3-5, 2020, s. 344-356
https://doi.org/10.1007/978-3-030-50426-7_26
CReditT: Metodologia, Tworzenie, Walidacja, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja.
Mój wkład: Opracowanie koncepcji systemu monitorowania dobrostanu zwierząt: urządzenia monitorujące, system komunikacji radiowej, przetwarzanie i obróbka gromadzonych danych. Udział w stworzeniu systemu monitorowania, oprogramowaniu urządzeń końcowych i pośredniczących, uruchomienie i testy pierwszych urządzeń w hodowlach. Udział w redakcji pierwszego i ostatecznego tekstu pracy.
- Cytowania:

WoS	Scopus	GS
33	52	88

Impact factor: –
Punkty MEiN: 140
Udział: 30%

- A7 **Maciej Nikodem**, Mariusz Słabicki, Tomasz Surmacz, Paweł Mrówka, Cezary Dołęga, *Multi-camera vehicle tracking using edge computing and low-power communication*, Sensors, 2020, vol. 20, nr 11, art. 3334, s. 1-16
<https://doi.org/10.3390/s20113334>
CReditT: Metodologia, Tworzenie, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór.
Mój wkład: Opracowanie systemu komunikacji radiowej dla kamer monitorujących ruch pojazdów. Opracowanie koncepcji testów i rozmieszczenia urządzeń na poligonach testowych. Udział w testach, analiza i opracowanie wyników. Redakcja pierwszego i ostatecznego tekstu pracy. Nadzór nad prowadzonymi pracami.
- Cytowania:

WoS	Scopus	GS
17	25	32

Impact factor: **3.576**
Punkty MEiN: 100
Udział: 70%
- A8 **Maciej Nikodem**, Tomasz Surmacz, Mariusz Słabicki, Dominik Hofman, Piotr Klimkowski, Cezary Dołęga, *Robust radio communication protocol for traffic analysis application*, Theory and Applications of Dependable Computer Systems : proceedings of the Fifteenth International Conference on Dependability of Computer Systems DepCoS-RELCOMEX, June 29 - July 3, 2020
https://doi.org/10.1007/978-3-030-48256-5_45
CReditT: Konceptualizacja, Metodologia, Tworzenie, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór.
Mój wkład: Opracowanie architektury systemu komunikacji oraz architektury protokołu komunikacji, opracowanie mechanizmów zapewniających poprawność i niezawodność komunikacji, udział w tworzeniu oprogramowania, prowadzenie testów na poligonie testowym, analiza wyników i ich wizualizacja. Redakcja pierwszego i ostatecznego tekstu pracy. Nadzór nad prowadzonymi pracami.
- Cytowania:

WoS	Scopus	GS
0	1	1

Impact factor: –
Punkty MEiN: 40
Udział: 50%
- A9 Tomasz Jankowski, **Maciej Nikodem**, *SMILE - simulator for methods of indoor localization*, 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 24-27 September 2018, Nantes, France. [Danvers, MA] : IEEE, cop. 2018. s. 1-7
<https://doi.org/10.1109/IPIN.2018.8533754>
CReditT: Konceptualizacja, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Nadzór, Pozyskanie finansowania.
Mój wkład: Opracowanie koncepcji i założeń symulatora, pozyskanie finansowania oraz nadzór nad realizacją prac, analiza wyników, redakcja pierwszej i końcowej wersji pracy.
- Cytowania:

WoS	Scopus	GS
4	4	7

Impact factor: –
Punkty MEiN: 20
Udział: 50%
- A10 Tomasz Jankowski, **Maciej Nikodem**, *Synchronization-free TDoA localization method for large scale wireless networks*, Eighth International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, September 18-21, 2017, Sapporo, Japan, 2017. s. 1-6
<https://doi.org/10.1109/IPIN.2017.8115890>
CReditT: Konceptualizacja, Metodologia, Tworzenie, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie – projekt oryginalny, Pisanie – recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór, Pozyskanie finansowania.
Mój wkład: Opracowanie koncepcji protokołu komunikacji, planowanie badań i eksperymentów, analiza wyników, redakcja pierwszej i ostatecznej wersji pracy. Pozyskanie finansowania i nadzór nad prowadzonymi pracami.
- Cytowania:

WoS	Scopus	GS
2	5	6

Impact factor: –
Punkty MEiN: 20
Udział: 60%

A11 **Maciej Nikodem**, Mariusz Ślabicki, Tomasz Surmacz, Bartosz A. Wojciechowski, *Transmission power control based on packet reception rate*, 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), March 30th to April 2nd, 2014, Dubai, s. 1-4 <https://doi.org/10.1109/NTMS.2014.6814057>

CRedit: Konceptualizacja, Metodologia, Tworzenie, Walidacja, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie - projekt oryginalny, Pisanie - recenzowanie i redakcja, Wizualizacja.

Mój wkład: Opracowanie i analiza koncepcji doboru mocy transmisji na podstawie skuteczności przesyłania pakietów danych. Opracowanie symulatora w środowisku MATLAB, udział w badaniach symulacyjnych, analiza i opracowanie wyników. Redakcja pierwszego i ostatecznego tekstu pracy, przygotowanie wizualizacji metod oraz wyników.

Cytowania:

WoS	Scopus	GS
0	6	10

Impact factor: –

Punkty MEiN: 15

Udział: 50%

A12 **Maciej Nikodem**, Bartosz A. Wojciechowski, *Upper bounds on network lifetime for clustered wireless sensor networks*, The Fourth IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, NTMS 2011, February 7 - 10, 2011, Paris, France, IEEE, s. 1-6

<https://doi.org/10.1109/NTMS.2011.5720657>

CRedit: Konceptualizacja, Metodologia, Tworzenie, Walidacja, Analiza formalna, Dochodzenie, Pisanie - projekt oryginalny, Pisanie - recenzowanie i redakcja, Wizualizacja, Nadzór.

Mój wkład: Sformułowanie celu badawczego, opracowanie koncepcji eksperymentów i nadzorowaniu ich przebiegu. Zaimplementowałem symulator działania sieci w środowisku MATLAB oraz algorytmy programowania liniowego i całkowitoliczbowego wykorzystywane w pracy. Przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych oraz analizy uzyskanych wyników. Przygotowanie wykresów wizualizujących wyniki testów, udział w pisaniu pierwszej i ostatecznej wersji pracy.

Cytowania:

WoS	Scopus	GS
0	5	15

Impact factor: –

Punkty MEiN: 13

Udział: 60%

4.1.1 Wprowadzenie do głównego osiągnięcia badawczego

Choć pojęcia bezprzewodowych sieci czujników (WSN), Internetu Rzeczy (IoT) i Internetu Wszystkiego (ang. *Internet of Everything - IoEs*) zostały zdefiniowane w ciągu ostatnich dwóch dekad, to technologie i rozwiązania, które leżą u ich podstaw, były rozwijane już znacznie wcześniej. Pierwsze rozproszone sieci czujników rozwijano już w czasach zimnej wojny na potrzeby monitorowania ruchów jednostek wojskowych. W latach 80-tych amerykańska agencja DARPA uruchomiła projekty mające na celu stworzenie rozproszonych sieci czujników komunikujących się ze sobą radiowo. Pod koniec XX wieku w projekty te angażowały się kolejne amerykańskie uniwersytety, które dostrzegały przyszły potencjał i szeroki obszar zastosowań takich systemów. Przez cały XX wiek na drodze rozwoju bezprzewodowych sieci czujników stały ograniczenia technologiczne, w tym relatywnie duże koszty energetyczne komunikacji radiowej, brak wydajnych źródeł zasilania oraz brak zintegrowanych układów cyfrowych, które łączyłyby w sobie jednostki obliczeniowe, interfejsy komunikacyjno-pomiarowe i moduły radiowe.

Przyśpieszenie rozwoju tych technologii nastąpiło w pierwszej dekadzie XXI pierwszego wieku. To wówczas rozpoczęto prace nad opracowaniem takich protokołów jak ZigBee (obecnie CSA - Connectivity Standard Alliance) czy Bluetooth Low Energy (BLE). W tym czasie na rynku pojawiły się pierwsze efektywne energetycznie moduły radiowe (np. CC1100), wydajne mikrokontrolery i pierwsze systemy operacyjne wspierające tworzenie rozległych, bezprzewodowych sieci czujników (np. Tiny OS, Contiki, czy RIOT). Równocześnie następowała miniaturyzacja urządzeń, upowszechnienie urządzeń mobilnych i coraz szersze ich wykorzystanie w systemach monitorowania i sterowania. W kolejnych latach opracowywano nowe technologie, protokoły i stopy komunikacyjne, które były dostosowywane i optymalizowane pod kątem specyficznych zastosowań — LoRa, LoRaWAN, SigFox, Weightless, DASH7 i wiele innych. Postęp technologiczny i możliwość coraz szerszego wykorzystania urządzeń elektronicznych w nowych obszarach przemysłu i życia codziennego wymusił weryfikację wykorzystywanych metod i protokołów komunikacyjnych oraz poszerzył spektrum usług, których świadczenie do tej pory nie było możliwe. Jednym z takich obszarów są usługi bazujące na położeniu, które wykorzystują możliwość lokalizacji urządzeń wewnątrz pomieszczeń, gdzie sygnały nawigacji satelitarnej są niedostępne.

Szybki rozwój protokołów komunikacyjnych, systemów operacyjnych dla sieci czujników oraz poszerzające się spektrum możliwych aplikacji zbiegły się w czasie z moim doktoratem realizowanym w latach 2003-2008. Tematyka doktoratu dotyczyła zastosowania algorytmów kryptograficznych w urządzeniach o ograniczonych zasobach obliczeniowych

i metod zapewniania poprawności realizacji tych obliczeń. Szczególnie istotnym założeniem w moich pracach, było działanie urządzeń bez nadzoru właściciela w otoczeniu, które może być nieprzychylnie i gdzie mogą być one narażone na różnego rodzaju, nawet bardzo wymagające, ataki. Realizacja rozwiązań proponowanych w doktoracie wymagała połączenia wiedzy i kompetencji z obszarów kryptografii, niezawodności systemów cyfrowych, oraz budowy i działania mikrokontrolerów i systemów wbudowanych.

Przed takimi samymi wyzwaniem stały ówczesne systemy WSN, których poziom gotowości technologicznej był na tyle wysoki, że możliwe było ich wykorzystanie w pracach badawczych, ale jednocześnie na tyle niski, że wiele podstawowych problemów nie było jeszcze rozwiązanych w uznany lub ustandaryzowany sposób. W latach 2008-2013, m.in. w ramach projektu *Czujniki i sensory*, realizowałem prace badawcze w zakresie protokołów komunikacyjnych pozwalających na logiczną organizację struktury rozległej sieci czujników WSN, która zapewni połączenie węzłów sieci i niezawodność komunikacji. Wraz z zespołem opracowywaliśmy rozwiązania zmierzające do wydłużenia czasu działania sieci, m.in. poprzez dobór ścieżek transmisji i dążenie do optymalizacji kosztu energetycznego w skali całej sieci, a nie pojedynczego urządzenia. W tym czasie prowadziłem badania nad optymalnym energetycznie sposobem przesyłania informacji w sieciach WSN, oraz protokołami organizacji struktury sieci, w których minimalizowany jest narzut kosztów energetycznych związanych z procesem organizacji i utrzymania sieci.

W 2012 roku, w ramach programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wziąłem udział w 2-miesięcznym programie stażowo-szkoleniowym na Stanford University, w Palo Alto, w USA. W ramach tego programu miałem okazję odbyć 2-tygodniowy staż w firmie CISCO Systems Inc. (San Jose, USA) pracując nad systemem, który pozwalał na określanie położenia użytkowników telefonów komórkowych. Rozwiązanie wykorzystywało informację o sile sygnału radiowego WiFi rejestrowanej przez punkty dostępowe rozmieszczone na terenie lotnisk i galerii handlowych. Choć pierwsze rozwiązanie było niedokładne i niestabilne, to możliwość pracy z nim uświadomiła mi, że usługi bazujące na informacji o położeniu wewnątrz budynków są olbrzymim obszarem ciekawych zastosowań, który rozwija się równie dynamicznie jak same sieci WSN.

Doświadczenie zdobyte podczas pobytu w USA stało się początkiem prac nad systemami lokalizacji wewnątrzbudynkowej, które od początku były skupione na praktycznym zastosowaniu tworzonych rozwiązań. Wyrazem tego było zaproszenie do udziału w pracach nad standardem komunikacji w ramach konsorcjum DAHS7 Alliance, prowadzonych we współpracy z University of Antwerp z Holandii. Realizowałem projekty badawcze indywidualne i zespołowe finansowane w drodze konkursu przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej (FNP) i Narodowe Centrum Nauki (NCN). Brałem także udział w projektach badawczo-rozwojowych realizowanych wspólnie z firmami, w tym finansowanymi w ramach konkursów przez Wrocławskie Centrum Akademickie (WCA), Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) i Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości (PARP). Podejmowane zagadnienia obejmowały:

- opracowanie dedykowanych protokołów komunikacji dla optymalizacji działania sieci [11], [2, 3, 4, 8] oraz specyficznych zastosowań — np. komunikacji kamer monitoringu ruchu w obrębie skrzyżowania (projekt NeuroFlow, [A7,A8]), monitorowania dobrostanu i aktywności zwierząt hodowlanych (projekt MAFiA, [A4, A5, A6]), oraz w ramach rozwoju standardu DASH7 [7].
- opracowanie radiowych systemów lokalizacji wewnątrzbudynkowych do różnych zastosowań — np. wykorzystanie technologii chirp spread spectrum (CSS) [11, 12] i ultra wideband (UWB) [A9,A10], w tym do lokalizacji górników w kopalniach podziemnych [10], oraz opracowanie prototypowych mechanizmów lokalizacji z użyciem BLE [A1, A2, A3, A4].

4.1.2 Umotywowanie prac badawczych

W celu pokazania znaczenia prac badawczych w zakresie głównego osiągnięcia warto zestawić i ogólnie porównać systemy IoT i systemy lokalizacji wewnątrzbudynkowej z Internetem oraz satelitarnymi systemami lokalizacji.

Internet a IoT

Internet był tworzony jako sieć kablowa, z myślą o systemach, w których wiele urządzeń końcowych (komputerów) łączy się z dużą liczbą serwerów świadczących różne usługi. Zakładano przy tym na przykład, że znacznie większe ilości danych będą wysyłane z serwerów do użytkowników (ang. *downlink*) niż od użytkowników do serwerów (ang. *uplink*). Założenie to spowodowało, że wiele rozwiązań projektowanych i stosowanych w sieci Internet do dziś, ma wyraźną asymetrię przepustowości transmisji w obu kierunkach. Ze względu na założenie, że wszystkie komunikujące się urządzenia będą miały dostęp do stabilnego i nieograniczonego źródła zasilania i duże moce obliczeniowe, niemal zupełnie

nie przejmowano się efektywnością energetyczną, nieistotne było ograniczanie liczby przesyłanych wiadomości, ilości przesyłanych danych, czy wykonywanych obliczeń. Wykorzystanie połączeń kablowych pozwoliło przyjąć założenia upraszczające o wysokiej niezawodności połączeń i niewielkich zakłóceniach wzajemnych pomiędzy sąsiadującymi ze sobą połączeniami. Wykorzystanie komunikacji przewodowej pozwoliło też na łatwe zwiększanie pojemności kanałów komunikacyjnych poprzez dodawanie kolejnych, praktycznie niezależnych od siebie, połączeń na tej samej trasie.

Systemy Internetu Rzeczy IoT mają całkiem inną charakterystykę, gdy porównać je do systemów i urządzeń komunikujących się przez sieć Internet. Inna jest proporcja serwerów i urządzeń końcowych (tzw. węzłów) – nie tylko liczba tych drugich jest znacznie większa niż w przypadku Internetu, ale również gęstość ich rozmieszczenia na obszarze zajmowanym przez sieć IoT. Zmienia się również charakterystyka komunikacji zarówno jeśli chodzi o rozmiar pojedynczych ramek informacji (które są relatywnie małe), jak i sumaryczną ilość przesyłanych informacji *uplink*, która istotnie przekracza ilości informacji przesyłane w *downlink*. Wykorzystanie komunikacji radiowej wiąże się z zakłóceniami i negatywnymi zjawiskami związanymi z propagacją sygnału radiowego, których skala i powodowane trudności są niewspółmiernie większe niż w przypadku połączeń kablowych. Komunikacja w ogólnodostępnych pasmach częstotliwości radiowych ISM (ang. *Industrial, Scientific, and Medicine*) powoduje, że w otoczeniu systemu IoT może istnieć praktycznie dowolna liczba innych urządzeń również realizujących swoją komunikację i zakłócających działanie sieci. Różnice dotyczą też fizycznych cech urządzeń IoT – małe rozmiary, w połączeniu z brakiem dostępu do nieograniczonego źródła zasilania, diametralnie wpływają na ograniczenia i sposób funkcjonowania. Czujniki pracują zasilane energią z baterii lub wykorzystując odnawialne źródła energii, których zasoby energetyczne są mocno ograniczone. Konsekwencją jest konieczność dostosowania sposobu działania wszystkich elementów sieci tak, aby oszczędnie gospodarowały i efektywnie wykorzystywały swoje zasoby, ale również nie wpływały negatywnie na inne elementy systemu IoT – zarówno swojego jak i innych znajdujących się w tym samym obszarze. Ograniczone zasoby energetyczne wprowadzają konieczność redukcji kosztów energetycznych działania (obliczeń) węzłów sieci, jak i komunikacji pomiędzy węzłami. Pierwsze prowadzi m.in. do wprowadzania trybów pracy, które różnią się między sobą zakresem dostępnych funkcji urządzenia i pozwalają na kompromis pomiędzy funkcjonalnością a kosztem energetycznym. W zakresie komunikacji poprawę efektywności energetycznej uzyskuje się przez wyłączanie radia, gdy nie jest potrzebne, skrócenie ramek komunikacyjnych i skrócenie czasu nadawania. Upraszczone są metody dostępu do medium komunikacyjnego, wybierane są prostsze modulacje radiowe i zmniejszana jest moc nadawania. W sieciach IoT wykorzystuje się proste topologie nie wymagające budowania i utrzymywania tras przesyłania wiadomości (ang. *routing*), a także wykorzystuje się komunikację bezpołączeniową, która nie wymaga nawiązywania, monitorowania i utrzymywania połączeń.

Niestety działania zmierzające do oszczędzania i efektywnego wykorzystania dostępnych zasobów energetycznych mocno ograniczają sposób funkcjonowania węzłów sieci i wpływają niekorzystnie na oferowane możliwości i funkcje. Jednym z przykładów takiej funkcji jest lokalizacja, czyli określanie położenia węzłów sieci względem elementów infrastruktury komunikacyjnej o znanym położeniu (tzw. kotwic).

Lokalizacja satelitarna a lokalizacja w systemach IoT

Systemy satelitarne można uznać za przykład idealnego systemu lokalizacji – zapewniają dokładność na poziomie nie gorszym niż 3-4 metry na ogromnych obszarach. Pomijając początkowe uruchomienie odbiornika (ang. *cold start*), pozwalają one na pierwsze określenie położenia w czasie poniżej kilku sekund, a kolejne jego aktualizacje mogą być realizowane nawet 50 razy na sekundę. Co ważne, parametry i jakość lokalizacji nie zależą od liczby aktualnie działających odbiorników, ani ich przestrzennego rozmieszczenia. To doskonale rozwiązanie jest możliwe dzięki wykorzystaniu kosztownych punktów referencyjnych (kotwic), jakimi są satelity systemu lokalizacji i względem których określane jest położenie odbiorników. Kotwice, wyposażone w zegary atomowe, są idealnie zsynchronizowane, ich pozycje są dokładnie znane, a dzięki użyciu modulacji kodowej (ang. *Code Division Multiple Access - CDMA*) sygnały lokalizacyjne wysyłane przez nie mogą być jednocześnie odebrane przez każdy odbiornik, rozdzielone i przeanalizowane. Relatywnie drogie i energochłonne odbiorniki wykorzystują odebrany sygnał do synchronizacji swojego wewnętrznego zegara (z dokładnością nawet rzędu 10^{-11} s), wyliczenia czasu, jaki sygnał radiowy potrzebuje na dotarcie z kotwicy do odbiornika, i określenia swojego położenia w przestrzeni. Warto też zauważyć, że cała procedura lokalizacji używa dedykowanego kanału komunikacyjnego, w którym liczba nadajników jest ograniczona do kotwic systemu, a wszystkie odbiorniki tylko nasłuchują. W przypadku wariantów tej technologii, np. GPS-RTK, dodatkowe poprawki korygujące do odbiornika są przesyłane oddzielnym, dodatkowym kanałem komunikacyjnym. Zawieszenie kotwic bardzo wysoko nad urządzeniami, niewielkie moce sygnału lokalizacyjnego i praktyczny brak przeszkód pomiędzy kotwicą a odbiornikiem powodują, że bardzo rzadko dochodzi do pomiarów obciążonych błędami propagacji non-LoS (ang. *non-Line*

of Sight).

Niestety przeniesienie tego rozwiązania na poziom systemów IoT jest niemożliwe ze względu na wspomniane wcześniej ograniczenia. W systemach IoT dokładne odmierzenie czasu jest możliwe ewentualnie tylko na kotwicach, ale wymaga to wykorzystania sygnału referencyjnego (np. pochodzącego z systemu GPS) oraz stabilnych temperaturowo lokalnych źródeł częstotliwości, które podnoszą koszt energetyczny działania. Synchronizacja odbiorników z kotwicami musi być realizowana poprzez komunikację w pasmach ISM, które jednocześnie są wykorzystywane do normalnej komunikacji danych przez wiele różnych systemów. Ograniczona przepustowość, ograniczenia w dostępie do medium komunikacyjnego, zakłócenia transmisji, opóźnienia dostarczenia wiadomości dotyczą więc w takim samym stopniu procedur synchronizacji i komunikacji. Sama komunikacja radiowa w systemach IoT jest znacznie bardziej podatna na negatywne zjawiska propagacji, w szczególności wielodrogowość i propagację non-LoS, z którymi mamy do czynienia w zasadzie każdym rzeczywistym systemie, a które powodują eskalację błędów.

4.1.3 Cele prac badawczych związane z głównym osiągnięciem

W przypadku systemów IoT wprowadzenie założenia o ograniczonych zasobach energii urządzeń w sieci powoduje szereg konsekwencji związanych ze sposobem, w jaki urządzenia i cała sieć powinny działać, aby zagwarantować oczekiwane funkcje przez możliwie najdłuższy czas. Dobór właściwych metod nie jest oczywistych, bo ich wpływ na koszt energetyczny, działanie systemu i skuteczność realizacji stawianych zadań jest różny. Z tego względu celem ogólnym realizowanych prac było **opracowanie efektywnych energetycznie systemów IoT pozwalających na lokalizację urządzeń mobilnych**. Do realizacji celu głównego dążyłem poprzez realizację trzech celów szczegółowych:

- C1 opracowanie metod organizacji i efektywnej komunikacji w sieci IoT rozmieszczonej na obszarze przekraczającym zasięg komunikacji pojedynczego węzła – prace [A11, A12] oraz [2, 3, 4, 5, 9],
- C2 opracowanie metod efektywnej, skutecznej i niezawodnej transmisji danych wykorzystującej proste topologie i komunikację bezpołączeniową – prace [A4, A5, A6, A7 A8] oraz [6, 7],
- C3 opracowanie efektywnych metod lokalizacji dla systemów IoT o ograniczonej infrastrukturze i minimalnym wpływie na koszt energetyczny działania i czas życia systemu – prace [A1, A2, A3, A9, A10] oraz [10, 11, 12].

4.1.4 Opis uzyskanych wyników – informacje edytorskie

Kolejny podrozdział zawiera opis wyników uzyskanych w ramach prac badawczych wchodzących w skład głównego osiągnięcia naukowego. Opis ma układ chronologiczny, wprowadzając i opisując kolejne zagadnienia, które podejmowałem. Każda grupa zagadnień kończy się ramką podsumowującą najważniejsze osiągnięcia. Na marginesie umieszczone zostały odwołania do najważniejszych publikacji. Kolorem zielonym oznaczyłem publikacje wchodzące w skład cyklu będącego głównym osiągnięciem naukowym. Kolor niebieski oznacza pozostałe moje prace, które są związane z głównym osiągnięciem, ale nie należą do cyklu. Kolorem czarnym oznaczyłem publikacje innych autorów.

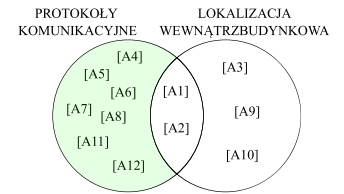
4.1.5 Opis uzyskanych wyników oraz ich istotności przy projektowaniu rzeczywistych systemów IoT

W latach 2008-2012 prowadziłem analizę stanu wiedzy i badania w zakresie rozwoju technologii bezprzewodowych sieci czujników (WSN). Skupiałem się przede wszystkim na wykorzystaniu prostych układów radiowych i mikrokontrolerów do stworzenia sieci bezprzewodowej pokrywającej swoim działaniem obszar znacznie przekraczający zasięg komunikacyjny pojedynczego węzła sieci.

Wpływ zasięgu transmisji i grupowania na działanie rozległych sieci

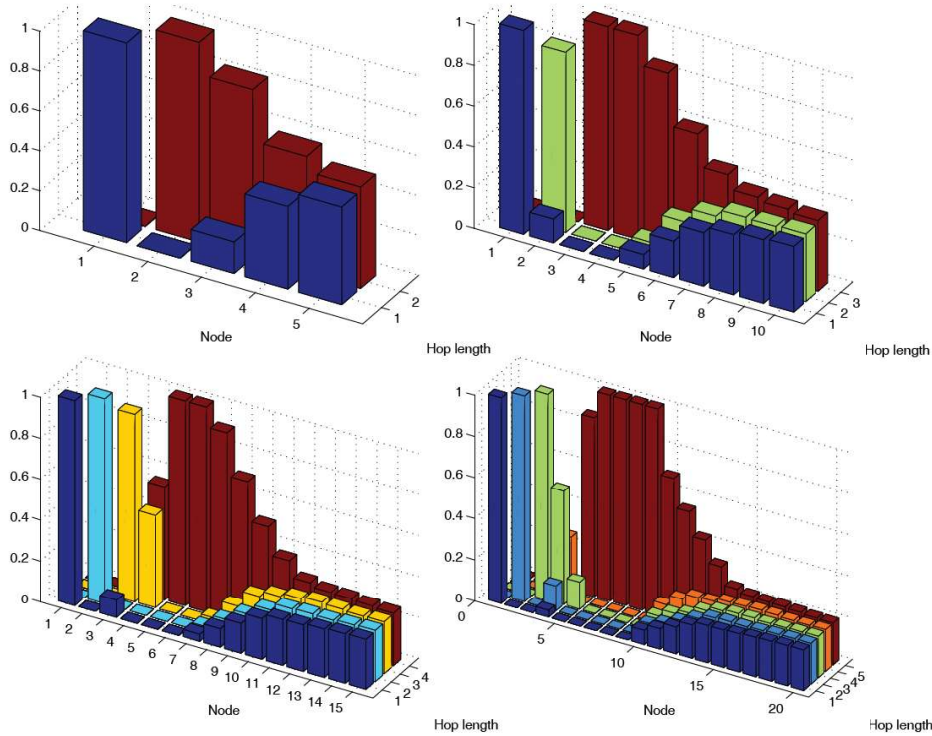
Jedną z kilku ciekawych obserwacji, którą wówczas poczyniłem, było zauważenie, że charakterystyki kosztów energetycznych działania węzłów sieci WSN są inne niż w przypadku radia dużej mocy. W pracy [A12] a także [2] argumentowaliśmy, że koszty energetyczne transmisji węzłów WSN są nie tylko niskie, ale wręcz niższe od kosztów ponoszonych przy odbieraniu sygnałów radiowych. Jak pokazałem, sytuacja ta wynika po pierwsze z bardzo niskich mocy nadawania (poniżej kilkunastu dBm, czyli mniejsze niż 100mW) oraz z konstrukcji torów odbiorczych w układach radiowych małej mocy, które muszą być wyposażone w energochłonne wzmacniacze o małych szumach własnych (ang. *low noise amplifier*) oraz wzmacniacze o regulowanym wzmocnieniu (ang. *automatic gain control*), aby móc odbierać sygnały o mocy poniżej 1 pW (mniejsze niż -90 dBm). Konsekwencją powyższej obserwacji jest konieczność zmiany sposobu myślenia o oszczędzaniu energii i dostosowanie działania urządzeń, które, chcąc oszczędzać energię, nie mogą spędzać wiele czasu na oczekiwaniu i nasłuchiwanie na informacje kierowane do nich. Zamiast tego urządzenia muszą możliwe często całkowicie wyłączać swoje radia i włączać je tylko, gdy to konieczne. Kolejna sprawa to zasięg transmisji informacji – wysokie koszty odbioru powodują, że z punktu widzenia całej sieci, bardziej opłaca się nadajnikowi ponieść wyższy koszt wysłania informacji i przesłać ją na większą odległość, ponieważ w ten sposób eliminuje potrzebę jej odebrania i retransmisji przez urządzenia położone bliżej, oraz zmniejsza ogólną liczbę retransmisji w rozległej sieci radiowej. Moje badania pokazały, że oszczędzanie energii przez poszczególne węzły niezależnie (lokalna optymalizacja kosztu energetycznego) powoduje nierównomiernie ponoszenie kosztów energetycznych poszczególnych węzłów i skrócenie czasu działania całej sieci.

W pracy [A12] symulacyjnie oceniłem różne sposoby przesyłania informacji w tzw. sieciach z wieloma przeskokami (ang. *multi hop*). W sieciach tych odległość pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem informacji (ang. *sink*) znacznie przekracza zasięg komunikacyjny pojedynczego węzła i transmisja musi być realizowana z udziałem węzłów pośrednich, które odbierają i przesyłają wiadomości dalej. W pracy wykorzystaliśmy symulacje sieci o różnych rozmiarach i różnej liczbie urządzeń, rozmieszczonych na linii (przypadek jednowymiarowy – 1D) oraz na powierzchni (przypadek dwuwymiarowy – 2D), i generujących wiadomości co ustalony czas. Używając programowania liniowego poszukiwałem najlepszego sposobu przesyłania informacji, który wydłuży czas działania sieci, zdefiniowany jako liczba transmisji do wyczerpania energii przez pierwszy z węzłów sieci. Rysunek 3 zaczerpnięty z pracy [A12] pokazuje przypadek 1D przedstawiając, w jaki sposób poszczególne węzły sieci powinny wysyłać wiadomości, aby zmaksymalizować czas działania całej sieci. Oś X odpowiada numerom kolejnych węzłów dla sieci złożonych z 5, 10, 15 i 20 węzłów. Oś Y reprezentuje możliwe zasięgi komunikacji – do 2, 3, 4 i 5 najbliższych sąsiadów. Oś Z wskazuje odsetek wiadomości, która węzeł stojący na pozycji X powinien wysyłać do sąsiada oddalonego o Y od niego. Analizując ten rysunek można zauważyć kilka prawidłowości. Po pierwsze węzły mogące transmitować bezpośrednio do stacji bazowej, powinny to robić. W ich przypadku wysyłanie wiadomości do sąsiadów, którzy są bliżej stacji bazowej, zamiast bezpośrednio do niej, jest mniej opłacalne energetycznie i nie powinno być robione. Węzły położone nieco dalej (do 2-krotności maksymalnego zasięgu) powinny nadal preferować wysyłanie na maksymalną odległość. Dopiero węzły położone dalej (od 2- do 3-krotności zasięgu maksymalnego) powinny stopniowo zwiększać udział transmisji na mniejsze odległości. Wreszcie, węzły położone daleko od stacji bazowej (powyżej 3-krotności maksymalnego zasięgu



[A12] M.Nikodem, B.Wojciechowski, *Upper bounds on network lifetime for clustered wireless sensor networks*, The 4th IFIP Int. Conference on New Technologies, Mobility and Security, NTMS 2011, February 7 - 10, 2011, Paris, France, s. 1-6

[2] R.Pawlak, B.Wojciechowski, M.Nikodem, *New simplified HEED algorithm for wireless sensor networks*, Proceedings of 17th Conference Computer Networks, Ustroń, Poland, June 15-19, 2010



Rysunek 3: Rekomendowany sposób przesyłania informacji w sieciach 1D złożonych z 5, 10, 15 i 20 węzłów z możliwością przesyłania wiadomości odpowiednio do 2, 3, 4 i 5 sąsiadów. Rysunek zaczerpnięty z [A12].

gu transmisji) powinny równomiernie wykorzystywać wszystkie możliwe zasięgi komunikacji – preferowanie tylko ścieżek dłuższych lub krótszych jest mniej korzystne energetycznie.

W sieciach WSN o rozmiarach nieprzekraczających zasięgu komunikacyjnego pojedynczych węzłów najbardziej efektywną metodą komunikacji jest transmisja informacji bezpośrednio do odbiorcy, bez węzłów pośredniczących. W dużych sieciach sposób transmisji powinien zależeć od odległości od odbiorcy.

W pracy [A12] badaliśmy również wpływ łączenia urządzeń w grupy na czas działania sieci. Grupowanie (ang. *clustering*) polegało na wyróżnieniu w sieci węzłów, którym powierzano specjalne zadania. Określane jako *cluster head* były odpowiedzialne za przekazywanie wiadomości w imieniu całej grupy, a także pomiędzy sąsiednimi grupami (trasowaniu wiadomości). Pozostałe regularne węzły odpowiedzialne były za gromadzenie pomiarów i komunikację z liderem swojej grupy. Taka organizacja węzłów miała w założeniu prowadzić do poprawy właściwości

Network	min	avg	max	σ	Network	min	avg	max	σ
[2, 2]	69	71	76	2	[4, 4]	60	62	65	1
[2, 2, 2]	84	85	86	1	[4, 4, 4]	77	78	80	1
[2, 2, 2, 2]	89	90	90	1	[5, 5]	58	61	63	1
[2, 2, 2, 2, 2]	92	92	93	1	[1, 2, 3, 4]	93	94	94	1
[2, 2, 2, 2, 2, 2]	93	94	95	1	[2, 3, 3, 4]	88	89	89	1
[3, 3]	62	66	68	2	[2, 3, 4, 4]	89	90	91	1
[3, 3, 3]	79	80	82	1	[1, 5, 2, 2]	78	80	86	2
[3, 3, 3, 3]	86	87	87	1	[2, 4, 3, 2]	82	82	83	1

Rysunek 4: Porównanie czasu życia przykładowych sieci 2D dla przypadków działania zgrupowanego i niezgrupowanego. Wartości pokazują procentową wartość czasu działania sieci zgrupowanej w stosunku do niezgrupowanej (100%). W przypadku wszystkich sieci grupowanie prowadziło do znacznego skrócenia czasu działania. Tabela zaczerpnięta z [A12].

działania sieci, ponieważ na liderów grup można wybierać węzły posiadające większe zasoby energii i oszczędzać energię regularnych węzłów. Przykładem algorytmów, które realizowały podział na grupy były LEACH, HEED oraz sHEED, jego usprawniona wersja naszego autorstwa [2]. Przeprowadzone przez nas prace badawcze jasno pokazały (Rysunek 4), że grupowanie węzłów sieci WSN nie tylko nie wpływa korzystnie na czas jej życia sieci, ale wręcz go pogarsza. Wynika to między innymi z narzutów związanych z organizacją sieci (wyborem głównego węzła w grupie) oraz koniecznością monitorowania stanu sieci (np. pozostałej energii w węzłach) i reorganizacji sieci). Skrócenie czasu działania zależy od rozmiaru i złożoności sieci, ale w ogólnym przypadku pokazaliśmy, że straty wynoszą około 15%. Wpływ grupowania był przez nas dalej badany a efekty tych prac zostały przedstawione w [4]. Pokazaliśmy w nich szczegółowo z czego wynikają większe koszty energetyczne działania sieci grupowanej, oraz że przebudowywanie sieci (zmiana grup i liderów grup) połączone z agregacją wiadomości w węzłach, które je przesyłają, pozwala na istotne wydłużenie czasu działania sieci. Niestety praktycznym ograniczeniem wykorzystania badanych metod jest konieczność ich dostosowania do konkretnej aplikacji, rodzaju przesyłanych informacji i sposobów, w jaki mogą być one agregowane, tak aby nadal dostarczały użytecznych informacji.

Wyniki zaprezentowane w artykule przełożyły się na późniejsze nasze działania w ramach konsorcjum DASH-7 Alliance. Opracowując założenia i pierwsze wersje protokołu DASH-7 argumentowaliśmy za uproszczeniem struktury sieci i ograniczeniem jej głębokości. Ostatecznie wersja protokołu DASH-7 ustandaryzowana w 2014 roku pozwalała na transmisję z pojedynczą retransmisją. Działanie i skuteczność tego mechanizmu pokazaliśmy w innej naszej pracy [7] gdzie protokół DASH-7 był wykorzystywany do monitorowania gniazd ptaków. Co ciekawe zbliżony mechanizm jest w ostatnich latach proponowany dla stosu protokołów LoRaWAN, który oryginalnie nie pozwala na retransmisję, a w chwili obecnej dopuszcza pojedynczą retransmisję wiadomości [30].

Wprowadzanie hierarchicznej struktury komunikacyjnej skracza czas działania sieci. Wydłużenie czasu działania wymaga wprowadzenia dodatkowych metod oszczędzania energii, które muszą prowadzić do efektywnego zmniejszenia liczby przesyłanych wiadomości. Przykładem takiego rozwiązania jest agregacja retransmitowanych informacji.

Dobór mocy transmisji

Wcześniejsze prace, w tym [A12], pokazały w jaki sposób organizować i przysyłać informacje w sieci WSN, jeśli mamy dostępnych różne zasięgi komunikacji. Kolejne moje badania były skupione na doborze najlepszej mocy transmisji do realizacji komunikacji. O ile bowiem jednostkowy koszt odbioru wiadomości jest stały, to koszt transmisji, ponoszony przez węzeł sieci WSN, zależy od mocy, z jaką ma być nadany sygnał radiowy. Z tego powodu dobór odpowiedniej mocy nadawania ma bezpośrednie przełożenie na ilość energii, jaka pobierana jest ze źródła zasilania. O ile więc zmniejszanie mocy nadawania poprawia efektywność energetyczną, to ma negatywny wpływ na skuteczność transmisji i efektywny zasięg komunikacji. Chcąc optymalizować koszt energetyczny działania węzła konieczne jest więc dobranie takiej mocy nadawania, która jest wystarczająco duża, aby pomimo zakłóceń zewnętrznych zapewnić możliwość skutecznej transmisji.

W pracy [A11] przedstawiłem wyniki analizy różnych sposobów doboru mocy transmisji. W prowadzonych pracach doboru mocy dokonywaliśmy na podstawie zwrotnych potwierdzeń odebrania wysyłanych wiadomości (tzw. ACK od angielskiego słowa *acknowledgement*), wysyłanych przez odbiorniki. W ogólnym przypadku odebranie ACK potwierdza skuteczne przesłanie wiadomości, a jego brak sygnalizuje brak jej dostarczenia. W podstawowej wersji mechanizm ten bazuje na zliczaniu poprawnie potwierdzonych i niepotwierdzonych komunikacji. Moc nadawania jest zmniejszana/zwiększana, jeśli liczba potwierdzonych/niepotwierdzonych wiadomości przekroczy ustalone progi. Wadą takiego podejścia jest nieuwzględnianie faktu, że skuteczność przesyłania informacji nie jest binarna (0/100%), ale może przyjmować wartości z przedziału

[4] B.Wojciechowski, M.Nikodem, T. Surmacz, *Clustering and data aggregation as factors of wireless sensor network lifetime*, Computer aided systems theory - EUROCAST 2011 : 13th International Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, February 6-11, 2011

[7] G.Ergeerts, M.Nikodem i in. *DASH7 alliance protocol in monitoring applications*, 10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, 3PGCIC 2015, 4-6 November 2015, Krakow, Poland

[30] José Dias, António Grilo, *LoRaWAN multi-hop uplink extension*, Procedia Computer Science, vol. 130, pp. 424-431, 2018

[A11] M.Nikodem, M.Słabicki, T.Surmacz, B.A.Wojciechowski, *Transmission power control based on packet reception rate*, 6th Int. Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), March 30th to April 2nd, 2014, Dubai s. 1-4

TABLE III
 NUMERICAL EVALUATION OF ACK- AND PRR-BASED TPC ALGORITHMS
 ASSUMING PERFECT PROCEDURE FOR DETECTING CHANNEL CHANGES

Criteria			TPC method			
			ACK-1	PRR-1	PRR-2	PRR-3
Average energy consumption on data packets	SC	μ	6.93	9.79	5.16	4.81
		σ	1.70	3.98	3.45	1.25
	LC	μ	6.76	11.72	5.60	4.94
		σ	0.80	3.47	0.96	0.77
Average # of transmissions on data packets	SC	μ	24.13	29.14	21.56	18.82
		σ	5.70	14.95	11.90	7.53
	LC	μ	25.27	34.98	23.82	20.96
		σ	1.74	8.21	2.95	2.98
Average energy consumption on all transmissions	SC	μ	6.93	9.79	5.91	5.54
		σ	1.70	3.98	3.50	1.29
	LC	μ	6.76	11.72	11.82	11.11
		σ	0.80	3.47	1.18	0.93
Average # of transmissions on all transmissions	SC	μ	24.13	29.14	22.51	19.74
		σ	5.70	14.95	12.02	7.63
	LC	μ	25.27	34.98	31.59	28.64
		σ	1.74	8.21	3.20	3.08

SC/LC = small/large # of changes, σ = std. deviation, μ = mean value

Rysunek 5: Porównanie wartości średniej i standardowego odchylenia czterech parametrów (wiersze), dla różnych metod wyboru mocy nadawania. Pierwsze dwa parametry biorą pod uwagę tylko transmisję ramek z danymi i potwierdzeniami. Dwa ostatnie biorą pod uwagę wszystkie ramki, czyli również te, których wymiana jest niezbędna do ustalenia aktualnych wartości współczynników PRR. Tabela zaczerpnięta z pracy A11.

od 0 (brak komunikacji) do 100% (wszystkie wiadomości przesłane poprawnie). W podejściu, które zaproponowałem, moc nadawania jest dobierana na podstawie skuteczności dostarczania pakietów radiowych wyrażonej za pomocą parametru PRR (ang. *packet reception rate*). Wartość tego parametru jest wyznaczana jako stosunek liczby poprawnie odebranych do wszystkich wysłanych pakietów radiowych. Wykorzystanie PRR bazuje na obserwacji, że ponieważ koszt energetyczny rośnie z mocą nadawania, to dla efektywnej energetycznie komunikacji nie trzeba przysyłać wiadomości ze 100% skutecznością, gdyż to wiąże się ponoszeniem wysokiego kosztu energetycznego. Zamiast tego korzystne jest zmniejszenie mocy nadawania i obniżenie kosztu energetycznego, nawet w sytuacjach, gdy skuteczność transmisji z mniejszą mocą jest niższa ($PRR < 100\%$). Dzieje się tak wówczas, gdy obniżenie mocy pozwala na istotne oszczędzenie energii, a jednocześnie skuteczność transmisji jest nadal wysoka. W takiej sytuacji koszty i liczba ewentualnych retransmisji nie zdominują oszczędności uzyskiwanych dzięki wykorzystaniu mniejszej mocy nadawania. W badaniach wykorzystaliśmy symulacje numeryczne, modelując działanie węzłów sieci, charakterystykę zasilania bateryjnego, koszty energetyczne komunikacji oraz zakłócenia transmisji.

Uzyskane wyniki (Rysunek 5) pozwoliły nam pokazać, że wykorzystanie informacji o skuteczności przesyłania wiadomości rzeczywiście pozwala zmniejszyć koszt energetyczny i średnią liczbę transmisji. Jest to jednak rozwiązanie trudne do zastosowania w praktyce, bo poprawę parametrów sieci uzyskuje się tylko wówczas, kiedy mamy aktualną i poprawną informację o skuteczności transmisji (wartości PRR dla różnych mocy nadawania są aktualne). Symulując zmienne warunki propagacji pokazaliśmy, że koszty energetyczne aktualizacji współczynników PRR bardzo szybko zaczynają dominować oszczędności wynikające z ich wykorzystania. O ile więc wykorzystanie PRR pozwala zmniejszyć koszty energetyczne, to uzyskanie realnej poprawy czasu działania sieci wymaga sprytniej i efektywniej energetycznie metody aktualizacji wartości tych współczynników.

Warto zauważyć, że podobny mechanizm doboru parametrów transmisji radiowej jest współcześnie wykorzystywany, np. w stosie protokołów LoRaWAN [31]. Adaptacyjne dobieranie szybkości przesyłania danych (ang. *adaptive data rate* – *ADR*) jest mechanizmem bazującym na potwierdzeniach odebrania wiadomości (ACK), który dostosowuje parametry transmisji tak, aby ponosić możliwie najniższy koszt energetyczny, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej skuteczności dostarczenia wiadomości. Działanie metody ADR jest zbliżone do rozwiązania opi-

[31] Rachel Kufakunesu, Gerhard P. Hancke, Adnan M. Abu-Mahfouz, *A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges*, Sensors, vol. 20, no 18, 2020

sywanego w pracy [A11] z tą różnicą, że w naszym rozwiązaniu każde urządzenie decydowało o parametrach transmisji niezależnie, podczas gdy w przypadku LoRaWAN decyzje o zmianie parametrów są podejmowane centralnie na podstawie informacji zbieranych z węzłów sieci IoT. Centralny system odciąża w ten sposób węzły sieci z konieczności ponoszenia kosztów energetycznych związanych z monitorowaniem i reagowaniem na zmiany parametrów propagacji w otoczeniu.

Wykorzystanie informacji o skuteczności transmisji pakietów danych (PRR) pozwala poprawić efektywność energetyczną, pod warunkiem, że potrafimy skutecznie i efektywnie energetycznie aktualizować wartości współczynników PRR. W przeciwnym przypadku metoda ta nie daje lepszych wyników niż wykorzystanie potwierdzeń odebrania wiadomości (ACK).

Choć głównym celem badań była optymalizacja kosztu energetycznego działania, to wyniki pokazały jeszcze jedną ważną właściwość – dobór odpowiedniej mocy nadawania, pozwala zagwarantować zasięg komunikacji niezbędny do realizacji komunikacji i zmniejszyć średnią liczbę komunikacji niezbędną do skutecznego przesłania informacji. Obie właściwości efektywnie zmniejszają zakłócenia powodowane przez komunikujące się węzły, poprawiając współdziałanie wielu sieci w jednym obszarze.

Dobór mocy nadawania pozwala zmniejszyć wpływ komunikacji w sieci i wynikających z niej zakłóceń na inne systemy działające w jej otoczeniu.

W pracach opisanych do tej pory skupiałem się na organizacji sieci, sposobie przesyłania wiadomości oraz doborze mocy nadawania do oczekiwanych zasięgów komunikacji i zakłóceń w kanale komunikacyjnym. Prace te pokazały, że choć możliwe jest uzyskanie oszczędności i wydłużenie czasu działania sieci, to poprawa nie jest znaczna. Przyczyny tego stanu rzeczy upatrywałem w wysokim koszcie energetycznym ponoszonym podczas nasłuchiwania i odbierania wiadomości. Zaproponowane dotychczas działania doprowadziły bowiem do tego, że przy mniejszej liczbie, efektywnych energetycznie transmisji, kosztem dominującym działania węzłów zaczął być koszt nasłuchiwania i odbioru wiadomości. Ta obserwacja pozwoliła mi zauważyć, że dalsze optymalizacje związane z transmisją mają niewielki wpływ na końcowy koszt energetyczny działania i czas życia sieci.

Niepotrzebne nasłuchiwanie można zredukować poprzez włączenie odbiorników tylko wówczas, gdy do urządzenia są wysyłane komunikaty. To wymaga jednak synchronizacji czasu urządzeń komunikujących się w sieci, a to wiąże się z koniecznością wymiany dodatkowych wiadomości i poniesieniem kosztów, które muszą być zbalansowane przez oszczędności. Oprócz możliwości wyłączenia odbiorników synchronizacja ma szereg dodatkowych zalet m.in. możliwość przydzielenia poszczególnym węzłom okien czasowych (ang. *time slots*) transmisji i odbioru, w czasie których inne urządzenia nie nadają. Tym samym możemy zrealizować w sieci dostęp do medium komunikacyjnego w podziale czasu (ang. *time division multiple access* – TDMA), zmniejszyć prawdopodobieństwo kolizji i wzajemnych zakłóceń, a tym samym dalej poprawić skuteczność i efektywność komunikacji redukując jej koszt. Co więcej, dokładna synchronizacja czasu pozwoliłaby na pomiar odległości pomiędzy komunikującymi się węzłami, analogicznie jak to jest realizowane w systemach satelitarnych. Bazując na powyższych obserwacjach w pracy [9] analizowaliśmy wpływ dryftu zegarów wykorzystywanych w węzłach sieci WSN na dokładność synchronizacji czasu pomiędzy węzłami oraz wpływ temperatury otoczenia na wartość tego dryftu. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów pokazały, że typowy zegar wykorzystywany w węzłach WSN pozwala na synchronizację czasu z dokładnością do około 1-4 sekund na dzień, co oznacza dryft na poziomie 10-40 ppm. Co więcej, ponieważ węzły sieci WSN wykorzystują proste i energooszczędne oscylatory, zmiana ich częstotliwości w funkcji temperatury jest znaczna. W przeprowadzonych testach, dla zakresu temperatur od -6 do 70 stopni Celsjusza, zmiana wartości dryftu wynosiła nawet 40 ppm i była zarówno dodatnia, jak i ujemna, w zależności od temperatury. Przeprowadzone prace wykazały, że synchronizacja czasu na potrzeby usypiania węzłów sieci WSN jest możliwa pod warunkiem, że jest realizowana cyklicznie, a węzły posia-

[9] T.Surmacz, B.Wojciechowski, M.Nikodem, M.Slabicki, *Distributed time management in wireless sensor networks*, Proceedings of the 9-th Int. Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, June 30 - July 4, 2014, Brunów, Poland

dają mechanizmy radzenia sobie w sytuacjach, gdy różnice czasu przekraczają dopuszczalne wartości. Częstotliwość synchronizacji czasu zależy od specyfiki aplikacji i sposobu działania sieci, ale dla typowych dokładności zegarów i zastosowań przeprowadzanie jej kilka-kilkanaście razy dziennie jest wystarczające.

Wnioski płynące z naszych prac ponownie znalazły zastosowanie i potwierdzenie w rzeczywistych rozwiązaniach. Urządzenia klasy B protokołu LoRaWAN przeprowadzają cykliczną synchronizację swojego lokalnego zegara z systemem centralnym. Wykorzystują wspólną podstawę czasu do cyklicznego włączania swoich odbiorników, co daje systemowi centralnemu możliwość przesłania wiadomości do nich. Urządzenia te jednocześnie kompensują dryft lokalnych zegarów poprzez cykliczne nasłuchiwanie na wiadomości synchronizujące (ang. *beacon*) oraz wcześniejsze rozpoczynanie i wydłużanie okien odbioru w miarę upływu czasu. W przypadku stosu LoRaWAN, wykorzystanie synchronizacji i cyklicznego włączania nasłuchiwanie pozwala osiągnąć istotne oszczędności energii w działaniu węzłów [32].

Stabilność odmierzenia czasu i dokładność synchronizacji czasu węzłów sieci WSN jest wystarczająca dla synchronizacji czasów nadawania i odbierania informacji. Synchronizacja musi być realizowana cyklicznie, a węzły sieci muszą posiadać mechanizmy pozwalające na ich poprawne działanie w przypadku sytuacji nietypowych.

Projektowanie systemów komunikacyjnych

Doświadczenie i wiedzę w zakresie organizacji i efektywnej komunikacji w sieciach radiowych [A11,A12] oraz [5, 6, 7] wykorzystałem w projekcie NeuroFlow, w ramach którego opracowywaliśmy system komunikacji radiowej dla kamer czasowo monitorujących ruch pojazdów w obrębie skrzyżowania. System wykorzystuje zasilane bateryjnie kamery i sztuczne sieci neuronowe do wykrycia, klasyfikacji i identyfikacji pojazdu. Jego zadaniem jest nie tylko zliczenie typów pojazdów, ale również dostarczenie informacji, jakie trasy pokonują pojazdy na skrzyżowaniu. Ponieważ niektóre skrzyżowania są rozległe, to monitorowanie jest realizowane przez kilka-kilkanaście kamer, które obserwują i monitorują przepływy pojazdów w wybranych obszarach skrzyżowania, nie mając wiedzy o ruchu na całym skrzyżowaniu. Z tego powodu, aby ustalić ścieżkę ruchu przez skrzyżowanie, poruszający się pojazd musi być wykryty, zidentyfikowany i powiązany przez kolejne kamery. Po pierwsze więc identyfikacja musi pozwalać na połączenie detekcji na różnych kamerach i stwierdzenie, czy mamy do czynienia z jednym, czy z kilkoma różnymi pojazdami. Po drugie, informacje pochodzące z wielu kamer muszą zostać połączone, aby odszukać ścieżkę ruchu. Uzyskanie tego powiązania można rozwiązać na dwa sposoby – informacje z kamer przesyłać do centralnego systemu, którego zadaniem będzie ich analiza i rozpoznawanie przejazdów. Wadą tego podejścia jest konieczność transmisji danych poza system kamer, które w przypadku monitorowania wielu skrzyżowań wiąże się koniecznością zapewnienia dostępu do centralnego systemu wielu kamerom (np. z wykorzystaniem komunikacji GSM), transmisji wszystkich informacji na duże odległości i ponoszenie dużych kosztów energetycznych. Rozwiązanie takie musi również adresować kwestie poufności danych i anonimowości uczestników ruchu – z tego powodu np. identyfikacja pojazdów musiała bazować na ich cechach i czasie pojawienia się na poszczególnych kamerach, a nie numerze rejestracyjnym.

Powyższych wad pozbawione jest podejście przetwarzania informacji bezpośrednio na kamerach systemu [A7]. W tym rozwiązaniu zdaniem kamer jest wspólne rozpoznanie ścieżki przejazdu i wysłanie do centralnego systemu jedynie informacji o liczbie, typach pojazdów i zrealizowanych ścieżkach ruchu. Na potrzeby tego rozwiązania opracowałem dedykowany protokół komunikacji bazujący na standardzie IEEE 802.15.4, który zaimplementowaliśmy, uruchomiliśmy i przetestowaliśmy w rzeczywistych lokalizacjach. Opracowany protokół komunikacji kładzie nacisk na zapewnienie małych opóźnień transmisji i wysokiej niezawodności. Celem jest minimalizacja sytuacji, w których dane niezbędne do wyznaczenia ścieżki przejazdu, nie są skutecznie przesłane do kolejnych kamer. Jednocześnie zaproponowane rozwiązanie miało na celu zapewnienie, że jak największa przepustowość komunikacji radiowej jest dostępna dla trans-

[32] Phui San Cheong, Johan Bergs, Chris Hawinkel, Jeroen Famaey, *Comparison of LoRaWAN Classes and their Power Consumption*, 2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT), Leuven, Belgium, 2017, pp. 1-6,

[5] T.Surmacz, M.Słabicki, B.Wojciechowski, M.Nikodem, *Lessons learned from the deployment of wireless sensor networks*, Computer Networks : 20th International Conference, CN 2013, Lwówek Śląski, Poland, June 17-21, 2013

[6] T.Surmacz, B.Wojciechowski, M.Nikodem, M.Słabicki, *On testing Wireless Sensor Networks*, 8th International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, September 9-13, 2013, Brunów, Poland

[A7] M.Nikodem, i in., *Multi-camera vehicle tracking using edge computing and low-power communication*, Sensors, 2020, vol. 20, nr 11, s. 1-16

misji danych i nie jest przeznaczana na potwierdzanie transmisji czy zarządzanie strukturą sieci i komunikacją. W rozwiązaniu zaproponowałem wykorzystanie metod wykrywania błędów transmisji z użyciem sum kontrolnych (ang. *Cyclic Redundancy Check – CRC*), sekwencyjnego numerowania pakietów, żądania powtórzeń pakietów niepoprawnych lub brakujących i dostępu do medium komunikacyjnego z wykorzystaniem techniki CSMA (ang. *Carrier Sense Multiple Access*) oraz TDMA (ang. *Time Division Multiple Access*). Ze względu na ograniczoną ważność przesyłanych wiadomości wprowadziliśmy również ograniczenia na czas ważności wiadomości w sieci (ang. *Time to Live – TTL*), pozwoliliśmy na agregowanie informacji o kilku pojazdach w jednej wiadomości (dla skrzyżowań o kilku pasach ruchu) i wprowadziliśmy możliwość transmisji rozgłoszeniowej (głównie wykorzystywanej do przesyłania informacji o pojazdach pomiędzy kamerami) oraz adresowanej (wykorzystywanej przede wszystkim do wymiany informacji sterujących i konfiguracyjnych działania sieci).

Zaprojektowane przeze mnie i opracowane przez cały zespół rozwiązanie zostało przetestowane na dwóch poligonach testowych złożonych z 3 i 6 kamer, które funkcjonowały nieprzerwanie przez okres kilkunastu tygodni. Testy pokazały, że w obu przypadkach system komunikacji gwarantuje 100% skuteczność transmisji danych (wszystkie informacje o pojazdach są poprawnie przesyłane pomimo zakłóceń i strat pojedynczych ramek radowych) o śledzonych pojazdach a skuteczność odtwarzania ścieżek ruchu jest ograniczona skutecznością detekcji, identyfikacji i wiązania informacji pochodzących z różnych kamer.

Ponieważ skuteczność systemu komunikacji zależy od ilości przesyłanych informacji, dlatego na poligonie złożonym z 6 kamer przeprowadziliśmy testy działania systemu w przypadku symulowanego ruchu pojazdu o różnym natężeniu, od 3 do 6 pojazdów na sekundę i różnych konfiguracjach działania systemu [A8]. Przyjęte w symulacjach natężenia ruchu nie są przypadkowe i miały na celu sprawdzenie rozwiązania w warunkach ekstremalnych. W typowym ruchu ulicznym odległość między kolejnymi pojazdami na jednym pasie wynosi od 2 do 3 sekund, niezależnie od prędkości. Natężenie ruchu 3 pojazdy na sekundę odpowiada więc bardzo dużemu natężeniu ruchu i kamerze obserwującej jednocześnie 3 pasy ruchu. Natężenie 6 pojazdów na sekundę jest sytuacją ekstremalną i niemal wyłącznie teoretyczną, do której może dojść albo, gdy mamy do czynienia z ekstremalnie dużym ruchem pojazdów, albo systemem, w którym każda z kamer obserwuje wiele pasów ruchu. W testach wykorzystaliśmy rzeczywiste urządzenia rozmieszczone wzdłuż ulicy i parkingu na odległości około 250 m. Symulowaliśmy natężenie ruchu pojazdów (liczbę generowanych komunikatów przez kamery systemu), ale transmisję realizowaliśmy pomiędzy rzeczywistymi urządzeniami w normalnych warunkach ich pracy, w tym obecności zakłóceń zewnętrznych. Testy te potwierdziły wysoką skuteczność transmisji danych pomiędzy elementami systemu, która przy natężeniu ruchu 3 pojazdy na sekundę nadal gwarantowała 100% skuteczność transmisji niezbędnych informacji. Skuteczność ta była osiągnięta pomimo zakłóceń zewnętrznych, utraty niektórych pakietów i konieczności ich retransmisji. Wraz ze wzrostem natężenia ruchu skuteczność transmisji zaczęła spadać. Dla ekstremalnego przypadku 6 pojazdów na sekundę opracowane rozwiązania pozwoliło skutecznie przesłać 86% informacji o pojazdach.

Projekt i wykonanie system komunikacji NeuroFlow pozwolił połączyć i w praktyce wykorzystać wyniki wcześniejszych prac badawczych i eksperymentalnych: synchronizację czasu na potrzeby realizacji dostępu TDMA, selektywne żądanie i powtarzanie brakujących pakietów, efektywne zarządzanie dostępnym pasmem i przepustowością komunikacyjną, połączenie transmisji rozgłoszeniowej i adresowanej, oraz agregację danych.

Wykorzystanie Bluetooth Low Energy w systemach IoT

Swoją wiedzę z zakresu technologii radiowych i tworzenia skutecznych systemów komunikacji wykorzystałem do opracowania rozwiązania komunikacyjnego dla systemu monitorowania dobrostanu zwierząt (ang. *Monitoring Activities of Farm Animals – MAFIA*) [A6]. Przeznaczeniem tego rozwiązania jest monitorowanie aktywności poszczególnych zwierząt mające na

[A8] M.Nikodem, i in., *Robust radio communication protocol for traffic analysis application*, 15-th International Conference on Dependability of Computer Systems DepCoS-RELCOMEX, June 29 - July 3, 2020

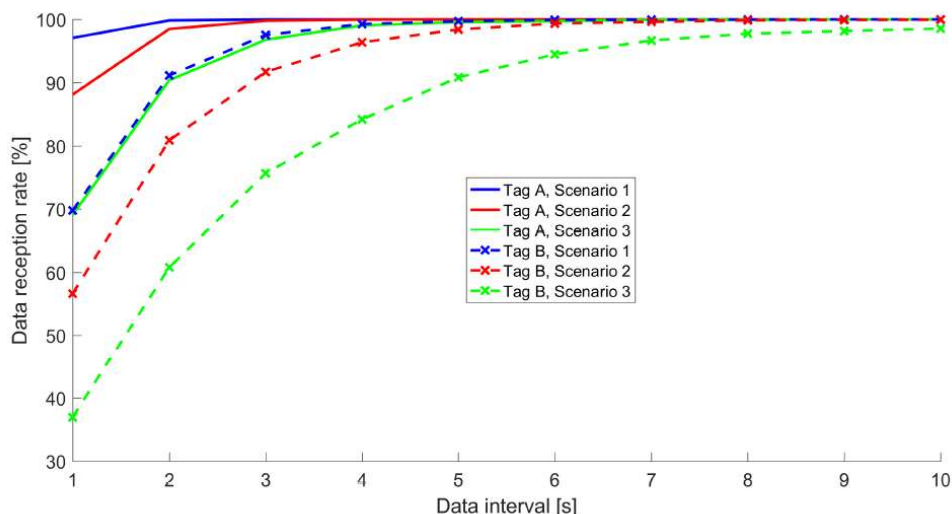
[A6] O.Unold, M.Nikodem, i in., *IoT-based cow health monitoring system*, 20th International Conference Computational Science - ICCS 2020, Amsterdam, the Netherlands, June 3-5, 2020, s. 344-356

celu wykrywanie sytuacji mogących świadczyć o sytuacjach, w których wymagana jest reakcja hodowcy. W szczególności dotyczy to sytuacji mogących świadczyć o pogorszeniu się ich stanu zdrowia lub zbliżającej się rui. W normalnych warunkach sytuacje te są wykrywane przez hodowcę i jego pracowników, jednak braki kadrowe dotykające hodowców powodują, że nie mogą oni poświęcić wystarczającej ilości czasu swoim zwierzętom. Poszukują więc rozwiązań systemowych, które wskażą im zwierzęta, którym należy poświęcić więcej uwagi. W odpowiedzi na to zapotrzebowanie zaprojektowałem system, którego zadaniem jest gromadzenie i analiza informacji o każdym zwierzęciu oddzielnie, ale również odniesienie ich do zachowań całej grupy hodowlanej. Z tego powodu opracowany system gromadzi i analizuje informacje na temat każdego zwierzęcia oddzielnie. Jednocześnie, ponieważ musi być dostępny dla małego i średniego hodowcy, wykorzystuje powszechną i energooszczędną technologię radiową, która nie wymaga specjalistycznego sprzętu ani obsługi. Dodatkowo, pomimo wykorzystania zasilania bateryjnego pozwala działać czujnikom przez kilka lat.

Zaprojektowany przeze mnie system wykorzystuje urządzenia nasobne noszone przez każde zwierzę, które przesyłają gromadzone pomiary za pomocą technologii radiowej Bluetooth Low Energy (BLE). Autorskim rozwiązaniem jest zastosowanie komunikacji bezpołączeniowej opartej całkowicie na wiadomościach rozgłoszeniowych, które nie posiadają wbudowanych mechanizmów zapewniania poprawności ich dostarczenia do odbiorcy. Odróżnia to rozwiązanie od typowych systemów wykorzystujących BLE, gdzie do przesyłania danych aplikacja stosowana jest komunikacja połączeniowa. Zaletą mojego podejścia jest znacznie mniejszy koszt energetyczny działania urządzeń i praktyczny brak ograniczeń na liczbę urządzeń jednocześnie przesyłających dane. W komunikacji połączeniowej liczba jednocześnie połączonych urządzeń jest bowiem zawsze ograniczona do kilkunastu, co jest konsekwencją ograniczonych zasobów pamięciowych węzłów BLE. Wyzwaniem jest zapewnienie poprawnej transmisji danych w sytuacji, w której standard BLE nie daje praktycznie możliwości potwierdzenia poprawności odebrania wysyłanych kolejno pakietów rozgłoszeniowych. Zaproponowane przeze mnie rozwiązanie bazuje na wcześniejszym doświadczeniu z projektu NeuroFlow. Wykorzystuje numery sekwencyjne do identyfikacji kolejnych paczek danych, używa komunikacji bezpołączeniowej do transmisji danych, a komunikacji połączeniowej tylko wówczas, gdy konieczne jest powtórne przesłanie brakujących informacji. Urządzenia noszone przez zwierzęta wysyłają kolejne paczki danych w wiadomościach rozgłoszeniowych i bezpołączeniowych, oznaczając je kolejnymi numerami sekwencyjnymi. Historyczne paczki z ustalonego okresu czasu są zapisywane na urządzeniu w pamięci cyklicznej. Stacje bazowe, rozmieszczone na terenie obory, zapamiętują ostatnie numery sekwencyjne i uzgadniają je między sobą, wykorzystując do tego oddzielny kanał komunikacyjny (sieć WiFi). W przypadku wykrycia brakującego numeru sekwencyjnego stacja bazowa łączy się z urządzeniem i pobiera brakującą paczkę danych. Użycie komunikacji połączeniowej wiąże się z większym kosztem energetycznym, ale zapewnia poprawność komunikacji na poziomie standardu BLE. Projektując to rozwiązanie jedną z moich największych obaw była skuteczność bezpołączeniowego przesyłania danych. W przypadku, gdyby była ona bardzo niska, dochodziłoby do częstego nawiązywania połączeń stacji bazowych z urządzeniami, co negatywnie wpłynęłoby na koszt energetyczny funkcjonowania urządzeń jak i efektywną przepustowość komunikacji.

W celu potwierdzenia skuteczności komunikacji zaplanowałem testy rozwiązania na dużej liczbie urządzeń [A5]. W eksperymentach zbadaliśmy skuteczność transmisji danych przez ponad 200 urządzeń BLE, które cyklicznie wysyłały kolejne numery sekwencyjne. Do transmisji wykorzystaliśmy standardowe ramki rozgłoszeniowe protokołu BLE (ang. *legacy advertisements*) wysyłane co 250 i 750 ms. W ramach umieszczaliśmy numery sekwencyjne i losowe ciągi bajtów symulujące rzeczywiste pomiary. Numery sekwencyjne były zmieniane co ustalony czas od 1 do 10 sekund. Czas ten odpowiada częstotliwości, z jaką są gromadzone rzeczywiste pomiary w docelowym systemie. Ocenialiśmy skuteczność odebrania ramek rozgłoszeniowych (parametr PRR) oraz, za proponowany przeze mnie parametr – skuteczność odebrania numerów sekwencyjnych DRR (ang. *data reception rate*). W ramach testów ocenialiśmy skuteczność transmisji w warunkach dużych zakłóceń (wiele nadających równocześnie urządzeń BLE) oraz wydajność

[A5] M.Nikodem, M.Bawiec, *Experimental Evaluation of Advertisement-Based Bluetooth Low Energy Communication*, *Sensors* 2020, 20, 107



Rysunek 6: Skuteczność dostarczania danych aplikacji (DRR) w funkcji czasu ich generowania (data interval) dla dwóch częstotliwości rozgłaszania informacji (tag A i B) oraz scenariuszy testowych różniących się liczbą jednocześnie transmitujących urządzeń. Rysunek zaczerpnięty z pracy [A5].

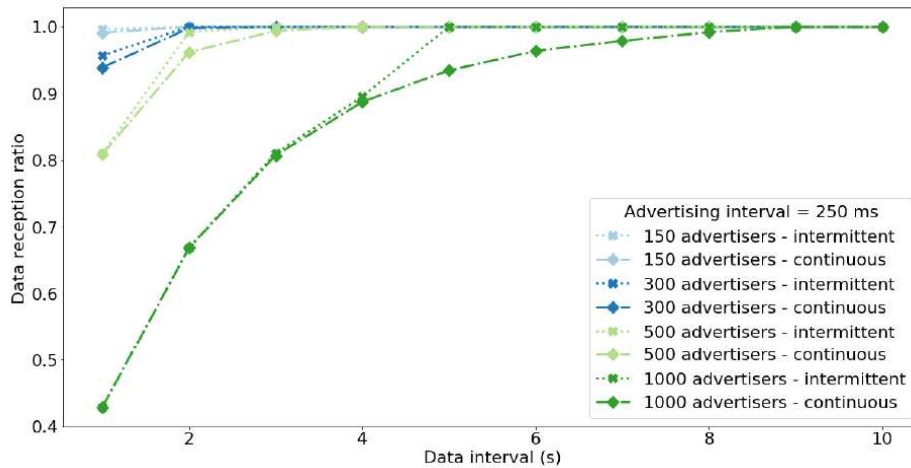
odbierania i przetwarzania wiadomości przez stację bazową. Drugi aspekt wynikał z tego, że jako stacji bazowej postanowiliśmy użyć urządzenia RPi Zero W, które ma ograniczone moce obliczeniowe i tor antenowy współdzielony pomiędzy moduł komunikacji WiFi i BLE. Testy miały na celu potwierdzić, że urządzenie to może być stosowane jako stacja bazowa w docelowym systemie.

Rysunek 6 prezentuje skuteczność transmisji danych (parametr DRR) w funkcji częstotliwości generowania danych (ang. *Data interval*), dla dwóch urządzeń A i B (nadających ramki rozgłoszeniowe z częstotliwością odpowiednio 250 i 750 ms) i trzech scenariuszy testowych: scenariusz 1, w którym nadawały tylko urządzenia A i B; scenariusz 2, gdzie nadawały wszystkie urządzenia, ale stacja bazowa odbierała tylko informacje od urządzeń A i B (wykorzystano mechanizm filtrowania wbudowany w stos protokołu BLE), oraz scenariusz 3, gdzie stacja bazowa odbierała informacje wysyłane przez wszystkie węzły. Analizując wykres można zauważyć, że dla wartości data interval większej niż 5 s skuteczność przesyłania danych przez węzeł A przekracza 99%. Wyniki testów potwierdziły, że zaproponowany sposób przesyłania informacji jest w stanie zagwarantować poprawną transmisję danych. Co więcej, wyniki analiz w pierwszych instalacjach rzeczywistych pokazały, że transmisja bezpołączeniowa jest na tyle skuteczna, że jedyne sytuacje, w których zachodzi potrzeba nawiązania połączenia ze stacją bazowej z urządzeniem i przesłania brakujących danych zdarzają się wówczas, gdy zwierzę i urządzenie znajdzie się poza zasięgiem systemu i dane nie są dostarczane ze względu na obiektywny brak możliwości skutecznej transmisji.

Zaprojektowane przeze mnie i opracowane przez zespół rozwiązanie zostało wdrożone i w zmienionej postaci jest dostępne komercyjnie. Instalacje zrealizowane i działające na przestrzeni lat od pierwszego uruchomienia, potwierdziły wysoką skuteczność i niezawodność gromadzenia i przesyłania informacji od urządzeń nasobnych do centralnego systemu. Pokazały również, że rozwiązanie jest energooszczędne – około 15% urządzeń wymaga wymiany baterii po okresie działania 2-3 lat, najstarsze urządzenia, działają nieprzerwanie ponad 4 lata.

Komunikacja bezpołączeniowa i bez potwierdzeń pozwala na realizację skutecznego i efektywnego energetycznie systemu komunikacyjnego. Wykorzystując standard BLE 4.x możliwe jest zbudowanie systemu IoT złożonego z wielu urządzeń rozmieszczonych na niewielkim obszarze i komunikujących się niezawodnie.

Choć rozwiązanie komunikacyjne opracowane dla projektu MAFiA spełnia stawiane mu wymagania i pozwoliło zbudować stabilnie działający, komercyjny system, to wykorzystane w nim



Rysunek 7: Skuteczność dostarczania danych aplikacji (DRR) w funkcji czasu ich generowania (data interval) dla różnej liczby jednocześnie transmitujących urządzeń i dwóch różnych trybów pracy: z usypianiem (intermittent) i bez (continuous). Rysunek zaczerpnięty z pracy [A4].

mechanizmy nie do końca mnie zadowalały. Największe moje zastrzeżenia budziło nieprzerwane wysyłanie przez urządzenia wiadomości rozgłoszeniowych, niezależnie czy zostały one już poprawnie odebrane przez stację bazową, czy też nie. Wada tego rozwiązania jest oczywista – koszty energetycznie niepotrzebne ponoszone na kolejne rozgłoszenia, oraz zakłócanie komunikacji innych węzłów, powodujące, że muszą one wysłać więcej wiadomości, ponosząc większy koszt energetyczny. Wadom tym poświęciłem kolejną pracę [A4], w której zaproponowałem wykorzystanie standardowych wiadomości protokołu BLE jako potwierdzeń skutecznego rozgłoszenia informacji. Zaproponowałem wykorzystanie do tego celu stacji bazowych, które pracują w trybie aktywnego nasłuchiwanie na rozgłoszenia. W tym trybie stacja bazowa odbierając wiadomość rozgłoszeniową może wysłać do nadawcy żądanie skanowania *scan request*, na które nadawca musi odpowiedzieć wiadomością *scan response*. Ponieważ żądanie *scan request* jest wysyłane tylko w odpowiedzi na wiadomość rozgłoszeniową, to jego otrzymanie potwierdza skuteczne odebranie rozgłoszenia, a to pozwala nadawcy zaprzestać wysyłania kolejnych rozgłoszeń, wyłączyć nadajnik w celu oszczędzania energii i zmniejszyć zakłócenia w kanale komunikacyjnym. Ograniczeniem tej metody jest specyfikacja BLE i reguła określająca, które z odebranych wiadomości rozgłoszeniowych powodują wysłanie wiadomości *scan request*, oraz procedura wycofywania (ang. *back-off*), która dostosowuje częstotliwość jej wysyłania do skuteczności otrzymywania odpowiedzi *scan response*. Reguły te są opisane w standardzie BLE i powodują, że nie każde skutecznie odebrane rozgłoszenie wygeneruje transmisję wiadomości *scan request*.

Pomimo powyższych ograniczeń eksperymenty przeprowadzone na 150 urządzeniach działających w jednym środowisku pokazały, że wykorzystanie aktywnego skanowania i wyłączanie rozgłaszania wiadomości po odebraniu żądania *scan request* istotnie zmniejsza liczbę zrealizowanych transmisji (a zatem koszt energetyczny i zakłócenia w kanale radiowym) i pozwala zwiększyć częstotliwości generowania danych, bez negatywnego wpływu na skuteczność ich dostarczania do stacji bazowych. Przeprowadziliśmy również testy symulacyjne z wykorzystaniem dedykowanego symulatora, który pozwolił ocenić działanie również większych sieci złożonych z 500 i 1000 urządzeń BLE o różnych parametrach działania (częstotliwości wysyłania wiadomości rozgłoszeniowych i generowania danych/numerów sekwencyjnych).

Wyniki pokazały, że wykorzystanie proponowanego rozwiązania pozwala radykalnie ograniczyć liczbę wysyłanych wiadomości rozgłoszeniowych. W eksperymentach mediana liczby wysyłanych rozgłoszeń przez 150 urządzeń zmalała z 40 do 1 przy zachowaniu 100% skuteczności dostarczania danych (DRR=100%). To oznacza spadek współczynnika traconych pakietów, który spadł poniżej 20% podczas gdy dla wcześniejszego podejścia przekraczał 50%. Pomimo że

[A4] M.Nikodem, M.Slabicki, M.Bawiec, *Efficient Communication Scheme for Bluetooth Low Energy in Large Scale Applications*, *Sensors* 2020, 20, 6371

w proponowanym rozwiązaniu urządzenia wymieniają ze sobą dodatkowe wiadomości (*scan request* i *scan response*) to sumaryczna liczba wszystkich transmisji radiowych spadła o rząd wielkości. Wyniki pokazują, że zaproponowana metoda rzeczywiście pozwala ograniczyć liczbę transmisji i w efekcie zmniejszyć ponoszony koszt energetyczny oraz zakłócenia w kanale komunikacyjnym. Wyniki symulacji (Rysunek 7) pokazały, że nawet dla 1000 węzłów w sieci możliwe jest osiągnięcie 100% skuteczności transmisji danych (DRR=100%) dla data interval większego niż 5 sekund.

Wiadomości *scan request* w standardzie BLE można traktować jako potwierdzenie dostarczenia wiadomości i wykorzystać do sterowania pracą węzłów sieci. W szczególności można na ich podstawie podejmować decyzję o uśpieniu węzłów istotnie zwiększając ich efektywność energetyczną, i zmniejszając zakłócenia w kanale komunikacyjnym.

Ograniczeniem w sposobie wykorzystania wiadomości *scan request* jest jej format, który został przez standard BLE bardzo mocno ograniczony – wiadomość ta zawiera jedynie adresy nadawcy i adresata, i nie zawiera żadnych danych aplikacji. To ograniczenie powoduje, że jej zastosowanie w systemach IoT jest bardzo ograniczone i potraktowanie jej przez mnie jako potwierdzenia odebrania wiadomości było podejściem niespotykanym wcześniej w literaturze. Ciekawostką jest też fakt, że ten mechanizm jest współcześnie wykorzystywany w systemach lokalizacji wykorzystujących BLE, gdzie sekwencja wiadomości rozgłoszeniowej, *scan request* i *scan response* synchronizuje działanie węzłów i inicjuje pomiar odległości między nimi [33].

[33] Nordic Semiconductor, *Introduction to Nordic Distance Toolbox*, tech. rep., 2022,

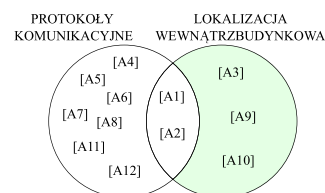
Lokalizacja wewnątrzbudynkowa

Od roku 2013 zacząłem się w swoich pracach skupiać na zagadnieniu wykorzystania radia małej mocy i systemów IoT w lokalizacji wewnątrzbudynkowej. Bardzo interesującym i praktycznym zastosowaniem takiego systemu było zwiększenie bezpieczeństwa ludzi w kopalniach podziemnych w sytuacjach zagrożenia i po wypadkach (np. tąpnięciach). Wraz z firmą MT-Silesia Sp. z o.o. zrealizowałem projekt, w ramach którego opracowaliśmy system komunikacji i lokalizacji górników, którego zadaniem było dostarczenie ekipom ratunkowym informacji o położeniu osób tuż przed zdarzeniem [10]. Do prac wykorzystaliśmy systemy bazujące na pomiarze czasu transmisji sygnału radiowego, które pozwalają na połączenie i jednoczesną realizację komunikacji danych oraz pomiar odległości. W pracach zbadaliśmy możliwość wykorzystania dwóch rozwiązań różniących się między sobą sposobem działania oraz właściwościami:

- pomiaru czasu przelotu pakietu radiowego (ang. *Time of Flight – ToF*) oraz
- pomiar różnicy czasu odebrania (ang. *Time Difference of Arrival – TDoA*).

Zaletą podejścia ToF jest brak konieczności synchronizacji zegarów urządzeń realizujących pomiar czasu transmisji. W podstawowej wersji tej metody, pomiar polega bowiem na wysłaniu wiadomości przez węzeł A, który zapisuje lokalny czas jej wysłania. Wiadomość jest odbierana przez urządzenie B o znanym położeniu (kotwica), które odpowiada na nią po ustalonym okresie czasu, jaki jest niezbędny do jej przetworzenia i reakcji na nią. Różnica czasu pomiędzy odebraniem odpowiedzi od kotwicy a wysłaniem pierwszej wiadomości jest równa sumie czasu odpowiedzi kotwicy oraz czasu, jaki potrzebuje fala elektromagnetyczna na przebycie drogi pomiędzy A i B, w obie strony. Znając prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku, możliwe jest oszacowanie tej odległości. Realizując tę procedurę z wieloma kotwicami, węzeł A poznaje swoją odległość do sąsiadujących z nim kotwic. Na ich podstawie, używając multilateracji, określa swoje położenie w przestrzeni względem kotwic. Zaletą tej metody jest brak konieczności synchronizacji czasu pomiędzy urządzeniami, która nie tylko wymaga dodatkowej komunikacji, stabilnych zegarów i cyklicznego przeprowadzania, ale także musiałaby być realizowana z bardzo dużą dokładnością, aby uzyskiwane pomiary miały dokładność poniżej 1 metra — różnica czasu 1 ns (10^{-9} s) odpowiada odległości około 30 cm.

Trudnością w tym podejściu jest wrażliwość na wszelkie niedokładności pomiaru czasu przez węzeł i kotwice, oraz różnice w dryftach ich zegarów, które akumulują się i zwiększają błąd oszacowania odległości. W literaturze zaproponowano rozwiązania, które pozwalają minimalizować



[10] S.Szymczak, T.Jankowski, M.Nikodem, *Underground GPS (UGPS) - precondition for location based services underground*, Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa : bezpieczeństwo - efektywność - niezawodność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, 2014

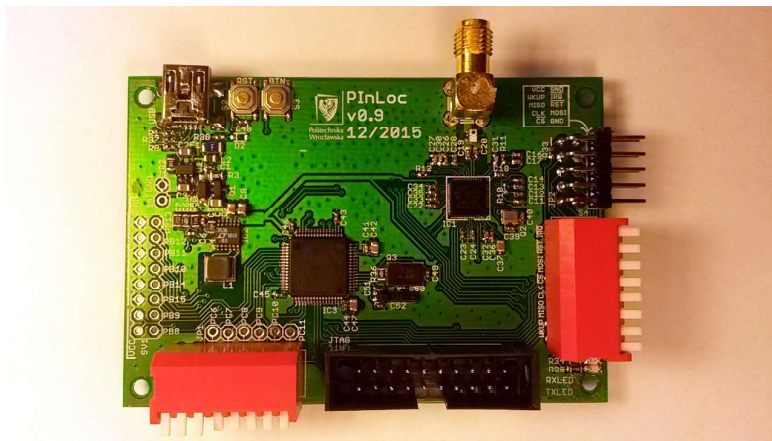
wpływ tych błędów (np. *Symmetric Double-Side Two-Way Ranging – SDS-TWR*), ale ich wadą, w porównaniu do podstawowej wersji ToF, jest konieczność wymiany jeszcze większej liczby wiadomości pomiędzy węzłami dokonującymi pomiaru odległości. Ogromną wadą rozwiązania jest natomiast konieczność oddzielnej realizacji pomiarów odległości do kilku kotwic, aby można było przeprowadzić multilaterację. Oznacza to konieczność wymiany wielu wiadomości, co zajmuje dostępną przepustowość kanału komunikacyjnego. W praktyce powoduje to, że w sieci może istnieć ograniczona liczba urządzeń prowadzących komunikację i lokalizację, a zwiększenie liczby urządzeń musi wiązać się ze zmniejszeniem częstotliwości komunikacji i lokalizacji. Rozwiązanie to więc nie skaluje się do dużych systemów z wieloma urządzeniami.

Powyzszych wad pozbawiona jest metoda TDoA, która jednak wymaga precyzyjnej synchronizacji czasu urządzeń w sieci IoT. W wersji pełnej działa analogicznie do satelitarnych systemów lokalizacji wymagając synchronizacji czasu pomiędzy wszystkimi urządzeniami. Ponieważ synchronizacja węzłów sieci wymaga cyklicznej komunikacji radiowej i stabilnych zegarów lokalnych, to realizacja tej wersji w sieci IoT jest w praktyce trudna i kosztowna energetycznie – stabilne zegary lokalne podnoszą koszt energetyczny węzłów i są niepraktyczne, a wykorzystanie typowych zegarów wymaga częstych synchronizacji, które uszczuplają przepustowość kanału komunikacyjnego. W wersji prostszej synchronizacja jest ograniczona jedynie do kotwic systemu, które zazwyczaj mogą być podłączone do stabilnego źródła zasilania, posiadać dodatkowy kanał komunikacyjny między sobą przeznaczony do synchronizacji ich zegarów (np. z użyciem standardowych protokołów, takich jak *precision time protocol – PTP*), lub być wyposażone w odbiorniki GPS ze stabilnym, cyklicznym sygnałem synchronizującym (ang. *pulse per second – PPS*). Zaletą takiego podejścia jest możliwość określenia lokalizacji węzła na podstawie pojedynczej wiadomości radiowej wysłanej przez węzeł mobilny – system centralny może ustalić położenie węzła na podstawie różnic pomiędzy czasami odebrania tej wiadomości przez wiele kotwic systemu. Rozwiązanie to nadal wymaga liczby transmisji zależnej od liczby węzłów mobilnych w sieci, ale ich całkowita liczba jest istotnie mniejsza niż w przypadku ToF. Jest więc to rozwiązanie bardziej skalowalne o mniejszym opóźnieniu lokalizacji w porównaniu do ToF. Wadą jest fakt, że położenie jest wyznaczane i dostępne dla infrastruktury systemu, a nie lokalizowanego węzła. Jeśli węzeł potrzebuje tej informacji, to konieczna jest jej transmisja w wiadomości zwrotnej.

Pracując nad systemem lokalizacji dla kopalni podziemnych [10] dążyliśmy do minimalizacji słabych stron poszczególnych rozwiązań i stworzenia rozwiązania, które nie tylko pozwoli na lokalizację w warunkach kopalnianych, ale pozwoli nadal realizować zadania całego systemu (oferować możliwość komunikacji z górnikiem pod ziemią). Jednym z rozwiązań, które wykorzystaliśmy, było połączenie wiadomości zawierających komunikaty aplikacji z wiadomościami służącymi lokalizacji. W ten sposób lokalizacja stała się elementem standardowych pakietów danych, była realizowana niejako przy okazji normalnej transmisji, i wymagała przesyłania mniejszej liczby dodatkowych wiadomości. Wspólnie z zespołem zintegrowaliśmy zaprojektowane rozwiązanie z urządzeniami oferowanymi przez firmę. Kotwicami systemu lokalizacji zostały przemysłowe komputery komunikacyjne, a urządzeniami lokalizowanymi pagery wykorzystywane już wcześniej do komunikacji tekstowej z górnikiem. W trakcie konferencji KOMAG pokazaliśmy w pełni funkcjonalny prototyp systemu, który wcześniej został przetestowany na terenie sztolni kowarskich i podziemnym chodniku kopalnianym będącym częścią trasy turystycznej w Centrum Nauki i Sztuki Stara Kopalnia w Wałbrzychu. W pracach wykorzystywaliśmy pomiary ToF realizowane z użyciem dwóch technologii radiowych. W pierwszym prototypie użyliśmy układów TN 100 (ST Microelectronics) pracujących w paśmie 2.4 GHz, wykorzystujących modulację *Chirp Spread Spectrum – CSS* i pozwalających na pomiar o odległości z dokładnością poniżej kilkunastu centymetrów. W ramach prac miałem okazję współpracować bezpośrednio z projektantami tych układów, którzy opracowali cały system pomiaru czasu i wyznaczania odległości – Zbigniewem Ianellim oraz Januszem Sztajerem. Ze względu na ograniczoną dostępność układów TN 100 (obecnie nie są już produkowane) w ostatecznym rozwiązaniu UGPS wykorzystaliśmy układy DW 1000 (Qorvo, dawniej Decawave), działające w technologii UWB (ang. *ultra wideband*). Na potrzeby badań zaprojektowaliśmy i wykonaliśmy własne płytki lo-

[10] S.Szymczak, T.Jankowski, M.Nikodem, *Underground GPS (UGPS) - precondition for location based services underground*, Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa : bezpieczeństwo - efektywność - niezawodność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, 2014

www.starakopalnia.pl



Rysunek 8: Prototypowa płytko lokalizacyjna wykonana w ramach projektu FNP i wykorzystywana w testach systemów lokalizacji z pomiarem czasu.

kalizacyjne wyposażone w moduł DW 1000 (Rysunek 8).

Drugi mechanizm, który zaproponowałem, to lokalizacja wykorzystująca pomiar różnicy czasu odebrania wiadomości (TDoA), ale bez prowadzenia oddzielnej synchronizacji elementów systemu (ang. *Synchronization-Free TDoA – SFTDoA*). Dodatkowo rozwiązanie to pozwala na wyznaczenie położenia przez węzeł mobilny przy złożoności komunikacyjnej niezależnej od liczby lokalizowanych węzłów a jedynie liczby kotwic biorącej udział w lokalizacji [A10]. W zaproponowanym rozwiązaniu kotwice systemu SFTDoA, podobnie jak satelity GPS, wysyłają cykliczne wiadomości lokalizacyjne, które są odbierane przez węzły mobilne. Wiadomości te nie są jednak wysyłane niezależnie, ale są ze sobą powiązane zależnościami czasowymi. Kolejna kotwica wysyła swoją informację w określonym odstępie czasu od odebrania wiadomości poprzedniej kotwicy. Ponieważ położenie kotwic i opóźnienia ich transmisji są znane, to węzeł mobilny wie, że moment odebrania kolejnych wiadomości zależy od czasu transmisji pomiędzy kotwicami, opóźnieniu na kotwicy i jego nieznaną odległości od kotwicy. Licząc różnicę czasów odebrania sygnałów od dwóch kotwic, węzeł mobilny wyznacza różnicę czasu odebrania wiadomości (TDoA), a na podstawie trzech różnic jest w stanie określić swoje położenie. Zaletą zaproponowanej metody względem wcześniejszego rozwiązania o nazwie Whistle [34], jest poprawiona skalowalność. Ponieważ węzły mobilne nie muszą wysyłać żadnej wiadomości, to liczba komunikatów lokalizacyjnych nie zależy od liczby węzłów. Jest to diametralnie odmienna sytuacja w porównaniu do metody Whistle, gdzie węzły mobilne wysyłały wiadomości, które inicjowały kolejną transmisję wykonywaną przez wybraną kotwicę (tzw. *whistling anchor*). Innymi słowy, każdy lokalizowany węzeł generuje dodatkowe transmisje ograniczając przepustowość i dostępne pasmo.

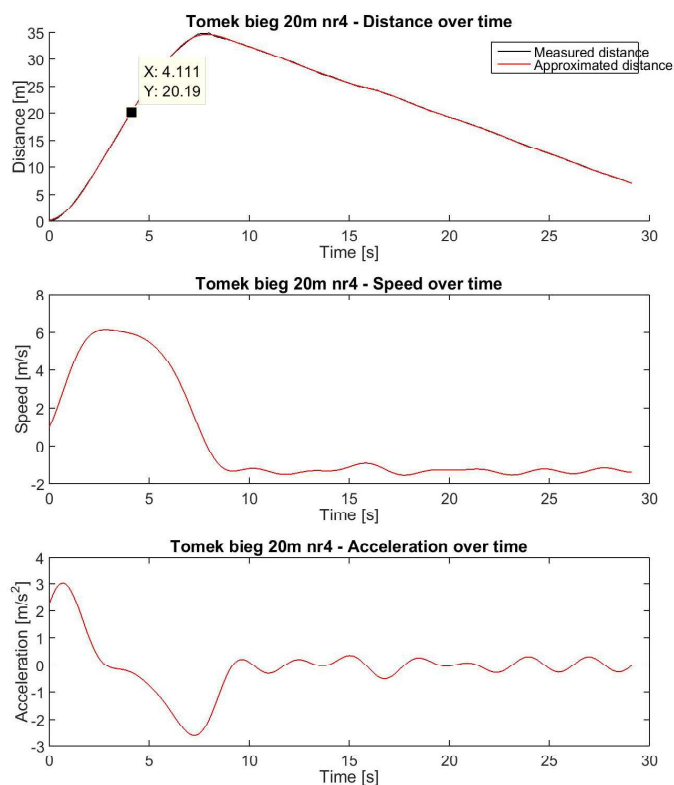
Ograniczeniem zaproponowanej metody jest dokładność odmierzania czasu przez poszczególne kotwice systemu – im większa niedokładność zegarów i dryft, tym błąd określenia położenia rośnie. Błąd ten zależy również od wielkości opóźnień na poszczególnych kotwicach oraz liczby kotwic biorących udział w lokalizacji, ponieważ z czasem dryfty i niedokładności zegarów się akumulują i zwiększają niedokładności pomiarowe. Używając symulacji [A9], w których modelowaliśmy zarówno komunikację jak i błędy zegarów, pokazaliśmy, że zaproponowana metoda pozwala osiągnąć bardzo dobry wynik lokalizacji przy wykorzystaniu zaledwie trzech kotwic na obszarze o powierzchni 500 m². Ze względu na większą liczbę kotwic biorących udział w lokalizacji większą liczbę transmisji potrzebnych do wyznaczenia położenia, błędy wprowadzane przez niedoskonałe zegary są nieco większe niż w przypadku metody Whistle.

Ciekawą właściwością metody SFTDoA jest pośrednia, niejawną synchronizacja kotwic systemu. Jeśli pierwsza z kotwic, inicjująca procedurę pomiarową, wysyła swoje wiadomości cyklicznie, to pozostałe kotwice, znając swoje rzeczywiste położenia, mogą korygować swój lokalny zegar i synchronizować go z pierwszą kotwicą. Warto jednak zauważyć, że w przypadku SFTDoA synchronizacja kotwic realizowana jest przy okazji lokalizacji. Odróżnia to tę metodę od

[A10] T.Jankowski, M.Nikodem, *Synchronization-free TDoA localization method for large scale wireless networks*, 8th Int. Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sep. 18-21, 2017, Sapporo, Japan

[34] B. Xu, G. Sun, R. Yu and Z. Yang, *High-Accuracy TDOA-Based Localization without Time Synchronization*, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 24, no. 8, pp. 1567-1576, Aug. 2013

[A9] T.Jankowski, M.Nikodem, *SMILE - simulator for methods of indoor localization*, 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 24-27 September 2018, Nantes, France, s. 1-7



Rysunek 9: Pomiary ćwiczenia biegowego wykonane poprzez pomiar odległości wykonany z wykorzystaniem urządzeń UWB i pomiaru czasu przelotu. Górny wykres przedstawia odfiltrowany pomiar odległości, środkowy prędkość ruchu ćwiczącego, a dolny jego przyspieszenia. Rysunek zaczerpnięty z raportu końcowego przygotowanego dla zleceniodawcy.

typowego podejścia TDoA, gdzie najpierw przeprowadzana jest synchronizacja, a następnie procedura lokalizacji.

Lokalizacja wewnątrzbudynkowa w sieci IoT, bazująca na pomiarze czasu, może zostać przeprowadzona bez konieczności wcześniejszej synchronizacji czasu i przy złożoności komunikacyjnej niezależnej od liczby lokalizowanych węzłów.

Ciekawym zastosowaniem, w którym testowaliśmy wykorzystanie pomiaru odległości pomiędzy urządzeniami UWB, było monitorowanie ćwiczeń wysiłkowych piłkarzy. Celem badań, prowadzonych wspólnie z trenerami Śląska Wrocław, było zastąpienie urządzeń bazujących na pomiarach GPS tak, aby rozwiązanie mogło być stosowane również wewnątrz pomieszczeń. W rozwiązaniu skupiliśmy się na monitorowaniu biegu wahadłowego, w trakcie którego ćwiczenie jest powtarzane tak długo, aż czas pokonania kolejnego wahadła spadnie poniżej ustalonego progu, względem czasu najlepszego. Wyzwaniem dla tworzonego rozwiązania była konieczność zapewnienia dużej częstotliwości pomiarów oraz dokładne wykrywanie momentów rozpoczęcia i zakończenia kolejnych "wahnięć". W prototypowym rozwiązaniu wykorzystaliśmy jedną kotwicę UWB i jedno urządzenie noszone przez osobę ćwiczącą, które realizowało pomiary odległości na podstawie pomiaru czasu przelotu. Na podstawie bieżącej analizy wyników pomiarów możliwe było nie tylko wykrycie momentu zakończenia kolejnego wahadła (z dokładnością nie gorszą niż 0.1s), ale również możliwość monitorowania prędkości i przyspieszeń (Rysunek 9). Niestety ze względu na brak finansowania prace zostały zakończone na etapie badań wstępnych.

Ograniczeniami systemów lokalizacji bazujących na ToF/TDoA jest konieczność bardzo dokładnego pomiaru czasu i wykorzystania do tego specyficznych technologii transmisji, obecnie głównie UWB. Porównując UWB z technologią BLE łatwo można zauważyć, że tą pierwszą ce-

chuje relatywnie wysoka cena urządzeń, mała popularność i powszechność wykorzystania oraz relatywnie duży koszt energetyczny działania [35]. Co więcej, wykorzystanie przez UWB pasm radiowych o wyższych częstotliwościach powoduje, że efektywny zasięg komunikacji, szczególnie w warunkach komunikacji wewnątrzbudynkowej, jest mniejszy. W konsekwencji do zbudowania systemu lokalizacji pokrywającego ten sam obszar potrzeba więcej urządzeń infrastruktury (kotwic) niż w przypadku BLE.

Powyższe obserwacje, jak i realna potrzeba rozbudowy systemu MAFiA o możliwość określania położenia zwierząt na terenie obory, zainspirowały mnie do prac związanych z wykorzystaniem BLE do lokalizacji. Ponieważ jednak standard BLE nie był tworzony z myślą o określaniu położenia komunikujących się urządzeń, to jego wersje, aż do 5.1, nie oferują żadnego mechanizmu, który by taką lokalizację wspierał. Ze względu na zapotrzebowanie, w literaturze tematu już od końca pierwszej dekady XXI wieku, zaczęły pojawiać się prace wykorzystujące pomiar mocy sygnału radiowego (ang. *Received Signal Strength – RSS*) i wskaźnik RSSI (ang. *Received Signal Strength Indicator*) do tego celu. W przeciwieństwie do moich prac literatura tematu skupiała się głównie na lokalizacji w małych obszarach (kilkanaście-kilkadziesiąt metrów kwadratowych) wyposażonych w gęstą infrastrukturę lokalizacyjną (kotwice).

Podobieństwo pomiędzy wykorzystaniem RSSI i ToF do lokalizacji polega na tym, że obie metody pozwalają oszacować odległość komunikujących się stron. W przypadku RSSI oszacowanie bazuje na fakcie, że moc odbieranego sygnału radiowego maleje wraz z odległością. Trudnością jest to, że dokładna zależność spadku mocy sygnału od odległości zależy od bardzo wielu czynników środowiskowych a wykorzystywane powszechnie modele propagacji sygnału (ang. *path loss models*) przybliżają ją z małą dokładnością. W pracach dotyczących BLE szybko zauważono, że mierzona wartość współczynnika RSSI zależy od wykorzystywanego kanału komunikacyjnego [36], jednak prace te były ograniczone do wykorzystania trzech podstawowych kanałów komunikacyjnych BLE. Ta obserwacja zainspirowała mnie do tego, aby do lokalizacji wykorzystać nie tylko zmierzoną wartość RSSI, ale połączyć ją z informacją, na którym kanale komunikacyjnym została zmierzona i na tej podstawie dokładniej określić odległość między komunikującymi się urządzeniami.

W pracy [A3] zaproponowałem wykorzystanie możliwości oferowanych przez standard BLE 5 pozwalających na wysyłanie wiadomości rozgłoszeniowych na wszystkich 40 kanałach radiowych. Dzięki temu możliwe było zgromadzenie pomiarów RSSI oddzielnie dla wszystkich kanałów i wykorzystanie ich do określenia odległości oraz szacowania pozycji. Zaproponowałem dwa sposoby wykorzystania zgromadzonych informacji, różniące się złożonością. W pierwszej metodzie algorytm lokalizacji bazuje na zagregowanych oszacowaniach odległości dostarczanych przez poszczególne kotwice – informacja o kanale radiowym wykorzystywana jest tylko na etapie szacowania odległości na podstawie pomiarów. W drugim podejściu wykorzystywane są wszystkie oszacowania odległości wraz z informacją o kanałach, na których dokonywane były pomiary RSSI – informacja o kanałach radiowych wykorzystywana jest zarówno na etapie szacowania odległości przez kotwice, jak i na etapie wyznaczania pozycji na podstawie wszystkich oszacowań odległości.

Weryfikację rozwiązań przeprowadziliśmy na podstawie pomiarów zebranych w warunkach rzeczywistych na obszarze 100 m², wykorzystując dwa algorytmy lokalizacyjne. Uzyskane wyniki pokazały, że pomiar RSSI i wykorzystanie wielu kanałów komunikacyjnych do lokalizacji pozwala istotnie poprawić dokładność określania pozycji, i to bez stosowania dodatkowych mechanizmów (np. filtrowania pomiarów). W przypadku wykorzystania multilateracji różnica średniego błędu określania pozycji pomiędzy wykorzystaniem 3 podstawowych kanałów komunikacyjnych a wykorzystywaniem wszystkich 40 wynosi niemal 20%. Pokazaliśmy również, że wykorzystanie informacji o kanale radiowym zarówno na etapie oszacowywania odległości, jak i wyznaczania położenia, pozwala poprawić dokładność o 6-10%. Ponieważ słabą stroną proponowanego podejścia jest wydłużony czas lokalizacji (ze względu na konieczność pomiaru RSSI w wielu kanałach), zbadaliśmy również, jak liczba wykorzystywanych kanałów radiowych wpływa na dokładność określania położenia. Wykazaliśmy, że już przy wykorzystaniu 10 kanałów możliwe jest uzyskanie efektów niemal takich samych jak w przypadku użycia wszystkich 40

[35] Samuel G. Leitch, i in., *On Indoor Localization Using WiFi, BLE, UWB, and IMU Technologies*, Sensors 2023, 23, 8598

[36] J. Powar, i in., *Assessing the impact of multi-channel BLE beacons on fingerprint-based positioning*, 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Sapporo, Japan, 2017, pp. 1-8

[A3] **M.Nikodem**, P.Szeliński, *Channel Diversity for Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy and Extended Advertisements*, IEEE Access, vol. 9, 2021

kanałów. Ponieważ jednak nie wszystkie kanały dają równie dobre wyniki lokalizacji, to wybór właściwych 10 wymaga zebrania pomiarów referencyjnych na obszarze lokalizacji. Z tego względu zbadaliśmy również, w jaki sposób liczba i dobór pomiarów referencyjnych wpływa na uzyskiwane wyniki. Pokazaliśmy, że przy małej liczbie pomiarów referencyjnych, wykorzystanie wielu kanałów pozwala osiągnąć porównywalną dokładność lokalizacji jak w przypadku wykorzystywania trzech podstawowych kanałów i długotrwałej kampanii pomiarowej, prowadzonej w wielu punktach testowych.

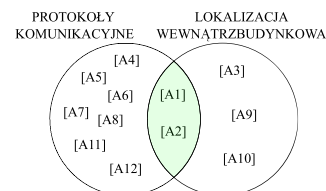
Wykorzystanie informacji o sile sygnału radiowego w wielu kanałach komunikacyjnych pozwala na istotną poprawę dokładności lokalizacji wewnątrzbudynkowej.

Systemy komunikacyjne z lokalizacją

Jednym z najistotniejszych wyzwań związanych z lokalizacją wewnątrzbudynkową jest jednoczesne wykorzystanie komunikacji radiowej do przesyłania danych aplikacji oraz wyznaczania pozycji. Wyzwania te wynikają z odmiennych i często przeciwstawnych wymagań. Komunikacja danych w systemach IoT ma zapewniać efektywne ponoszenie kosztów energetycznych, przez co zazwyczaj jest realizowana bardzo rzadko, asynchronicznie (węzły są niesynchronizowane z systemem i inicjują komunikację w momencie wykonania pomiaru lub zaobserwowania jakiegoś zdarzenia) i w większości przypadków jednokierunkowo (od węzłów do systemu centralnego). Dodatkowo w systemach takich infrastruktura odbiorcza rozmieszczona na obszarze działania jest ograniczona liczbowo i rzadko rozmieszczona. Z tego powodu technologie i protokoły komunikacyjne projektowane dla systemów IoT są optymalizowane właśnie pod kątem tych aspektów. Z drugiej strony, lokalizacja wymaga częstej komunikacji (szczególnie w przypadku węzłów, które się poruszają), wymiany wielu wiadomości (np. na potrzeby synchronizacji czasu, pomiaru ToF, czy uśrednienia i eliminacji szumów w pomiarach), często w sposób dwukierunkowy. Dla lokalizacji istotna jest również liczba, gęstość i rozmieszczenie kotwic na lokalizowanym obszarze [37]. O ile więc rozwiązania komunikacyjne dla sieci IoT dążą do redukcji kosztów energetycznych i zapewnienia długiego czasu działania, to nie wspierają możliwości lokalizacji. Wręcz przeciwnie, istotnie ograniczają możliwości wykorzystania standardowych rozwiązań lokalizacyjnych w rzeczywistych systemach IoT.

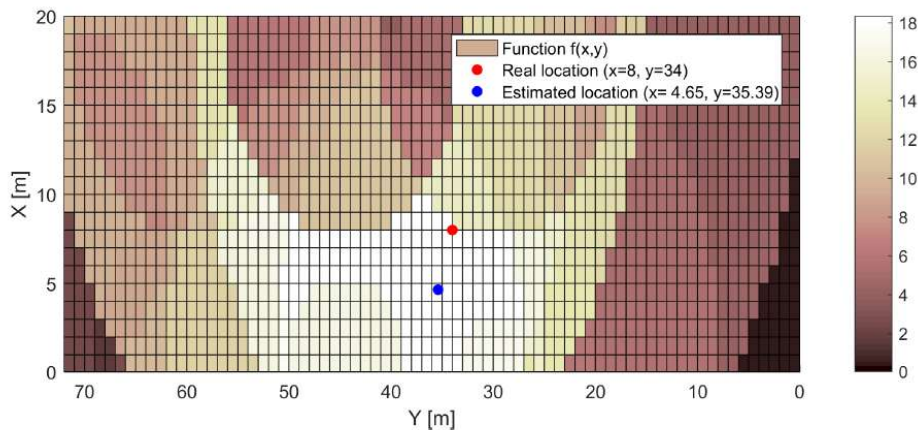
Obserwacja ta skłoniła mnie do poszukiwania rozwiązań, które pozwolą na opracowanie praktycznego systemu lokalizacji, który będzie dostarczał użytecznej informacji o położeniu, jednocześnie pozostając efektywnym energetycznie i działając z wykorzystaniem ograniczonej infrastruktury. W pracy [A2] zaproponowałem rozwiązanie lokalizacyjne, które bazuje na pomiarach mocy sygnału, jednak nie wykorzystuje go w tradycyjny sposób do oszacowania odległości pomiędzy kotwicą a węzłem, bazując na wybranym modelu propagacji. Dodatkowo zdefiniowałem nowy parametr TSS (ang. *Total Signal Strength*), który odzwierciedla sumaryczną moc sekwencji odebranych wiadomości i jest używany jako miara istotności pomiarów gromadzonych przez różne kotwice. W zaproponowanym rozwiązaniu, zamiast wyznaczania odległości na podstawie modelu propagacji, zmierzone wartości RSSI określają minimalną i maksymalną odległość od kotwicy, w której prawdopodobnie znajduje się lokalizowany węzeł. Pierścienie zdefiniowane przez pomiary RSSI zgromadzone przez różne kotwice wyznaczają prawdopodobne obszary, w których znajduje się węzeł, a zmierzona wartość mocy sygnału i odległość pierścienia od kotwicy definiują ich wagi. Pierścienie definiują funkcję, której maksimum wskazuje oszacowanie położenia węzła. Konkretna pozycja wyznaczana jest jako środek masy tego obszaru (Rysunek 10).

Zaproponowane rozwiązanie zostało przetestowane w rzeczywistych warunkach w działającym systemie opracowanym w ramach projektu MAFiA. W oborze o wymiarze 20 na 80 metrów, wykorzystując 10 kotwic, rozwiązanie to osiągnęło średnią dokładność lokalizacji wynoszącą 6.3 m. Wynik ten jest o 38% lepszy niż w przypadku wykorzystania typowego podejścia z wykorzystaniem modelu tłumienia sygnału radiowego (ang. *path loss model*). Zaletą rozwiązania było wykorzystanie pojedynczych pomiarów RSSI do przeprowadzenia lokalizacji. Trudnością



[37] *Impact of Anchor Placement and Anchor Selection on Localization Accuracy*, Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances , IEEE, 2019, pp.435-465

[A2] **M.Nikodem**, *Bluetooth Low Energy livestock positioning for smart farming applications*, 21st International Conference Computational Science - ICCS 2021, Krakow, Poland, June 16-18, 2021, s. 55-67



Rysunek 10: Przykład funkcji zbudowanej na podstawie pierścieni wyznaczonych przez poszczególne kotwice. Niebieski punkt został wyznaczony jako środek ciężkości obszaru wyznaczonego przez pierścienie.

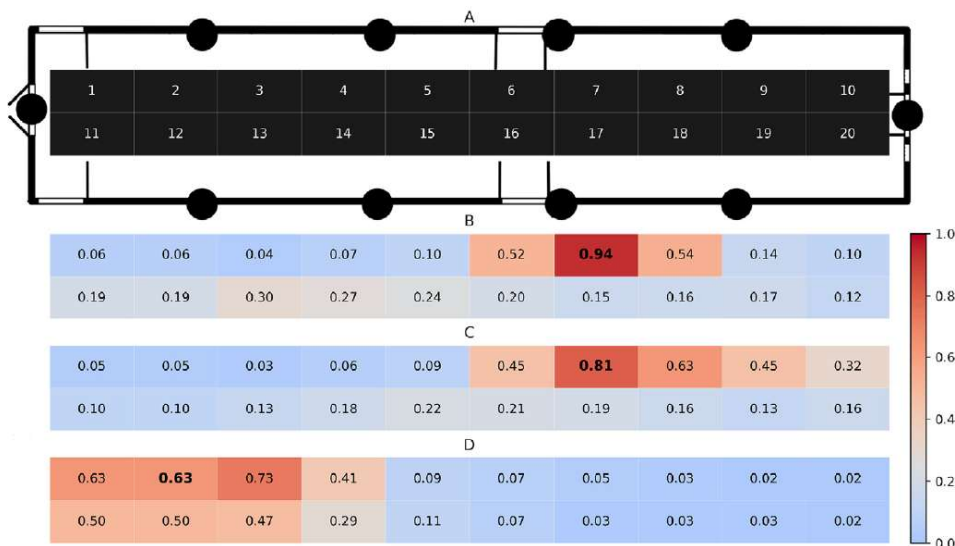
relatywnie częsty brak pomiarów od niektórych kotwic, co wynikało z dużych rozmiarów obszaru, niewielkiej liczby kotwic i trudnych warunków propagacji sygnału, który był tłumiony przez zwierzęta i elementy konstrukcyjne obory. Ze względu na konstrukcję samego algorytmu, definicję pierścieni i rozmieszczenie kotwic zaproponowane rozwiązanie wykazywało tendencję do oszacowywania położenia bliżej centralnej części obszaru.

Rozwiązanie powyższych ograniczeń przedstawiliśmy w pracy [A1] gdzie zaproponowaliśmy i oceniliśmy trzy różne metody określania położenia. Zaproponowane metody różniły się między sobą sposobem wyznaczania położenia, oraz rodzajem dostarczanych informacji. Z obserwacji działania i wykorzystania przez użytkowników wcześniejszego systemu lokalizacji zauważyliśmy, że informacja o położeniu w postaci współrzędnych ma ograniczoną przydatność dla użytkowników, bo nie jest naturalne przełożenie jej na miejsce w oborze. Podobnie sprawa ma się z określeniem strony obory, w której znajdują się zwierzęta – z punktu widzenia hodowcy ważne jest wskazanie strony, a nie dokładnego położenia wzdłuż krótszej krawędzi obszaru. Powyższe obserwacje zaowocowały zaproponowaniem przez nas algorytmu sekcyjnego, który nie wskazuje położenia w postaci współrzędnych (x, y) , ale fragment obszaru obory (sekcję), w której znajduje się zwierze. Pozostałe dwa algorytmy (pierścieniowy i masowy) zostały dostosowane tak, aby oprócz oszacowania położenia (x, y) , dostarczały również informację o przynależności do sekcji. Ocenę działania algorytmów przeprowadziliśmy w rzeczywistej oborze, którą podzieliliśmy na 20 równych sekcji (Rysunek 11). Wyniki pokazały, że zaproponowany algorytm sekcyjny w niemal 90% przypadków skazuje właściwą lub sąsiednią sekcję (odległość Chybsheva nie większa niż 1). Przykładowe trzy sytuacje przedstawione zostały na Rysunku 11. W przypadku określania położenia wszystkie zaproponowane metody pozwoliły uzyskać wyniki lepsze niż algorytmy bazowe, które wykorzystują model propagacji sygnału do wyznaczenia odległości z pomiaru RSSI. Zaproponowane rozwiązania zmniejszyły zarówno średnią, medianę jak i maksymalną wartość błędów nawet o 30%. Warto zauważyć, że choć mediana i średnia błędów określenia położenia ma dużą wartość bezwzględną (około 8 m), to dokładność taka jest wystarczająca dla rozważanego zastosowania. Pozwala łatwo odszukać zwierzę na terenie obory, a także może być wykorzystana do monitorowania aktywności ruchowej zwierzęcia w celu uwzględnienia tego parametru w ocenie stanu zdrowia [38].

Ważnym elementem zrealizowanych przez nas badań było również określenie wpływu liczby i rozmieszczenia kotwic na dokładność lokalizacji. Parametry te są ważne, ponieważ wpływają na koszt systemu, ich zwiększanie wpływa korzystanie na dokładność lokalizacji, ale nie jest potrzebne z punktu widzenia transmisji danych. W pracy pokazaliśmy negatywny wpływ zmniejszenia liczby kotwic na średni błąd lokalizacji. W przypadku zmniejszenia liczby kotwic z 10 do 6 średni błąd rośnie o 15-45% a dla użycia zaledwie 4, może wzrosnąć nawet ponad

[A1] K.Szyc, M.Nikodem, M.Zdunek, *Bluetooth low energy indoor localization for large industrial areas and limited infrastructure*, Ad Hoc Networks, Elsevier 2023, 20, 6371

[38] J.L. Edwards and P.R. Tozer, *Using Activity and Milk Yield as Predictors of Fresh Cow Disorders*, Journal of Dairy Science, vol. 87, no. 2, pp.524-531, 2004



Rysunek 11: Przykładowe trzy sytuacje określenia położenia przez algorytm sekcyjny. Kolory i wartości liczbowe reprezentują wynik lokalizacji – większe wartości współczynnika wskazują sekcje, w których znajduje się węzeł. Rzeczywista pozycja (sekcja) jest wskazana przez wytłuszczoną wartość współczynnika. Dwa pierwsze przykłady obrazują poprawną lokalizację, trzeci (najniższy) błędną, w której wskazano sekcję odległą o 1 od właściwej.

dwukrotnie. Wartość błędu bardzo silnie zależy również od rozmieszczenia kotwic na testowym obszarze. W pracy pokazaliśmy, że rezygnacja z kotwic skrajnych (odległych od środka obszaru) ma mniejszy negatywny wpływ niż ich pozostawienie i usunięcie innych kotwic, które są umieszczone bliżej środka obszaru.

Zaletą opracowanych metod jest brak konieczności zmiany sposobu funkcjonowania systemu w celu realizacji lokalizacji. Oznacza to, że stworzyliśmy użyteczny system lokalizacji bez konieczności rozbudowywania jego infrastruktury czy zmiany sposobu jego działania. Zaproponowane rozwiązanie nie wpłynęło negatywnie na koszty energetyczne działania węzłów sieci, a w konsekwencji na czas jej życia i poprawne funkcjonowanie.

Wykorzystanie ograniczonej liczby urządzeń infrastruktury i pomiaru mocy sygnału radiowego pozwala na stworzenie użytecznego systemu lokalizacji wewnątrzbudynkowej, działającego na dużym obszarze, przy ograniczonej infrastrukturze.

4.2 Podsumowanie głównego osiągnięcia

Prace opisane w ramach głównego cyklu publikacji są podsumowaniem prac badawczych, których celem było opracowanie skutecznych metod komunikacji dla systemów IoT oraz umożliwienie efektywnej lokalizacji węzłów w takich systemach. Ograniczenia rzeczywistych zastosowań systemów IoT powodują, że stosowanie rozwiązań znanych z komunikacji w sieci Internet jest nieefektywne i negatywnie wpływa na działanie systemu IoT, w tym na czas jego niezawodnego działania.

Zaproponowane i badane przeze mnie rozwiązania dotyczące projektowania efektywnych metod komunikacji, optymalizacji kosztów energetycznych działania węzłów i sieci, oraz lokalizowania węzłów podejmują te problemy i proponują efektywne rozwiązania dla sieci IoT. Przeprowadzone testy proponowanych rozwiązań wykazują, w większości przypadków, lepsze wyniki niż publikowane równolegle w literaturze.

Za najważniejsze osiągnięcia uważam:

- Opracowanie modeli kosztów energetycznych działania węzłów sieci WSN/IoT i pokazanie ich wpływu na zrozumienie ograniczeń i wymagań związanych z optymalizacją ich działania, zwiększeniem ich efektywności energetycznej i wydłużeniem czasu życia.

- [A11] **Maciej Nikodem**, Mariusz Słabicki, Tomasz Surmacz, Bartosz A. Wojciechowski, *Transmission power control based on packet reception rate*, 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), March 30th to April 2nd, 2014, Dubai, s. 1-4
- [A12] **Maciej Nikodem**, Bartosz A. Wojciechowski, *Upper bounds on network lifetime for clustered wireless sensor networks*, The Fourth IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, NTMS 2011, February 7 - 10, 2011, Paris, France, IEEE, s. 1-6
- Opracowanie efektywnych energetycznie (zapewniających zmniejszenie kosztów energetycznych działania) metod trasowania (routing) pakietów, doboru mocy transmisji oraz pokazanie istotności agregacji danych w rozległych sieciach WSN.

[A11] **Maciej Nikodem**, Mariusz Słabicki, Tomasz Surmacz, Bartosz A. Wojciechowski, *Transmission power control based on packet reception rate*, 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), March 30th to April 2nd, 2014, Dubai, s. 1-4
 - Przeprowadzenie oceny możliwości wykorzystania bezpołączeniowej komunikacji rozgłoszeniowej do budowy złożonego systemu IoT zapewniającego wysoką niezawodność działania i dającego gwarancję poprawnego dostarczenia danych aplikacji. Pokazanie możliwości wykorzystania w różnych zastosowaniach.

[A5] **Maciej Nikodem**, Marek Bawiec, *Experimental Evaluation of Advertisement-Based Bluetooth Low Energy Communication*, Sensors 2020, 20, 107

[A6] Olgierd Unold, **Maciej Nikodem**, Marek Piasecki, Kamil A. Szyc, Henryk Maciejewski, Marek Bawiec, Paweł Dobrowolski, Michał Zdunek, *IoT-based cow health monitoring system*, 20th International Conference Computational Science - ICCS 2020, Amsterdam, the Netherlands, June 3-5, 2020, s. 344-356

[A7] **Maciej Nikodem**, Mariusz Słabicki, Tomasz Surmacz, Paweł Mrówka, Cezary Dołęga, *Multi-camera vehicle tracking using edge computing and low-power communication*, Sensors, 2020, vol. 20, nr 11, art. 3334, s. 1-16

[A8] **Maciej Nikodem**, Tomasz Surmacz, Mariusz Słabicki, Dominik Hofman, Piotr Klimkowski, Cezary Dołęga, *Robust radio communication protocol for traffic analysis application*, Theory and Applications of Dependable Computer Systems : proceedings of the Fifteenth International Conference on Dependability of Computer Systems DepCoS-RELCOMEX, June 29 - July 3, 2020
 - Opracowanie metody wykorzystania standardowych wiadomości protokołu BLE do zmniejszenia liczby komunikacji niezbędnej do skutecznego przekazania informacji, poprawy efektywności energetycznej systemu (wydłużenie czasu działania na baterii), przy zachowaniu wysokiej skuteczności transmisji danych użytkownika.

[A4] **Maciej Nikodem**, Mariusz Słabicki, Marek Bawiec, *Efficient Communication Scheme for Bluetooth Low Energy in Large Scale Applications*, Sensors 2020, 20, 6371
 - Opracowanie symulatorów wykorzystujących zaproponowane modele kosztów energetycznych, zegarów i działania węzłów w środowisku MATLAB oraz dedykowanego symulatora lokalizacji ToF/TDoA.

[A9] Tomasz Jankowski, **Maciej Nikodem**, *SMILe - simulator for methods of indoor localization*, 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 24-27 September 2018, Nantes, France. [Danvers, MA] : IEEE, cop. 2018. s. 1-7

[A12] **Maciej Nikodem**, Bartosz A. Wojciechowski, *Upper bounds on network lifetime for clustered wireless sensor networks*, The Fourth IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, NTMS 2011, February 7 - 10, 2011, Paris, France, IEEE, s. 1-6
 - Opracowanie metod określania położenia bazujących na pomiarach czasu przelotu oraz mocy sygnału radiowego w wielu kanałach.

[A3] **Maciej Nikodem**, Przemysław Szeliński, *Channel Diversity for Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy and Extended Advertisements*, IEEE Access, vol. 9, pp. 169261-169269, 2021

[A10] Tomasz Jankowski, **Maciej Nikodem**, *Synchronization-free TDoA localization method for large scale wireless networks*, Eighth International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, September 18-21, 2017, Sapporo, Japan, 2017. s. 1-6

- Opracowanie systemu lokalizacji dla dużych sieci IoT działających na dużym obszarze przy wykorzystaniu ograniczonej infrastruktury i komunikacji BLE.

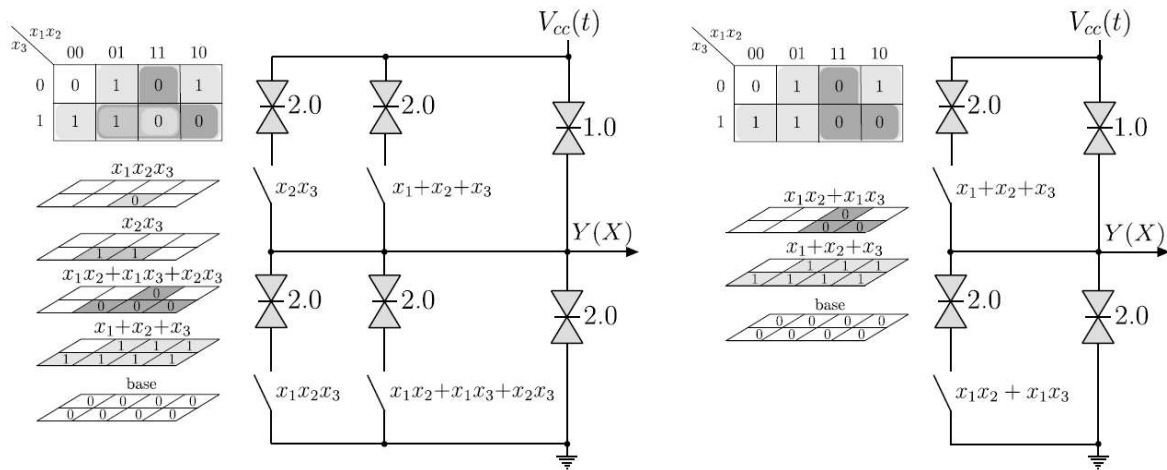
[A1] Kamil Szyc, **Maciej Nikodem**, Michał Zdunek, *Bluetooth low energy indoor localization for large industrial areas and limited infrastructure*, Ad Hoc Networks, Elsevier 2023, 20, 6371

[A2] **Maciej Nikodem**, *Bluetooth Low Energy livestock positioning for smart farming applications*, 21st International Conference Computational Science - ICCS 2021, Krakow, Poland, June 16-18, 2021, s. 55-67

Rezultaty zrealizowanych prac badawczych zostały opublikowane w otwartej literaturze, są dostępne publicznie, a stworzone rozwiązania (np. symulator SMILE) i zgromadzone wyniki pomiarów zostały udostępnione w Internecie, na zasadach otwartych licencji. Dzięki temu inni naukowcy mają lepsze możliwości wykorzystania efektów naszych prac, mogą powtórzyć eksperymenty i doświadczenia, jak i testować nowe rozwiązania na naszych danych pomiarowych.

Potwierdzeniem istotności zrealizowanych prac jest również fakt wykorzystania niektórych z nich w pierwszych wersjach standardu DASH-7 oraz w rzeczywistych systemach IoT tworzonych dla otoczenia biznesowego. W trzech przypadkach zaproponowane rozwiązania stały się elementem prototypowych i komercyjnych rozwiązań oferowanych przez przedsiębiorstwa, z którymi współpracowałem. System UGPS wykorzystujący układy UWB i lokalizację ToF/TDoA [A10] został przetestowany w realnych warunkach, potwierdzając możliwość lokalizacji urządzeń w trudnych warunkach z dokładnością poniżej 3 m. Ze względu na zmianę profilu działalności firmy MT-Silesia Sp. z o.o., nie został jednak wdrożony do komercyjnych zastosowań. Dedykowany protokół komunikacyjny dla kamer systemu wizyjnego monitorowania ruchu pojazdów w obrębie skrzyżowania [A7, A8] został przetestowany w warunkach rzeczywistych. Choć jako całość nie został wdrożony to jego elementy są wykorzystywane w produktach oferowanych przez firmę Neurosoft Sp. z o.o., m.in. w systemie VTRACK. Za największe swoje osiągnięcie aplikacyjne uważam opracowanie systemu monitorowania zwierząt hodowlanych CowMonitor dla firmy Corp For Fam Animals i 7M AMDG Sp. z o.o. [A1, A5, A6]. Jest to rozwiązanie, które nie dość, że realnie przyczynia się do poprawy dobrostanu zwierząt, to jeszcze przynosi korzyści hodowcom, którzy z niego korzystają – zwiększa produkcję mleka, poprawia skuteczność inseminacji, a dzięki lokalizacji pozwala łatwiej odszukać konkretne zwierze na terenie hodowli.

Doświadczenie, które zdobyłem w czasie kariery naukowej i realizacji projektów badawczo-rozwojowych pozwoliły również na uniknięcie błędów przy tworzeniu rozwiązań lokalizacyjnych. Przykładem jest próba wykorzystania pomiaru kąta nadejścia sygnału radiowego do lokalizacji i śledzenia ruchu rąk operatora w czasie czynności ręcznego montażu na hali produkcyjnej, który był realizowany wspólnie z firmą UNITEM Sp. z o.o. Przeprowadzone przeze mnie badania pozwoliły zauważyć, że wykorzystanie BLE do takiego rozwiązania jest niepraktyczne ze względu na opóźnienia wyznaczania położenia i szybkość pracy (ruchu rąk) pracowników. Dzięki wykryciu ograniczeń planowanego rozwiązania firma redefiniowała swoje założenia i opracowała system lokalizacji na dużym obszarze przeznaczony głównie do monitorowania położenia zasobów, np. w halach magazynowych. Moje doświadczenie i przeprowadzone badania pozwoliły zaoszczędzić czas i pieniądze, oraz opracować rozwiązanie, które jest obecnie na etapie komercjalizacji.



Rysunek 12: Przykład dwóch sposobów realizacji tej samej funkcji logicznej ($Y = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_2x_3$) w bramce GTG o różnej liczbie gałęzi i złożoności funkcji załączających. Rysunek zaczerpnięty z pracy [B4].

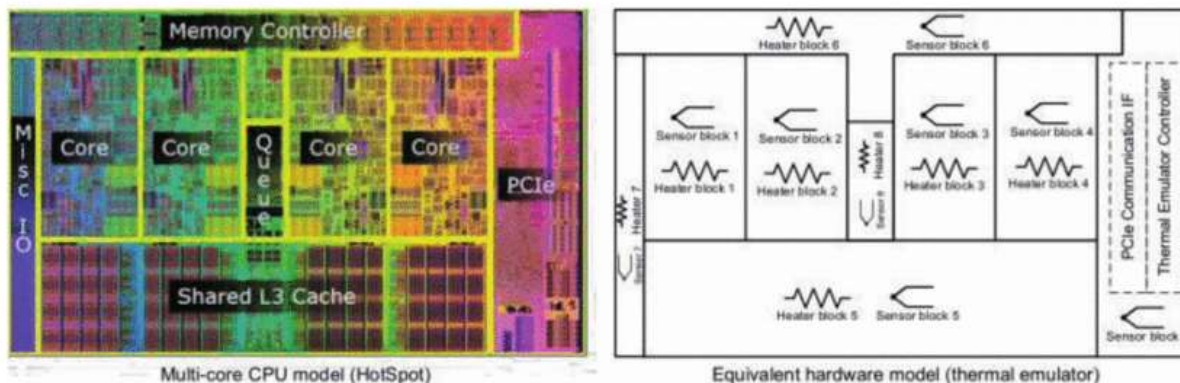
4.3 Inne osiągnięcia naukowe

Inne osiągnięcia naukowe wynikają z prac, które prowadziłem wspólnie z Zespołem Architektury Komputerów.

Synteza układów cyfrowych wykorzystujących elementy o ujemnej rezystancji dynamicznej

Jednym z obszarów prac było wykorzystanie elementów o ujemnej rezystancji dynamicznej do budowy bramek logicznych. W ramach prowadzonych prac zaproponowaliśmy poprawiony model uogólnionej bramki progowej (ang. *Generalised Threshold Gate – GTG*) i algorytm syntezy dla tej bramki. W pracy formalnie pokazaliśmy, że w strukturze GTG złożonej z $n + 2$ gałęzi (i układów o ujemnej rezystancji) można zrealizować dowolną funkcję logiczną n zmiennych [B5]. W kolejnych pracach zaobserwowaliśmy, że zaproponowany algorytm syntezy w niektórych przypadkach generuje bramki GTG o większej liczbie gałęzi niż $n + 2$, oraz że niektóre funkcje mogą być zrealizowane na kilka sposobów przy zachowaniu tej samej liczby gałęzi $\leq n + 2$ (Rysunek 12). W tym drugim przypadku różnica w realizacji bramki polegała na złożoności układów załączających gałęzie bramki. Prostsze układy oznaczają konieczność wykorzystania mniejszej liczby tranzystorów, a w konsekwencji prostszy i mniejszy układ [B4]. Problemy te rozwiązaliśmy opracowując nowy algorytm syntezy [B3], który gwarantuje $\leq n + 2$ gałęzi w bramce GTG, wykorzystuje sumę iloczynów jako reprezentację wejściowej funkcji logicznej i ma mniejszą złożoność obliczeniową, która jest liniowo zależna od liczby zmiennych. Uzyskane wyniki rozszerzyliśmy następnie na wieloprogowe braki progowe (ang. *Multi Threshold Gate – MTTG*) które można potraktować jako bardziej ogólny przykład bramki progowej – składają się nie tylko z wielu gałęzi, ale też wielu poziomów i elementów o ujemnej rezystancji dynamicznej o różnych parametrach. W pracach [B1,B2] zaproponowaliśmy algorytm syntezy dla bramek MTTG.

<p>B1 Maciej Nikodem, <i>Synthesis of multithreshold threshold gates based on negative differential resistance devices</i>, IET Circuits, Devices & Systems. 2013, vol. 7, nr 5, s. 232-242 https://doi.org/10.1049/iet-cds.2012.0368</p>	<p>Cytowania:</p> <table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>WoS</th> <th>Scopus</th> <th>GS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table>	WoS	Scopus	GS	1	4	6
WoS	Scopus	GS					
1	4	6					
<p>B2 Maciej Nikodem, Marek Bawiec, Janusz Biernat <i>Synthesis of generalised threshold gates and multi threshold threshold gates</i>, International Journal of Electronics and Telecommunications. 2012, vol. 58, nr 1, s. 49-54 https://doi.org/10.2478/v10177-012-0007-5</p>	<p>Cytowania:</p> <table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>WoS</th> <th>Scopus</th> <th>GS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	WoS	Scopus	GS	2	2	0
WoS	Scopus	GS					
2	2	0					
<p>B3 Marek Bawiec, Maciej Nikodem, <i>Generalised threshold gate synthesis based on AND/OR/NOT representation of boolean function</i>, 15th Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC 2010 : proceedings, Taipei, Taiwan, January 18-21, 2010. [Piscataway, NJ] : IEEE, cop. 2010. s. 861-866 https://doi.org/10.1109/ASPDAC.2010.5419683</p>	<p>Cytowania:</p> <table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>WoS</th> <th>Scopus</th> <th>GS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>	WoS	Scopus	GS	1	5	5
WoS	Scopus	GS					
1	5	5					



Rysunek 13: Rysunek przedstawiający ideę modelowania termicznego złożonych układów sprzętowych, w którym funkcjonalne bloki układu są modelowane za pomocą grzałek i czujników temperatury. Rysunek zaczerpnięty z pracy [C4].

- B4 **Maciej Nikodem**, Marek Bawiec, Tomasz Surmacz, *Negative difference resistance and its application to construct boolean logic circuits*, Computer networks : 17th conference, CN 2010, Ustroń, Poland, June 15-19, 2010 : proceedings / Andrzej Kwiecień, Piotr Gaj, Piotr Stera (eds.). Berlin ; Heidelberg : Springer, cop. 2010. s. 39-48
https://doi.org/10.1007/978-3-642-13861-4_4
- | | | |
|------------|--------|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Scopus | GS |
| 3 | 3 | 4 |
- B5 Marek Bawiec, **Maciej Nikodem**, *Boolean logic function synthesis for generalised threshold gate circuits*, 46th Design Automation Conference, DAC '09 : 1964-2009, San Francisco, July 26-31, 2009. New York, NY : ACM, cop. 2009. s. 83-86
<https://doi.org/10.1145/1629911.1629935>
- | | | |
|------------|--------|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Scopus | GS |
| 4 | 9 | 10 |

Wykorzystanie układów rekonfigurowalnych do symulacji oraz modelowania układów cyfrowych

Innym osiągnięciem było wykorzystanie rekonfigurowalnych układów FPGA (ang. *Field Programmable Gate Array*) do symulacji działania układów sprzętowych oraz modelowania ich zachowania termicznego.

W czasie stażu w firmie Nokia Siemens Networks wykorzystałem układy FPGA i opracowałem system sprzętowego wspierania symulacji numerycznych, które były wcześniej w całości realizowane programowo. W stworzonym rozwiązaniu do układu rekonfigurowalnego przenieśliśmy fragment symulacji programowych. Całość została przygotowana w ten sposób, że symulacja programowa i sprzętowa stanowiła jedną całość i była realizowana w sposób całkowicie transparentny dla użytkownika [C5]. Sprzętowe wsparcie symulacji pozwoliło na skrócenie czasu jej przeprowadzania, co jest istotne ze względu na bardzo dużą liczbę testów, prowadzonych na etapie projektowania nowych radiomodułów dla stacji bazowych telefonii komórkowej.

Układy rekonfigurowalne wykorzystaliśmy również do modelowania zachowań termicznych układów cyfrowych. Oryginalny pomysł wykorzystania oscylatorów pierścieniowych (ang. *ring oscillator*) do lokalnego podgrzewania i mierzenia temperatury układu cyfrowego wziął się z chęci realizacji w układzie FPGA podprogowego kanału komunikacji. Praca [C6] pokazała, że możliwa jest realizacja takiej komunikacji zarówno wewnątrz układu, jak i na zewnątrz, a oscylatory pierścieniowe pozwalają budować grzałki o różnej mocy. W jej ramach powstał pierwszy prototyp narzędzia, które pozwalało definiować rozmiar i położenie oscylatorów pełniących funkcję grzałki oraz czujników temperatury.

Prace te kontynuowaliśmy w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, którego celem było wykorzystanie układu FPGA do symulacji zachowań termicznych złożonych układów cyfrowych. Idea, która nam przyświecała, polegała na zastąpieniu numerycznych modeli rozchodzenia się ciepła strukturą grzałek zrealizowanych w rzeczywistym układzie, w którym rozchodzenie się ciepła przebiega w sposób naturalny i nie wymaga budowy złożonych i wolnych modeli numerycznych (Rysunek 13). Efektem projektu było narzędzie pozwalające na termiczne modelowanie elementów złożonych układów i symulację ich zachowania w różnych warunkach obciążenia.

- C1 Paweł Weber, Maciej Zagrabski, Przemysław Musz, Krzysztof M. Kępa, **Maciej Nikodem**, Bartosz A. Wojciechowski *Configurable heat generators for FPGAs*, THERMINIC 2014 : 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, September 24-26, 2014, Greenwich, London, UK. [B.m.] : IEEE, cop. 2014. s. 1-4
<https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2014.6972506>
- | | | |
|------------|-----|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Sco | GS |
| 0 | 4 | 8 |
- C2 Bartosz A. Wojciechowski, **Maciej Nikodem**, Paweł Weber, Maciej Zagrabski, Krzysztof M. Kępa *Hardware microprocessor thermal emulation using synthetic heat sources and temperature sensors in FPGA*, THERMINIC 2014 : 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, September 24-26, 2014, Greenwich, London, UK. [B.m.] : IEEE, cop. 2014. s. 1-5
<https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2014.6972481>
- | | | |
|------------|-----|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Sco | GS |
| 0 | 1 | 1 |
- C3 Paweł Weber, Maciej Zagrabski, Bartosz A. Wojciechowski, **Maciej Nikodem**, Krzysztof M. Kępa, Krzysztof Berezowski *Calibration of RO-based temperature sensors for a toolset for measuring thermal behavior of FPGA devices*, Microelectronics Journal. 2014, vol. 45, nr 12, s. 1753-1763
<https://doi.org/10.1016/j.mejo.2014.06.004>
- | | | |
|------------|-----|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Sco | GS |
| 5 | 10 | 11 |
- C4 Paweł Weber, Maciej Zagrabski, Bartosz A. Wojciechowski, Krzysztof Berezowski, **Maciej Nikodem**, Krzysztof M. Kępa *Toolset for measuring thermal behavior of FPGA devices*, Proceedings of 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC 2013), Berlin, September 25-27, 2013 / eds. Peter E. Raad [i in.]. Cottbus-Senftenberg : Brandenburg University of Technology ; [B.m.] : IEEE, cop. 2013. s. 48-53
<https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2014.6972481>
- | | | |
|------------|-----|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Sco | GS |
| 5 | 0 | 8 |
- C5 **Maciej Nikodem**, Krzysztof M. Kępa *Hardware accelerated simulation of crest factor reduction block for mobile telecommunications*, International Journal of Electronics and Telecommunications. 2012, vol. 58, nr 4, s. 363-368
<https://doi.org/10.2478/v10177-012-0050-2>
- | | | |
|------------|-----|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Sco | GS |
| 0 | 0 | 0 |
- C6 Taras Iakymchuk, **Maciej Nikodem**, Krzysztof M. Kępa, *Temperature-based covert channel in FPGA systems*, 6th International Workshop on Reconfigurable Communication-Centric Systems-on-Chip, ReCoSoC : proceedings, June 20-22, 2011, Montpellier, France / ed. by Leandro Soares Indrusiak [i in.]. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 2011. s. 1-7
<https://doi.org/10.1109/ReCoSoC.2011.5981510>
- | | | |
|------------|-----|----|
| Cytowania: | | |
| WoS | Sco | GS |
| 0 | 28 | 49 |

5 Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

W trakcie swojej dotychczasowej kariery współpracowałem z zespołami badawczymi pracującym w jednostkach naukowych w Polsce i za granicą.

Pracę magisterską na kierunku Automatyka i Robotyka (2005), realizowałem we współpracy z **Plataforma Solar de Almería (PSA)**, która jest największym europejskim centrum badawczym technologii pozyskiwania energii słonecznej. W ramach pracy opracowałem algorytm sterowania instalacją parabolicznych kolektorów słonecznych, w której energia elektryczna pozyskiwana jest pośrednio z oleju, ogrzewanego przez skupione promieniowanie słoneczne. Badania prowadziłem na podstawie numerycznych modeli instalacji, a finalny algorytm sterowania został zweryfikowany przez pracowników PSA na rzeczywistym obiekcie. Jednym z efektów współpracy jest praca konferencyjna opublikowana w 2005 roku [39].

W latach 2009-2014 współpracowałem z **dr. inż. Zenonem Chaczko z Univeristy of Technology Sydney (Sydney, Australia)** prowadząc wspólne prace nad algorytmami i protokołami organizacji rozległych bezprzewodowych sieci czujników i trasowania wiadomości w takich sieciach. W ramach prac zaproponowaliśmy formalny model funkcjonowania węzłów sieci bazujący na trzech podstawowych relacjach: podporządkowania, kolizji i tolerancji. Modelem tego używaliśmy do opisywania działania węzłów i budowania algorytmów organizujących ich funkcjonowanie w sieci. Efektem współpracy był szereg publikacji prezentowanych na konferencjach międzynarodowych [40, 41, 42, 43, 44] i czasopiśmie [45].

Od lutego 2011 do lipca 2012 roku realizowałem staż naukowy w **dziale badawczo-rozwojowym firmy Nokia Siemens Networks Sp. z o.o.** Zespół, z którym pracowałem, odpowiadał za weryfikację poprawności działania nowo projektowanych rozwiązań przeznaczonych dla stacji bazowych telefonii komórkowej. Jego główne zadanie polegało na opracowaniu programowych modeli przyszłych rozwiązań sprzętowych i wykorzystanie tych modeli do weryfikacji oraz doboru parametrów działania projektowanego sprzętu. Jednym z głównych zadań działu były symulacje działania układów dla różnych konfiguracji sygnałów telefonii komórkowej. Poważnym ograniczeniem symulacji był czas ich programowego działania, który powodował, że możliwości testowania różnych konfiguracji ustawień i sygnałów były ograniczone. Moim zadaniem było opracowanie metody połączenia symulacji programowych z symulacjami realizowanymi w układach rekonfigurowalnych tak, aby przyspieszyć najbardziej czasochłonne elementy symulacji. W ramach stażu zaprojektowałem sprzętowe odpowiedniki wybranych elementów symulacji, które były parametryzowane i uruchamiane w układach rekonfigurowalnych. Opracowałem również interfejsy komunikacyjne pozwalające na połączenie fragmentów symulacji programowej z elementami realizowanymi w układach sprzętowych, które wykorzystywały szybką komunikację Ethernet. Przykładowe rozwiązanie opracowane w ramach stażu realizowało sprzętową symulację bloku redukcji współczynnika szczytu (ang. *crest factor reduction*) przyspieszając symulacje jego działania o 70% [C5].

W latach 2012-2014 pracując nad wykorzystaniem układów rekonfigurowalnych do modelowania termicznego zachowania złożonych układów cyfrowych współpracowałem z **dr. inż. Krzysztofem Kępą z Virginia Tech (Blacksburg, Virginia, USA)**. W ramach tej współpracy opracowywaliśmy narzędzia pozwalające na modelowanie i obserwację termicznego zachowania się układów cyfrowych [C1, C2, C3, C4], które szerzej opisałem w rozdziale 4.3.

W latach 2014-2020 współpracowałem z **dr. inż. Mariuszem Ślabickim z Instytutu Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk (IITiS PAN)** prowadząc prace badawcze z zakresu technologii radiowych LoRa i BLE. W pierwszym okresie prace te głównie skupiały się na wykorzystaniu technologii LoRa i stosu protokołów LoRaWAN oraz projektowaniu wydajnych systemów IoT z ich wykorzystaniem. Efektem współpracy są m.in. publikacje prezentujące opracowane rozwiązania komunikacyjne przeznaczone dla systemu NeuroFlow [A7, A8] oraz mające na celu poprawienie efektywności komunikacji bezpołączeniowej wykorzystującej wiadomości rozgłoszeniowe w standardzie BLE [A4], które szerzej opisałem w rozdziale 4.1.5.

Współpraca z IITiS PAN zbiegła się w czasie z moim stażem w **dziale rozwojowym firmy Thaumatec Sp z o.o.** (2015-2017). W ramach współpracy uruchomiłem we Wrocławiu pierwszą publiczną sieć LoRaWAN i stworzyłem prototypowe rozwiązania, które ją wykorzystywały: system lokalizacji bazujący na pomiarach mocy sygnału RSSI i stosunku sygnału do szumu (ang. *Signall to Noise Ratio – SNR*), urządzenie do monitorowania trasy lotu balonu stratosferycznego², zapełnienia kublów na śmieci, czy komercyjnie oferowaną samowystarczającą energetycznie stację bazową sieci LoRaWAN³. Jedną z naszych stacji bazowych przyczyniła się do pobicia, w 2017 roku, światowego zasięgu komunikacji LoRaWAN przekraczając odległość 702 km przy mocy nadawania 25 mW⁴

W 2021 roku nawiązałem współpracę z zespołem **profesora Francisco Alexis Quesada Arencibia z Uniwersytetu w Las Palmas de Gran Canaria (Hiszpania)**. Współpraca początkowo dotyczyła głównie monitorowania aktywności i kontaktów międzyludzkich w związku z pandemią COVID-19, w tym wykorzystania technologii BLE dostępnej w telefonach komórkowych do szacowania dystansu społecznego. Z mojej inicjatywy w październiku 2021 roku przedstawiciele zespołu z Hiszpanii odbyli tygodniową wizytę roboczą na Politechnice Wrocławskiej. Od 2022 roku główny obszar współpracy dotyczył lokalizacji wewnątrzbudynkowej z wykorzystaniem technologii BLE. W połowie 2023 roku zostałem zaproszony przez zespół prof. Arencibia do komitetu programowego (ang. *Technical Program Committee – TPC*) międzynarodowej konferencji EUROCAST 2024, której organizatorem jest Uniwersytet w Las Palmas. Na konferencji pełniłem też funkcję prowadzącego wybranych sesji (ang. *chairman*). Udział w konferencji pozwolił zintensyfikować naszą współpracę. Efektem spotkania z początku 2024 roku było rozpoczęcie wspólnych prac nad eksperymentalną weryfikacją lokalizacji wykorzystującej komunikację BLE i pomiar przesunięcia fazowego sy-

²First stratosferic mission of PWr LoRa tracker

³Mobile LoRa Gateway

⁴Ground breaking world record!

gnału nadawanego na wielu częstotliwościach radiowych (ang. *Multi Carrier Phase Difference – MCPD*). Korzystając z okresu wakacyjnego (sierpień-wrzesień 2024) zintensyfikowaliśmy współpracę kończąc prace nad publikacją podsumowującą wyniki prowadzonych badań. W okresie tym odbyłem również krótką wizytę na na Uniwersytecie w Las Palmas realizując wstępne badania z wykorzystaniem platformy robotycznej opracowanej przez tamtejszych naukowców.

6 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

Prowadzone zajęcia dydaktyczne

W trakcie swojej pracy na Politechnice Wrocławskiej prowadziłem zajęcia z czterech głównych obszarów tematycznych:

- Architektura i arytmetyki komputerów – prowadziłem ćwiczenia dla studentów studiów inżynierskich na kierunku Informatyka.
- Kodowanie i Szyfrowanie Danych – wykład i projekt dla studentów studiów magisterskich na kierunku Inżynieria Internetowa (kierunek obecnie nieuruchamiany)
- Bazy danych – wykład, laboratorium i projekt dla studentów studiów inżynierskich kierunków Cyberbezpieczeństwo, Informatyka techniczna oraz na Automatyka i Robotyka.
- IoT i systemy autonomiczne – wykład i laboratorium dla studentów.

Jestem autorem dwóch i współautorem jednego kursu:

- *Advanced database* to kurs opracowany w 2012 roku i realizowany na studiach magisterskich na kierunku Informatyka prowadzonym w języku angielskim. Kurs prowadzony obecnie w wymiarze 45 godzin składa się z wykładu (15 h) oraz laboratorium (30 h). Do kursu opracowałem dedykowany podręcznik. W ramach zajęć studenci poznają zaawansowane zagadnienia relacyjnych i nierelacyjnych baz danych.
- *IoT i systemy autonomiczne* to kurs opracowany w 2019 roku i realizowany na studiach magisterskich na kierunku Informatyka w języku polskim. Kurs jest prowadzony w wymiarze 30 godzin i składa się z wykładu (15 h) oraz laboratorium (15 h). W ramach laboratorium studenci uruchamiają prosty system IoT monitorujący wybrane parametry środowiskowe i wykorzystujący do komunikacji technologię BLE lub LoRa.
- Jestem również współautorem kursu *Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa i poufności danych* prowadzonego dla studentów pierwszego semestru kierunku Informatyka na studiach magisterskich. W jego ramach prowadzę część wykładów poświęconych algorytmom i protokołom kryptograficznym, oraz seminarium.

Oprócz zajęć prowadzonych na macierzystym Wydziale Informatyki i Telekomunikacji (dawniej Elektroniki) prowadziłem również wykłady na Wydziale Mechanicznym (*Podstawy Informatyki*), Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów (*Bazy danych*), oraz współprowadziłem wykład na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki (*Techniki mikroprocesorowe 1*).

Promotorstwa

W latach 2009-2024 byłem promotorem 34 prac inżynierskich i 53 magisterskich, w tym 16 prac magisterskich realizowanych w języku angielskim. Znaczna część prac była bezpośrednio związana z moimi zainteresowaniami naukowymi i dotyczyła wykorzystania technologii radiowych LoRa i BLE w zastosowaniach do lokalizacji, nawigacji czy synchronizacji czasu. Prace inżynierskie miały bardzo istotny aspekt praktyczny, np. dotyczyły opracowania systemu monitorowania ćwiczeń ze sztangą czy wykrywania pojazdów na podstawie pomiaru zakłóceń sygnału radiowego.

W roku 2021 praca, której byłem promotorem, została wyróżniona nagrodą główną w XIV Edycji Konkursu na najlepszą magisterską pracę dyplomową obronioną na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, w ramach konkursu TT-CS Hi-Tech 2020/2021 organizowanego przez firmę Transition Technologies i Wydział Elektroniki. Ta sama praca została również zakwalifikowana do ogólnopolskiego finału Konkursu o nagrodę ABB w edycji 2020/2021.

W latach 2021-2024 byłem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim mgr. inż. Wojciecha Dobrowolskiego. Doktorat pt. *Zastosowanie metod uczenia maszynowego działających w czasie rzeczywistym do diagnostyki i lokalizacji błędów w stacjach przekaźnikowych (BTS)* był realizowany w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy. Praca doktorska została złożona we wrześniu 2024 roku.

Szkoły letnie

W 2017 roku organizowałem i współprowadziłem wakacyjny kurs w ramach szkoły letniej programu "3E+: Energy, Environment, Electronics", zatytułowany *Python "Hello World" to Django Website for Internet of Things application*. Celem 60-godzinnego kursu było przekazanie słuchaczom wiedzy teoretycznej i praktycznych umiejętności z zakresu tworzenia aplikacji przeglądarkowych z wykorzystaniem języka Python.

Projekty dydaktyczne

Brałem udział w dwóch międzynarodowych i jednym krajowym projekcie dydaktycznym:

- W latach 2011-2014 brałem udział w projekcie *Baltic Academic IT Security Exchange (BAITSE)* mającym na celu wymianę doświadczenia i określenie wspólnych kierunków kształcenia studentów w zakresie bezpieczeństwa systemów i sieci komputerowych. Koordynatorem projektu była Blekinge Institute of Technology (BTH) z Karlskrony w Szwecji a udział w nim brały uczelnie ze Szwecji, Polski, Litwy, Łotwy i Ukrainy.
- W latach 2014-2017 brałem udział w projekcie *Educating the Next generation experts in Cyber Security: the new EU-recognized Master's program (ENGENSEC)* realizowanym w ramach programu Tempus (FP7), którego celem było opracowanie materiałów do zajęć, które pozwolą kształcić przyszłych specjalistów bezpieczeństwa. Konsorcjum złożone z 21 uczelni partnerskich ze Szwecji, Polski, Niemiec, Grecji, Litwy, Ukrainy i Rosji.
- W latach 2019 – 2023 brałem udział w projekcie *Centrum Mistrzostwa Informatycznego* (Program Operacyjny Cyfrowa Polska) w ramach którego prowadziłem wykłady i laboratoria dla nauczycieli ze szkół podstawowych i ponadpodstawowych, prowadzących kółka informatyczne. Zakres tematyczny prowadzonych przeze mnie zajęć obejmował zagadnienia dotyczące kryptografii, systemów robotycznych i algorytmiki.

Popularyzacja nauki

W 2010 roku wziąłem udział w Dolnośląskim Festiwalu Nauki, przygotowując i przeprowadzając wykład dla uczniów szkół ponadpodstawowych z zakresu kryptografii i bezpieczeństwa.



Rysunek 14: Zdjęcia z Konferencji Projektów Zespołowych 2024, która odbyła się 1 lipca 2024 roku w Gmachu Głównym Politechniki Wrocławskiej.

W latach 2009 i 2010 wziąłem udział w dwóch wizytach studyjnych u prof. Jerzego Rozenblita na University of Arizona (Tucson, USA), w czasie których miałem okazję zobaczyć m.in. prezentacje *capstone projects* studentów tamtejszego College of Engineering. Wydarzenie odbywało się na terenie hali sportowej, uczestniczyło w nim około 300 osób, które prezentowały efekty prac zrealizowanych w ramach ostatniego roku studiów. W 2011 roku zorganizowałem po raz pierwszy podobne prezentacje dla kilku grup studenckich. Od 2013 roku organizuję coroczne projekty

Tabela 4: Zestawienie projektów zgłoszonych przez przedsiębiorstwa do realizacji w ramach kursu "Projekt zespołowy" oraz prezentowanych na corocznej Konferencji Projektów Zespołowych

Rok	Projekty zespołowe			Projektów prezentowanych na Konferencji
	zgłoszonych tematów	zgłaszających firm	zrealizowanych projektów	
2014	26	10	13	19
2015	48	17	18	20
2016	56	13	30	22
2017	71	23	33	26
2018	96	18	60	20
2019	57	15	50	0
2020	86	29	61	26
2021	88	40	52	32
2022	81	33	50	22
2023	80	28	76	23
2024	76	30	72	21
Razem	765	256	515	231

studenckie, które są realizowane we współpracy z otoczeniem biznesowym uczelni. *Projekty zespołowe* to obowiązkowy kurs w siatce większości studentów studiów inżynierskich Wydziału Informatyki i Telekomunikacji oraz niektórych studentów Wydziału Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów – co roku projekty realizuje niemal 1000 studentów obu wydziałów. Co roku gromadzę dla studentów propozycje około 80 tematów projektów zgłaszanych przez kilkadziesiąt przedsiębiorstw, fundacji i organizacji pożytku publicznego (Tabela 4). Projekty te są realizowane przez studentów w bliskiej współpracy z ich pomysłodawcami z przedsiębiorstw oraz pracownikami Politechniki Wrocławskiej. Dzięki temu studenci nie tylko poszerzają swoje kompetencje praktyczne, ale mają również możliwość rozwijania swoich umiejętności miękkich, obserwując sposób pracy w przedsiębiorstwach i współpracując w większych zespołach. Najlepsze projekty są prezentowane na corocznej Konferencji Projektów Zespołowych (Rysunek 14), wydarzeniu, które jest organizowane dzięki funduszom pozyskanym od sponsorów. Dla wielu studentów projekty są pierwszą okazją do bezpośredniego kontaktu z przedsiębiorstwami. Około 30% projektów jest kontynuowanych w ramach wakacyjnych praktyk studenckich, a kilka procent przeradza się w indywidualne prace inżynierskie. W portfolio dotychczasowych projektów jest wiele takich, które znajdują swoje praktyczne zastosowanie, są kontynuowane w działalności biznesowej studentów i przedsiębiorstw, albo stają się instalacjami artystycznymi, jak np. "Kwartet na pomidory", opracowany w 2015 roku, prezentowany na Biennale Sztuki WRO w 2015 oraz w Instytucie Goethego w 2016.

7 Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

7.1 Szkolenia i staże

Pod koniec 2012 roku zakwalifikowałem się i wziąłem udział w programie stażowo-szkoleniowym *Top 500 Innovators - Science, Management, Commercialization* finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Szkolenie odbywałem na Stanford University w USA w Stanford Center for Professional Development realizując 120 godzin zajęć z zakresu innowacji, przedsiębiorczości, ochrony własności intelektualnej o prowadzenia zespołów. W ramach szkolenia odbyłem 120 godziny wizyt studyjnych w firmach Doliny Krzemowej oraz zrealizowałem dwutygodniowy staż w dziale rozwojowym firmy CISCO Systems. W czasie stażu pracowałem nad nowym rozwiązaniem lokalizacyjnym pozwalającym na określenie położenia użytkowników telefonów komórkowych na podstawie monitorowania komunikacji WiFi i pomiaru siły sygnału sieci WiFi. Udział w programie Top 500 i staż w firmie CISCO spowodował, że swoją działalność na uczelni ukierunkowałem w stronę współpracy nauki i biznesu zarówno w obszarze naukowym (m.in. poprzez realizację wspólnych projektów z przedsiębiorstwami) jak i dydaktycznym i organizacyjnym (angażowanie przedsiębiorstw w działalność dydaktyczną uczelni).

Trzykrotnie zakwalifikowałem się do programów stażowych organizowanych przez Wrocławskie Centrum Akademickie. Celem stażu realizowanego w ramach programu Zielony Transfer było wdrożenie nowych technologii

zgodnych z Dolnośląską Strategią Innowacji. W ramach tego programu zrealizowałem ponad roczny (lata 2011-2012) staż w dziale badawczym firmy Nokia Siemens Networks Sp. z o.o. opracowując sprzętową akcelerację symulacji wybranych elementów toru radiowej stacji bazowych telefonii komórkowej [C5]. Dwa kolejne staże zrealizowałem w ramach programu Mozart którego celem było nawiązywanie współpracy naukowców z przedsiębiorstwami i wspieranie wrocławskiego rynku pracy poprzez umożliwienie firmom współpracy z naukowcami, podniesienia ich kompetencji i konkurencyjności na rynku. W ramach tego programu zrealizowałem projekty z obszaru lokalizacji wewnątrzbudynkowej i systemów IoT w firmach MT-Silesia Sp. z o.o. (lata 2013-2014) oraz Thaumatec Sp. z o.o. (lata 2015-2017)

7.2 Udział w projektach B+R

W czasie swojej kariery byłem zaangażowany w szereg projektów finansowanych w ramach konkursów organizowanych przez instytucje rządowe (Narodowe Centrum Nauki, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju) i samorządowe (Wrocławskie Centrum Akademickie – WCA). Realizowałem również zlecenia dla przemysłu dla firm polskich (ControlTech Sp. z o.o., Ringo Solutions) oraz zagranicznych (PRIVA BV). Tabela zawiera informacje o 13 projektach, przedstawionych w kolejności chronologicznej. W 4 projektach pełniłem funkcję kierownika realizowanych prac, w 7 byłem głównym wykonawcą, w przypadku jednego pełniłem rolę koordynatora prac zleczanych z przemysłu i realizowanych na Uczelni.

Tytuł projektu	Beneficjent	Źródło finans.	Budżet	Okres prac	Rola w projekcie
U-Pick - bazujący na technologiach lokalizacji radiowej i wizyjnej system wsparcia pracowników realizujących procesy manualnego montażu, w których poprawność wykonania ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa użytkownika POIR.01.01.01-00-1046/21	UNITEM Sp. z o.o.	NCBiR	8 971 816	11.2021 12.2023	Kierownik B+R
Inteligentny autonomiczny rozproszony system rozpoznawania i analizy ruchu – NeuroFlow, POIR 01.01.01-00-1143/17	Neurosoft Sp. z o.o.	NCBiR	240 000	09.2018 12.2019	Kierownik prac po stronie Uczelni, Główny wykonawca
System monitorowania funkcji życiowych dla bydła, POIR.02.03.02-02-0009/17	Michał Zdunek Corp For Farm Animals	PARP	492 000	08.2017 11.2018	Główny wykonawca
Wykonanie dokumentacji budowy i wdrożenia systemu zarządzania procesami produkcji - Ekspert2 KGHM-HC-U-0008-2017	KGHM S.A., ControlTech Sp. z o.o.	KGHM	60 000	03.2017 12.2017	Kierownik Projektu
Metody lokalizacji dla systemów radiowych sub-1GHz, w zastosowaniach bezprzewodowych sieci czujników oraz systemach IoT	Thaumatec Sp. z o.o.	WCA	57 600	10.2015 03.2017	Główny wykonawca
Sprawdzenie możliwości wykorzystania technologii UWB do pomiaru odległości i czasu ćwiczeń sportowców	Ringo Solutions	Ringo Solutions	1 900	08.2016 09.2016	Główny wykonawca
Narzędzia wspomagające projektowanie systemów lokalizacji osób i sprzętu w obiektach zamkniętych przy użyciu komunikacji bezprzewodowej małej mocy.	Politechnika Wrocławska	FNP	100 000	03.2015 12.2015	Kierownik projektu, Główny wykonawca
Sieć o zaawansowanej inteligencji zwiększająca efektywność oraz bezpieczeństwo kopalni podziemnych i głębinowych	MT-Silesia Sp. z o.o.	WCA	38 400	10.2013 09.2014	Główny wykonawca

Model i symulacja zachowania termicznego procesorów wielordzeniowych z wykorzystaniem układów FPGA 2011/03/B/ST6/00343	Politechnika Wrocławska	NCN	362 360	08.2012 12.2014	Wykonawca
Software and hardware development projects in support of PRIVA B.V. building blocks concept	PRIVA BV	PRIVA	90 000	06.2012 12.2013	Koordynator prac po stronie Uczelni
Bezprzewodowe sieci czujników w zastosowaniach monitorowania środowiska i alarmowania o zagrożeniach, zapewniające długi czas działania i dużą niezawodność, N N516 483740, 4837/B/T02/2011/40	Politechnika Wrocławska	NCN	264 460	05.2011 12.2013	Główny wykonawca
Opracowanie metody zmniejszenia energochłonności wbudowanych systemów radiowych poprzez optymalizację algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów	Nokia Siemens Networks Sp. z o.o.	WCA	84 000	02.2011 07.2012	Główny wykonawca
Czujniki i sensory do pomiarów czynników stanowiących zagrożenia w środowisku - modelowanie i monitoring zagrożeń, POIG.01.03.01-02-002/08-06	Politechnika Wrocławska	MNiSW	27 479 609	01.2008 12.2011	Wykonawca

7.3 Działalność organizacyjna

Moje zaangażowanie organizacyjne obejmuje:

- od 2013 – koordynator i główny organizator corocznych projektów zespołowych realizowanych we współpracy z przemysłem, oraz corocznej Konferencji Projektów Zespołowych,
- w latach 2016-2020 – członkostwo z wyboru w Radzie Wydziału Elektroniki,
- w latach 2020-2024 – członkostwo z wyboru w Radzie Wydziału Informatyki i Telekomunikacji,
- od czerwca 2021 – członkostwo w zespole monitorującym wdrożenie Europejskiej strategii dla naukowców na Politechnice Wrocławskiej, w zespole zajmującym się kodeksem postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych w Politechnice Wrocławskiej,
- od marca 2023 roku – koordynator wydziałowy Ogólnopolskiego, Międzyuczelnianego Konkursu Młodych Mistrzów organizowanego przez Radę Programową Forum Teleinformatyki,
- w roku 2024 – przedstawiciel z wyboru pracowników Wydziału Informatyki i Telekomunikacji w kolegium elektorskim i przedstawiciel Wydziału na zebranie wyborcze do Senatu Politechniki Wrocławskiej,
- od września 2024 – członek z wyboru Rady Wydziału Informatyki i Telekomunikacji w kadencji 2024-2028

7.4 Działalność ekspercka

W czasie swojej kariery brałem udział w przygotowaniu dwóch opracowań dla podmiotów zewnętrznych.

Rok	Opracowanie
2009	Opracowanie "Ekspertyzy zawierającej analizę w zakresie aspektów bezpieczeństwa mikroprocesorowych dokumentów tożsamości" przygotowywaną na zlecenie Polskiego Towarzystwa Informatycznego, dla Centrum Projektów Informatycznych Ministerstwa Spraw Wewnętrznych
2015	Opracowanie "Emerging topics and technology roadmap for Information and Communication Technologies for Water Management" przygotowanie dla Komisji Europejskiej na zlecenie klastra ICT4Water,

Od roku 2014 jestem **ekspertem Komisji Europejskiej**. W tym czasie brałem udział w recenzjach wniosków projektowych i ocenie realizowanych projektów finansowanych w ramach 7 Programu Ramowego, Horyzontu 2020 i Horyzontu Europa. Na rzecz Komisji Europejskiej zrealizowałem łącznie 23 zadania (6 ocen w konkursach, 17 ocen realizacji projektów). Jako **recenzent Narodowego Centrum Badań i Rozwoju** w latach 2015-2021 byłem zaangażowany w recenzje wniosków projektowych (7 wniosków) oraz ocenę realizacji projektów (1 projekt) m.in. w ramach programu Szybka Ścieżka.

Od 2023 roku jestem **koordynatorem uczelnianym Ogólnopolskiego Międzyuczelnianego Konkursu Młodych Mistrzów** organizowanego co roku przez Radę Programową Forum Teleinformatyki. Konkurs jest przeznaczony dla studentów studiów I, II i III stopnia prezentujących własne koncepcje informatyczne, programy lub praktyczne zastosowania w przemyśle informatycznym. Zadaniem koordynatorów jest wsparcie organizacyjnego i jakościowego rozwoju Konkursu poprzez popularyzację na terenie Uczelni jego celów oraz założeń, pozyskiwanie prac konkursowych, wspieranie uczestników Konkursu w zakresie właściwego przygotowania zgłoszeń prac konkursowych, wstępną selekcję zgłoszonych prac oraz przekazywanie rekomendacji dotyczących przydziału do kategorii konkursowej.

Od sierpnia 2024 jestem **ekspertem w projekcie Ośrodka Przetwarzania Informacji Państwowy Instytut Badawczy**, którego wyniki będą wykorzystane do opracowania strategicznego dokumentu, jakim jest Polityka Naukowa Państwa.

7.5 Członkostwo w komitetach organizacyjnych konferencji

Byłem członkiem komitetów programowych (ang. *Technical Program Committee*) następujących konferencji:

- The 12th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: IMCIC 2021, March 9 - 12, 2021 – Orlando, Florida, USA, <http://www.iiis-spring21.org/>
- The Seventeenth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2021), July 18, 2021 to July 22, 2021 – Nice, France, <https://www.iaria.org/conferences2021/ICWMC21.html>
- The Eleventh International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2021), November 29 - December 2, 2021 – Lloret-de-Mar, Spain <https://www.ipin-conference.org/2021/index.html>
- The Twenty-First International Conference on Networks (ICN 2022), April 24-28 2022 – Barcelona, Spain, <https://www.iaria.org/conferences2022/ICN22.html>
- The Twenty-Second International Conference on Networks, ICN 2023, April 24, 2023 to April 28, 2023 – Venice, Italy, <https://www.iaria.org/conferences2023/ComICN23.html>
- 19th International Conference on Computer Aided Systems Theory, Eurocast 2024, February 25- March 1, 2024 – Las Palmas, Spain <https://eurocast2024.fulp.ulpgc.es/>
- The Twenty-Third International Conference on Networks, ICN 2024, May 26, 2024 to May 30, 2024 – Barcelona, Spain, <https://www.iaria.org/conferences2024/ComICN24.html>

7.6 Recenzje

W ciągu swojej kariery recenzowałem artykuły do czasopism:

- IEEE Access, Impact Factor: 3.4, liczba recenzji: 6
- IEEE Transactions on Mobile Computing, Impact Factor: 7.7, liczba recenzji: 1
- IEEE Internet of Things Journal, Impact Factor: 8.2, liczba recenzji: 1
- MDPI Sensors, Impact Factor: 3.4, liczba recenzji: 5
- MDPI Future Internet, Impact Factor: 2.8, liczba recenzji: 1
- MDPI Applied Sciences, Impact Factor: 2.5, liczba recenzji: 1
- MDPI Journal of Sensor and Actuator Networks, Impact Factor: 3.3, liczba recenzji: 2
- MDPI International Journal of Environmental Research and Public Health, Impact Factor: 4.6, liczba recenzji: 2

- AMCS - International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Impact Factor: 1.6, liczba recenzji: 1
- Fundamenta Informaticae, liczba recenzji: 1

W 2019 roku byłem recenzentem pracy doktorskiej Pana Shaher Slehat pt. *Investigation of Security and Spectrum Management Issues in Cognitive Radio* realizowanej w ramach programu “Higher Degree by Research” na University of Technology Sydney w Australii.

7.7 Nagrody i wyróżnienia

Rok	Wyróżnienie
2014	nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej dla nauczycieli akademickich
2017	Medal Zasłużony dla Wydziału Elektroniki
2020	nagroda indywidualna Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni
2021	nagroda indywidualna Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni
2021	nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej w ramach programu motywacyjnego na rozwój dyscypliny naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja ”PRIMUS 2”
2021	Medal Brązowy za Długoletnią Służbę przyznany postanowieniem Prezydenta RP z dnia 30 lipca 2021
2022	Złota WITka – wyróżnienie dziekana Wydziału Informatyki i Telekomunikacji za działalność organizacyjną
2023	Złota Odznaka Politechniki Wrocławskiej

7.8 Dane naukometryczne

Podane poniżej wartości oddają stan na dzień 10 września 2024 zgodnie z bazami publikacji naukowych Web of Science (WoS), Scopus (Sco), oraz Google Scholar (GS). Liczbę punktów MEiN podałem za Bazą Dorobku Naukowego Politechniki Wrocławskiej.

Dla głównego osiągnięcia habilitanta:

Sumaryczny IF:	16.604		
Sumaryczna liczba punktów MEiN:	875		
	WoS	Sco	GS
Sumaryczna liczba cytowań:	106	176	262

Dla wszystkich osiągnięć habilitanta:

Sumaryczny IF:	32.423		
Sumaryczna liczba punktów MEiN:	1 503		
	WoS	Sco	GS
Liczba dokumentów:	41	69	81
Sumaryczna liczba cytowań:	536	685	1087
Sumaryczna liczba cytowań (bez autocytowań):	424	556	–
Indeks H:	9	11	14

Literatura

- [1] J. Nikodem and M. Nikodem, "Securing communication trees in ad hoc sensor networks," in *12th IEEE Symposium on Computers and Communications. ISCC 2007, Aveiro, Portugal, July 1-4, 2007.*, pp. 589–594, 2007.
- [2] R. Pawlak, B. A. Wojciechowski, and M. Nikodem, "New simplified heed algorithm for wireless sensor networks," in *Computer networks : 17th conference, CN 2010, Ustroń, Poland, June 15-19, 2010 : proceedings* (A. Kwiecień, P. Gaj, and P. Stera, eds.), vol. 79 of *Communications in Computer and Information Science*, pp. 332–341, Berlin ; Heidelberg: Springer, 2010.
- [3] B. A. Wojciechowski, M. Nikodem, R. Pawlak, and T. Surmacz, "Impact of clustering and data aggregation on the lifespan of wireless sensor networks," in *EUROCAST 2011 : Thirteen International Conference on Computer Aided Systems Theory [extended abstracts, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, February 6-11, 2011]*, pp. 184–185, 2011.
- [4] B. A. Wojciechowski, M. Nikodem, and T. Surmacz, "Clustering and data aggregation as factors of wireless sensor network lifetime," in *Computer aided systems theory - EUROCAST 2011 : 13th International Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, February 6-11, 2011 : revised selected papers. Pt. 1*, pp. 497–504, 2012.
- [5] T. Surmacz, M. Słabicki, B. A. Wojciechowski, and M. Nikodem, "Lessons learned from the deployment of wireless sensor networks," in *Computer Networks : 20th International Conference, CN 2013, Lwówek Śląski, Poland, June 17-21, 2013 : proceedings*, pp. 76–85, 2013.
- [6] T. Surmacz, B. A. Wojciechowski, M. Nikodem, and M. Słabicki, "On testing wireless sensor networks," in *New results in dependability and computer systems : proceedings of the 8th International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, September 9-13, 2013, Brunów, Poland*, pp. 439–448, 2013.
- [7] G. Ergeerts, M. Nikodem, D. Subotic, T. Surmacz, B. A. Wojciechowski, P. D. Meulenaere, and M. Weyn, "Dash7 alliance protocol in monitoring applications," in *2015 10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, 3PGCIC 2015 : proceedings, 4-6 November 2015, Krakow, Poland*, pp. 623–628, 2015.
- [8] M. Nikodem, M. Słabicki, T. Surmacz, and B. A. Wojciechowski, "Transmission power control based on packet reception rate," in *2014 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS) : proceedings of NTMS'2014 Conference and Workshops, March 30th to April 2nd, 2014, Dubai*, pp. 1–4, 2014.
- [9] T. Surmacz, B. A. Wojciechowski, M. Nikodem, and M. Słabicki, "Distributed time management in wireless sensor networks," in *Proceedings of the Ninth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, June 30 - July 4, 2014, Brunów, Poland*, pp. 443–453, 2014.
- [10] S. Szymczak, T. Jankowski, and M. Nikodem, "Underground gps (ugps) - precondition for location based services underground," in *Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa : bezpieczeństwo - efektywność - niezawodność : monografia : praca zbiorowa* (A. Klich and A. Koziel, eds.), pp. 33–41, Gliwice: Instytut Techniki Górniczej KOMAG, 2014.
- [11] M. Nikodem and T. Jankowski, "Evaluation of tof-based indoor localization for inaccurate distance measurements," in *IPIN 2015 : Sixth International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation : October 13-16, 2015, Banff, Canada.*, pp. 1–4, 2015.
- [12] D. Lymberopoulos, J. Liu, X. Yang, R. R. Choudhury, F. Lemic, J. Büsch, Z. Jiang, H. Zou, H. Jiang, A. Ashok, C. Xu, A. Ghose, N. Ahmed, C. Zhang, Z. Xiao, H. Wen, T. Schmid, D. Lee, M. Klepal, C. Beder, M. Nikodem, S. Szymczak, P. Hoffmann, L. Selavo, D. Giustiniano, V. Lenders, M. Rea, A. Marcaletti, C. Laoudias, D. Zeinalipour-Yazti, Y.-K. Tsai, T. E. Abrudan, A. Markham, A. Bestmann, R. Reimann, L. Li, C. Zhao, S. Adler, S. Schmitt, P. Lazik, N. Rajagopal, A. Rowe, V. Dentamaro, D. Colucci, P. Ambrosini, A. S. Ferraz, L. Q. L. Martins, P. Bello, A. Alvino, V. Sark, G. Pirkil, and P. Hevesi, "A realistic evaluation and comparison of indoor location technologies : experiences and lessons learned," in *IPSN '15 : Proceedings of the 14th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, April 13-16, 2015, Seattle, USA.*, pp. 178–189, 2015.
- [13] T. Jankowski, M. Bawiec, and M. Nikodem, "Modeling accuracy of indoor localization systems," in *EUROCAST 2015 : Fifteenth International Conference on Computer Aided Systems Theory [extended abstracts], February 8-13, 2015, Las Palmas de Gran Canaria, Canary Islands, Spain*, pp. 181–182, 2015.
- [14] M. Bawiec and M. Nikodem, "Modeling, simulation and synthesis of nanoscale circuits," in *Twelve International Conference on Computer Aided Systems Theory, EuroCAST 2009 : [extended abstracts, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 15-20 February 2009]*, pp. 297–298, 2009.
- [15] M. Bawiec and M. Nikodem, "Boolean logic function synthesis for generalised threshold gate circuits," in *46th Design Automation Conference, DAC '09 : 1964-2009, San Francisco, July 26-31, 2009.*, pp. 83–86, 2009.
- [16] M. Bawiec and M. Nikodem, "Generalised threshold gate synthesis based on and/or/not representation of boolean function," in *15th Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC 2010 : proceedings, Taipei, Taiwan, January 18-21, 2010.*, pp. 861–866, 2010.

- [17] M. Nikodem and M. Bawiec, "Logic circuit synthesis using threshold gates based on nanodevices with negative differential resistance property," in *IEEE NANO 2010 : 10th IEEE International Conference on Nanotechnology Joint Symposium with NANO KOREA 2010, August 17-20, 2010, [Seoul], Korea.*, pp. 1–6, 2010.
- [18] M. Nikodem, M. Bawiec, and T. Surmacz, "Negative difference resistance and its application to construct boolean logic circuits," in *Computer networks : 17th conference, CN 2010, Ustroń, Poland, June 15-19, 2010 : proceedings* (A. Kwiecień, P. Gaj, and P. Stera, eds.), vol. 79 of *Communications in Computer and Information Science*, pp. 39–48, Berlin ; Heidelberg: Springer, 2010.
- [19] M. Bawiec, B. A. Wojciechowski, and M. Nikodem, "Computer aided design of logic circuits based on negative differential resistance property," in *EUROCAST 2011 : Thirteen International Conference on Computer Aided Systems Theory [extended abstracts, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, February 6-11, 2011]*, pp. 186–187, 2011.
- [20] M. Nikodem, M. Bawiec, and J. Biernat, "Synthesis of generalised threshold gates and multi threshold threshold gates," in *ICSEng 2011 : [21st] International Conference on Systems Engineering : proceedings, 16-18 August, 2011, Las Vegas, Nevada*, pp. 463–464, 2011.
- [21] M. Nikodem, M. Bawiec, and J. Biernat, "Synthesis of multithreshold threshold gates," in *2012 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI, ISVLSI 2012 : proceedings, 19-21 August 2012, Amherst, Massachusetts, USA.*, pp. 94–99, 2012.
- [22] M. Nikodem, M. Bawiec, and J. Biernat, "Synthesis of generalised threshold gates and multi threshold threshold gates," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 58, no. 1, pp. 49–54, 2012.
- [23] M. Nikodem, "Synthesis of multithreshold threshold gates based on negative differential resistance devices," *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 232–242, 2013.
- [24] T. Iakymchuk, M. Nikodem, and K. M. Kępa, "Temperature-based covert channel in fpga systems," in *6th International Workshop on Reconfigurable Communication-Centric Systems-on-Chip, ReCoSoC : proceedings, June 20-22, 2011, Montpellier, France*, pp. 1–7, 2011.
- [25] M. Nikodem and K. M. Kępa, "Hardware accelerated simulation of crest factor reduction block for mobile telecommunications," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 58, no. 4, pp. 363–368, 2012.
- [26] P. Weber, M. Zagrabski, B. A. Wojciechowski, K. Berezowski, M. Nikodem, and K. M. Kępa, "Toolset for measuring thermal behavior of fpga devices," in *Proceedings of 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Sytems (THERMINIC 2013), Berlin, September 25-27, 2013*, pp. 48–53, 2013.
- [27] B. A. Wojciechowski, M. Nikodem, P. Weber, M. Zagrabski, and K. M. Kępa, "Hardware microprocessor thermal emulation using synthetic heat sources and temperature sensors in fpga," in *THERMINIC 2014 : 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Sytems, September 24-26, 2014, Greenwich, London, UK.*, pp. 1–5, 2014.
- [28] P. Weber, M. Zagrabski, P. Musz, K. M. Kępa, M. Nikodem, and B. A. Wojciechowski, "Configurable heat generators for fpgas," in *THERMINIC 2014 : 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Sytems, September 24-26, 2014, Greenwich, London, UK.*, pp. 1–4, 2014.
- [29] P. Weber, M. Zagrabski, B. A. Wojciechowski, M. Nikodem, K. M. Kępa, and K. Berezowski, "Calibration of ro-based temperature sensors for a toolset for measuring thermal behavior of fpga devices," *Microelectronics Journal*, vol. 45, no. 12, pp. 1753–1763, 2014.
- [30] J. Dias and A. Grilo, "Lorawan multi-hop uplink extension," *Procedia Computer Science*, vol. 130, pp. 424–431, 2018. The 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2018) / The 8th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2018) / Affiliated Workshops.
- [31] R. Kufakunesu, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "A survey on adaptive data rate optimization in lorawan: Recent solutions and major challenges," *Sensors*, vol. 20, no. 18, 2020.
- [32] P. S. Cheong, J. Bergs, C. Hawinkel, and J. Famaey, "Comparison of lorawan classes and their power consumption," 11 2017.
- [33] "Introduction to nordic distance toolbox," tech. rep., Nordic Semiconductor, 2022.
- [34] B. Xu, G. Sun, R. Yu, and Z. Yang, "High-accuracy tdoa-based localization without time synchronization," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, no. 8, pp. 1567–1576, 2013.
- [35] S. G. Leitch, Q. Z. Ahmed, W. B. Abbas, M. Hafeez, P. I. Laziridis, P. Sureephong, and T. Alade, "On indoor localization using wifi, ble, uwb, and imu technologies," *Sensors*, vol. 23, no. 20, 2023.
- [36] J. Powar, C. Gao, and R. Harle, "Assessing the impact of multi-channel ble beacons on fingerprint-based positioning," in *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–8, 2017.
- [37] *Impact of Anchor Placement and Anchor Selection on Localization Accuracy*, pp. 435–465. 2019.

- [38] J. Edwards and P. Tozer, "Using activity and milk yield as predictors of fresh cow disorders," *Journal of Dairy Science*, vol. 87, no. 2, pp. 524–531, 2004.
- [39] M. Berenguel, C. M. Cirre, R. Klempous, H. Maciejewski, M. Nikodem, J. Nikodem, I. Rudas, and L. Valenzuela, "Hierarchical control of a distributed solar collector field," in *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2005* (R. Moreno Díaz, F. Pichler, and A. Quesada Arencibia, eds.), (Berlin, Heidelberg), pp. 614–620, Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [40] J. Nikodem, M. Nikodem, R. Klempous, M. Woda, and Z. Chaczko, "Multihop communication in wireless sensors network based on directed cooperation," *BROADBANDCOM 2009-Selected Papers on Broadband Communication, Information Technology and Biomedical Applications*, 2009.
- [41] J. Nikodem, M. Nikodem, M. Woda, R. Klempous, and Z. Chaczko, "Relation-based message routing in wireless sensor networks," *Smart Wireless Sensor Networks*, pp. 127–145, 2010.
- [42] J. Nikodem, R. Klempous, M. Nikodem, and Z. Chaczko, "Multi-hop and directed routing based on neighborhood cooperation in wsn," in *2011 15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems*, pp. 221–227, IEEE, 2011.
- [43] J. Nikodem, Z. Chaczko, M. Nikodem, R. Klempous, and R. Wickramasooriya, "Combating security threats via immunity and adaptability in cognitive radio networks," *Recent Advances in Intelligent Engineering Systems*, pp. 221–242, 2012.
- [44] J. Nikodem, R. Klempous, M. Nikodem, and Z. Chaczko, *Improvement of Spatial Routing in WSN Based on LQI or RSSI Indicator*, pp. 285–297. Heidelberg: Springer International Publishing, 2014.
- [45] J. Nikodem, R. Klempous, M. Nikodem, M. Woda, and Z. Chaczko, "Directed cooperation in multihop wireless sensors network," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. vol. 56, no. No 1, 2010.